

UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE
UFR DE GÉOGRAPHIE – UMR 8504 Géographie-Cités
Centre de recherche sur les Réseaux, l'Industrie et l'Aménagement

Thèse pour l'obtention du titre de docteur de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Discipline : Géographie, Aménagement

Moduler le climat

Genèse, développement et significations de la
conception bioclimatique en architecture
(1947-1986)

Clément GAILLARD

Sous la direction de Mme Sabine BARLES
Co-encadrement par Mme Anne LEFEBVRE

Thèse présentée et soutenue publiquement le 24 mai 2022

Membres du Jury

Mme Sabine Barles, directrice de thèse, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Mme Anne Lefebvre, co-encadrante, École Normale Supérieure Paris-Saclay
M. Pierre Fernandez, rapporteur, École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse
M. Xavier Guchet, rapporteur, Université de Technologie de Compiègne
M. Alain Gras, examinateur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Mme Marjorie Musy, examinatrice, CEREMA
Mme Valérie Nègre, examinatrice, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	5
RÉSUMÉ/ABSTRACT.....	7
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
I. LA NAISSANCE DE LA MICROCLIMATOLOGIE ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION À PARTIR DU CLIMAT.....	29
I.1. Comprendre les microclimats par la microclimatologie.....	30
I.2. Concevoir à partir du climat : synthèses des connaissances et premières tentatives.....	71
I.3. Concevoir avec le climat selon Victor et Aladár Olgyay.....	122
Conclusion de la première partie.....	165
II. LA FONCTION CLIMATIQUE DES ÉLÉMENTS ET LE DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES SOLAIRES PASSIVES.....	169
II.1. Protection, régulation thermique et choix matériels.....	173
II.2. Les techniques solaires passives de chauffage et leurs évolutions.....	232
II.3. Les techniques passives de rafraîchissement et leurs évolutions.....	299
Conclusion de la deuxième partie.....	352
III. LA DIFFUSION ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE EN ARCHITECTURE À PARTIR DE 1973.....	355
III.1. Développement et diffusion de la conception bioclimatique à partir de 1973.....	357
III.2. Concevoir et construire suivant la conception bioclimatique.....	409
III.3 Problèmes et limites des réalisations bioclimatiques.....	452
Conclusion de la troisième partie.....	497
IV : PORTÉE PHILOSOPHIQUE DE LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE.....	499
IV.1. La mentalité thermique et ses analogies.....	501
IV.2. Concevoir et construire dans la continuité de l'architecture vernaculaire.....	541
IV.3. Penser la relation au climat suivant l'approche bioclimatique.....	585
Conclusion de la quatrième partie.....	629
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	631
BIBLIOGRAPHIE.....	645
LISTE DES ENTRETIENS.....	671
LISTE DES FIGURES.....	673
TABLE DES MATIÈRES.....	681

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier Sabine Barles pour son soutien et ses précieux conseils. Ce travail n'aurait pas été possible sans sa bienveillance et sa confiance, malgré mes nombreux tâtonnements initiaux et le fait que je venais d'une autre discipline. L'étude du terrain qu'elle m'a encouragé à faire a été particulièrement importante et a donné la forme définitive à ce travail. Je souhaite également remercier Anne Lefebvre pour son aide et pour les nombreux échanges que nous avons eus sur des sujets philosophiques parfois complexes.

Je tiens à remercier mes proches, en particulier Julie et ma sœur Juliette qui m'ont soutenu tout au long de ce travail, ainsi que tous mes amis. Je souhaite plus particulièrement remercier Étienne Dufour, Emma Thebault, Mathilde Pedro, Marion Albertelli et mes autres camarades chercheurs du Centre de recherche sur les Réseaux, l'Industrie et l'Aménagement qui m'ont généreusement aidé.

Je souhaite enfin remercier tous les architectes, ingénieurs, inventeurs, habitants et habitantes qui ont eu la gentillesse de contribuer à ce travail et qui ont pris le temps de répondre à mes questions. Leur dévouement et leur générosité ont été une source de motivation importante pour la poursuite de cette thèse. Je pense particulièrement à Robert Célaire, Georges Wursteisen, Jean-Pierre Cordier, Mariette Gerber, David Roditi, Jean-François Tricaud, Jean Bouillot, Marie-Françoise Lavigne, Patrick Claux, Jean-Pierre Traisnel et Patrick Bardou. Les moments conviviaux que j'ai pu partager avec eux sont, en définitive, tout aussi précieux que les informations qu'ils ont pu me confier. Le sens du partage dont ils ont fait preuve reflétait sans doute « l'esprit de Santa Fe » cher à nombre d'entre eux. Je tiens aussi à remercier Daniel Overbey de l'Université Ball State et Christine Sala de la bibliothèque de l'Université de Columbia qui ont eu la gentillesse de me transmettre certains documents rares. Bien qu'on tende à l'oublier, Internet reste un puissant réseau d'échange et de partage des connaissances.

Enfin, j'aimerais dédier ce travail à l'architecte Mimi Tjoyas, qui nous a malheureusement quittés pendant l'écriture de ce manuscrit. J'ai également une pensée pour Bernard Stiegler, qui a eu une influence considérable sur mon approche actuelle des problèmes philosophiques.

RÉSUMÉ

Cette thèse explore la genèse de la conception bioclimatique en architecture au XX^e siècle puis son développement entre le premier choc pétrolier et le milieu des années 1980, en France et aux États-Unis. Notre objectif est d'étudier cette démarche de conception sous l'angle des connaissances qu'elle a permis de constituer et de diffuser, de la climatologie et à la thermique des bâtiments, à la lumière des travaux de Simondon et de Bachelard. L'hypothèse centrale à l'origine de ce travail est que la conception bioclimatique est plus qu'une méthode de conception en architecture, et que l'étudier du point de vue épistémologique permet de comprendre la portée philosophique de cette approche, que nous nous proposons d'explorer dans la dernière partie de notre thèse. Nous espérons montrer en conclusion que l'approche bioclimatique, définie comme une démarche de conception et de compréhension, est susceptible d'éclairer certains problèmes actuels liés au climat et à son interprétation.

ABSTRACT

This thesis explores the genesis of bioclimatic design in architecture in the 20th century and its development between the first oil crisis and the mid-1980s in France and the United States. Our objective is to study this design approach from the perspective of the knowledge it has allowed to be constituted and disseminated, from climatology to building thermics, in the light of the work of Simondon and Bachelard. The central hypothesis of this work is that bioclimatic design is more than a design method in architecture, and that studying it from an epistemological point of view allows us to understand the philosophical scope of this approach, which we propose to explore in the last part of our thesis. We hope to show in conclusion that the bioclimatic approach, defined as a design and understanding approach, is likely to shed light on certain current issues related to climate and its interpretation.

AVANT-PROPOS

Ce travail de recherche a été réalisé grâce à un contrat doctoral spécifique normalien (CDSN) de l'École Normale Supérieure Paris-Saclay et en lien avec le Centre de Recherche en Design de cette école. Malgré ma formation initiale en design et en philosophie, j'ai choisi de réaliser mon parcours doctoral dans un laboratoire de recherche en géographie et en urbanisme, car j'étais curieux de connaître les méthodes et les objets étudiés dans ces disciplines. Mme Sabine Barles et l'École Doctorale de Géographie de Paris ont eu la gentillesse d'accepter notre projet. Ce choix explique que ce travail ne corresponde sans doute pas aux standards des thèses en géographie et en aménagement. Mais je suis rétrospectivement très content de l'avoir réalisé au contact de ces disciplines et je serais flatté qu'il soit associé à la géographie.

« "Ô grand astre ! Que serait ton bonheur, si tu n'avais ce que tu éclaires ?
Voici dix ans que tu montes jusqu'à ma caverne ; tu serais dégoûté de ta lumière et de ce trajet,
si nous n'étions là, moi, mon aigle et mon serpent.
Mais nous t'attendions chaque matin, pour te prendre ton superflu et t'en rendre grâces¹." »

F. Nietzsche, « Prologue de Zarathoustra »

« Nous avons beau rendre au sol ce qui lui appartient, nous ne parlerons jamais d'influences telluriques et de miasmes en donnant à ces mots le sens exact que lui donnaient nos ancêtres. [...] Alors même que nous nous servons de vieux mots, nous parlons un langage qui n'a jamais été entendu². »

M. Sorre

1 F. Nietzsche, *Ainsi parlait Zarathoustra. Also sprach Zarathustra*, Paris : Aubier/Montaigne, (coll. Bilingue des classiques étrangers), trad. de l'allemand par G. Bianquis, 1946, p. 47.

2 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, Paris : Armand Colin, 1943, p. 411-412.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Il est désormais admis que le climat méditerranéen quitte lentement les rives de la Méditerranée et s'éloigne progressivement de l'équateur comme de nombreux autres climats régionaux. La migration des isothermes vers les pôles ou en altitude, à une vitesse moyenne estimée entre quelques centaines de mètres¹ et trois kilomètres par an², acte les effets d'un changement climatique global déjà engagé. Les cartographies des climats présentées dans les vieux manuels de météorologie n'auront bientôt plus qu'un intérêt historique. La vitesse de ce changement bouleverse déjà très concrètement de nombreuses activités à nos latitudes tempérées, comme l'agriculture, mais affecte aussi nos représentations du climat dont l'importance pour toutes les formes de vie avait sans doute été progressivement oubliée avec la modernité. C'est dans ce contexte inédit que prend place notre étude de la conception bioclimatique en architecture. Elle a été guidée par l'intuition que le changement climatique global qui nous affecte directement est peut-être l'occasion de renouveler et d'enrichir nos relations au climat.

Toutes les constructions de la Terre sont chauffées par le soleil et sont refroidies la nuit, mais à de nombreuses latitudes ces phénomènes naturels ne permettent pas d'y maintenir une ambiance considérée comme confortable. C'est à ces latitudes que l'on a cherché à chauffer puis à rafraîchir les constructions tout ou partie de l'année et à contrôler la qualité de l'air qui y circulait³. C'est aussi à ces latitudes, plus particulièrement aux États-Unis puis en Europe⁴, qu'ont été développées les principales techniques de chauffage et de climatisation qui ont ensuite été célébrées et massivement diffusées avec la modernité, jusqu'à des latitudes où le chauffage et le rafraîchissement étaient jusqu'alors assurés naturellement dans des constructions et des aménagements conçus suivant des règles de conception traditionnelles. Cette diffusion du conditionnement mécanique de l'air est allée de pair avec une normalisation du confort thermique, alors que cette notion n'existait pas au XX^e siècle dans de nombreuses

1 S. Loarie, P. Duffy, H. Hamilton, *et al.* « The velocity of climate change », [en ligne], *Nature*, vol. 462, décembre 2009, p. 1052.

2 M. T. Burrows, D. S. Schoeman, L. B. Buckley *et. al.* « The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems » [en ligne], *Science*, vol. 334, novembre 2011, p. 653.

3 R. Banham, *The Architecture of the Well-Tempered Environment*, [1^{ère} éd. en anglais 1969, 2^e éd. rev. et corr. 1984], Chicago : University of Chicago Press, 1984, 320 p. Trad. *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Orléans : HYX, (coll. Restitutions), trad. de l'anglais par A. Cazé, 2011, p. 46.

4 *Ibid.*, p. 50-51.

cultures¹, et a bénéficié d'une énergie considérée comme abondante et continuellement disponible.

Paradoxalement, c'est dans les pays où ont été conçues les principales techniques de chauffage et de climatisation conventionnelles qu'a été théorisée dès le milieu du XX^e siècle une méthode de conception en architecture susceptible de réduire voire de supprimer le recours à ces techniques à de nombreuses latitudes, par une meilleure prise en compte du climat dans les projets de bâtiments et d'aménagements : il s'agit de la conception bioclimatique en architecture. La nouveauté de cette méthode de conception est toute relative et affirmer que la prise en compte du climat en architecture est née au XX^e siècle serait une erreur. On trouve des exemples de constructions et d'aménagements conçus à partir du climat dans de nombreux pays et de nombreuses cultures bien avant notre ère. L'historien de l'énergie solaire John Perlin a mis en évidence que l'invention du gnomon en Chine il y a 6 000 ans a permis de systématiser dès 2 000 ans av. J.-C. l'étude de la course du soleil et de l'ensoleillement pour l'orientation des constructions : certains poètes chinois mentionnent des constructions impériales et paysannes chauffées grâce au rayonnement solaire à partir du II^e siècle de notre ère². La prise en compte intuitive ou réfléchie de certains facteurs et éléments climatiques par les bâtisseurs constitue un phénomène diffus mais indéniable, dont il serait bien délicat de dater l'apparition. Elle s'est prolongée dans l'architecture traditionnelle, vernaculaire ou populaire de nombreux pays, dont la diversité a été considérée comme une expression des différents climats régionaux. Les traditions constructives développées à partir d'une prise en compte du climat ont parfois perduré jusqu'à aujourd'hui dans de nombreuses régions marquées par un facteur climatique dominant (ensoleillement très important, vents forts et réguliers, tempêtes...) ou un type de climat régional constant et bien caractérisé³ (climat subarctique, continental froid...). Mais nombre d'entre elles ont été abandonnées avec la diffusion des techniques de chauffage et de climatisation.

Cependant, la seconde moitié du XX^e siècle marque un changement dans la prise en compte du climat dans la conception en architecture avec l'apparition de la conception dite bioclimatique, d'abord théorisée par quelques architectes américains, puis diffusée aux États-Unis et en Europe. La conception bioclimatique en architecture est alors présentée comme une méthode puis une démarche de conception adaptée aux climats tempérés, mais applicable à tous

1 J. Dreyfus, *La Société du confort, quel enjeu, quelles illusions ?* Paris : L'Harmattan, 1990, p. 45.

2 J. Perlin, *Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*, Novato : New World Library, 2013, p. 3-6.

3 G. Escourrou, *Le Climat et la ville*, Paris : Nathan, (coll. Géographie d'aujourd'hui), 1991, p. 40-46.

les types de climats, qui permet de résoudre des problèmes architecturaux et techniques par référence à des facteurs ou des éléments climatiques. Sa principale originalité est d'être envisagée comme une méthode systématique et déductive de conception à partir du climat. Elle se diffuse particulièrement entre les années 1970 et 1980 dans un contexte politique et social singulier, marqué par les chocs pétroliers et les préoccupations énergétiques et environnementales aux États-Unis et en Europe.

La naissance et le développement de la conception bioclimatique sont systématiquement présentés sous l'angle de ces préoccupations environnementales par les différents historiens. L'historienne Marion Chauvin-Michel affirme que l'architecture bioclimatique s'est d'abord développée pour « économiser la consommation des énergies fossiles¹. » Les ingénieurs et les architectes associés à la conception bioclimatique sont considérés comme des « pionniers² » de l'éco-conception en architecture par l'ingénieur Bruno Peuportier, car ils auraient « su percevoir l'importance d'économiser les ressources et de préserver l'environnement³ » avant que ces préoccupations ne soient généralisées. Le rôle de ces « pionniers » est aussi reconnu par l'architecte et historien Pierre Lefèvre, qui présente l'émergence de la ville durable au début du XXI^e siècle dans la continuité de « quatre décennies d'architecture bioclimatique⁴ ». Il considère que la conception bioclimatique s'est développée à partir des préoccupations énergétiques et politiques du début des années 1970 et affirme que « [l'architecture] bioclimatique sort de terre dans le désert californien ou en province française, sous le double signe de la maison autonome et de la contre-culture⁵. » Ce point de vue est aussi partagé par l'architecte David Roditi, qui inscrit le développement de la conception bioclimatique dans la continuité des mouvements alternatifs et écologistes des années 1960 et 1970⁶, mais aussi de « l'architecture organique⁷ » de Frank Lloyd Wright du tout début du XX^e siècle, qui conçoit « en harmonie avec le vivant, les particularités du site et du climat⁸ ». Il existe donc un consensus sur le fait que la conception bioclimatique en architecture est née d'une prise de

1 M. Chauvin-Michel, *Architectures solaires et politiques énergétiques en France de 1973 à 1985*, Thèse NR Histoire de l'art, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, juin 2012, p. 55, Dir. C. Massu.

2 B. Peuportier, *Eco-conception des bâtiments. Bâtir en préservant l'environnement*, Paris : Presses de l'École des Mines, (coll. Sciences de la terre et de l'environnement), 2003, p. III.

3 *Ibid.*

4 P. Lefèvre, *Ressources de l'architecture pour la ville durable*, Rennes : Apogée, 2012, p. 10.

5 *Ibid.*

6 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, Paris : Eyrolles, 2011, p. 28-29, 33-34.

7 *Ibid.*, p. 21.

8 *Ibid.*

conscience de la consommation énergétique des bâtiments, particulièrement après le premier choc pétrolier¹, et que les constructions conçues suivant cette méthode réalisaient des économies substantielles de chauffage ou de rafraîchissement parfois en avance de plusieurs décennies par rapport aux exigences des réglementations thermiques en France. Néanmoins, la filiation directe entre la conception bioclimatique et l'émergence de l'éco-conception, de « l'architecture écologique² » ou de l'urbanisme durable doit être relativisée, car ces approches contemporaines de la conception prolongent aussi celles développées en Europe du Nord à la même période³ (Danemark, Autriche, Allemagne...).

Aux États-Unis, les travaux des historiens de l'architecture qui évoquent la conception bioclimatique s'accordent avec cette filiation⁴, mais ils insistent aussi sur le fait que les problèmes de conception à partir du climat en architecture sont antérieurs à l'émergence des préoccupations environnementales et écologiques de la fin des années 1960. L'historien Daniel Barber affirme que l'architecture bioclimatique se structure au début des années 1950 à partir des problèmes de conception des façades « selon la dynamique précise de l'exposition solaire⁵. » Les recherches de Barber permettent de comprendre très précisément le développement de la conception bioclimatique après la Seconde Guerre mondiale, qui est une période marquée par un regain d'intérêt pour l'énergie solaire aux États-Unis⁶. Comme Roditi, l'architecte américain John Reynolds affirme que les constructions de Frank Lloyd Wright et le développement des produits verriers constituent les « racines de la conception bioclimatique⁷ », mais il insiste également sur l'émergence des préoccupations environnementales au début des années 1960 et 1970 qui ont permis de promouvoir cette méthode de conception. Ce point de vue est également partagé par l'architecte Donald Watson, qui considère que la conception bioclimatique mise au point au début des années 1950 a été redécouverte après le premier choc pétrolier, et a évolué vers des préoccupations environnementales plus générales à la fin des

1 Fernandez, P. Lavigne, *Concevoir des bâtiments bioclimatiques. Fondements & méthodes*, Paris : Le Moniteur, 2009, p. 26.

2 D. Gauzin-Müller, *L'Architecture écologique*, Paris : Le Moniteur, 2001, p. 9.

3 *Ibid.*, p. 16-22.

4 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, *op. cit.*, p. 276-283.

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, Princeton : Princeton University Press, 2020, p. 5. Traduction personnelle, citation originale : « according to the precise dynamics of solar exposure. »

6 D. A. Barber, D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, New York : Oxford University Press, 2016, p. 63-88.

7 J. Reynolds, « The Roots of Bioclimatic Design », in : V. Olgyay *et. al.*, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, [1ère éd. 1963], Princeton : Princeton University Press, 2015, p. IX-XI.

années 1980¹. Globalement, tous ces historiens se rejoignent sur le fait que la conception bioclimatique est née au milieu du XX^e siècle, mais ils l'interprètent à la lumière des préoccupations environnementales et écologiques des années 1960 et 1970.

Tous ces travaux américains et français en histoire de l'architecture s'accordent sur le fait que la conception bioclimatique constitue une étape importante dans le développement d'une approche écologique de la conception en architecture et en urbanisme plus consciente de la limite des ressources planétaires, notamment à partir du premier choc pétrolier. Selon nous, leur principale limite est qu'ils abordent la conception bioclimatique comme une démarche exclusivement liée à l'architecture et la présentent parfois comme un simple épisode entre l'architecture organique de Frank Lloyd Wright et la naissance de l'architecture écologique. Ils associent systématiquement la conception bioclimatique à l'émergence des préoccupations énergétiques et environnementales en Europe et aux États-Unis, et réduisent parfois cette méthode de conception à une simple manifestation politique d'une conscience écologique naissante en architecture, qui serait aujourd'hui plus largement généralisée. Ce faisant, ils ne lui accordent qu'un rôle historiquement restreint et borné dans le temps. Puisqu'ils affirment que le principal apport de la conception bioclimatique a été d'introduire ces préoccupations écologiques et environnementales, la majorité de ces travaux masque l'ensemble des connaissances qui ont été synthétisées et diffusées par l'intermédiaire de cette méthode de conception, dans le but de renouveler la compréhension du climat et sa prise en compte. Indirectement, ils négligent les significations qui ont été associées à l'emploi de cette méthode et au fait d'habiter une construction bioclimatique par le passé. Dans la mesure où ces travaux n'expliquent pas la singularité de la conception bioclimatique, ils encouragent indirectement l'utilisation du terme « bioclimatique » pour qualifier tout ce qui se rapporte de près ou de loin au climat, ce qui explique que ce terme soit aujourd'hui utilisé pour présenter le nouveau plan local d'urbanisme de la ville de Paris², mais aussi pour promouvoir des modèles de briques ou de pergolas dites « bioclimatiques³ ».

1 D. Watson, « Bioclimatic Design Research » in : K. W. Boër (éd.), *Advances in Solar Energy. An Annual Review of Research and Development*, vol. 5, New York : Plenum Press, 1989, p. 405-406.

2 « Un PLU bioclimatique pour Paris », *C.A.U.E. de Paris*, 2021, [consulté le 02/02/2022], disponible à l'adresse : <<https://www.caue75.fr/un-plu-bioclimatique-pour-paris>>

3 « Pergolas bioclimatiques, des lames orientables pour un confort accru », *Le Moniteur*, 21 sept. 2016, [consulté le 02/02/2022], disponible à l'adresse : <<https://www.lemoniteur.fr/article/pergolas-bioclimatiques-des-lames-orientables-pour-un-confort-accru.1312359>>

Les travaux en histoire de l'architecture présentés précédemment illustrent un point de vue historique essentiellement continuiste, qui ne permet pas de mettre en évidence la nouveauté de la conception bioclimatique au XX^e siècle. Paradoxalement, ils reconnaissent la singularité de cette méthode de conception à partir du climat, mais ils l'expliquent par la diffusion de préoccupations écologiques et environnementales plus générales, qui ne concernent pas directement le contenu de la conception bioclimatique. Ce sont les connaissances en microclimatologie et en thermique du bâtiment diffusées par cette méthode de conception qui justifient qu'elle ait été spécifiquement présentée comme bioclimatique par certains architectes, ingénieurs et inventeurs. Bien que la conception bioclimatique soit associée à l'architecture, elle s'est structurée à l'interface entre différentes disciplines et il serait réducteur de l'étudier seulement sous l'angle de l'histoire de l'architecture. En effet, pour certains architectes associés à la conception bioclimatique, un traité de microclimatologie était considéré comme un meilleur manuel pour leur pratique que n'importe quel autre ouvrage consacré à l'architecture. De la même manière, certains ingénieurs spécialisés dans la climatisation naturelle des bâtiments ont développé des techniques de chauffage et de rafraîchissement en s'inspirant des travaux en cybernétique produits par des mathématiciens qui n'ont *a priori* rien à voir avec l'architecture. Une étude sérieuse de la conception bioclimatique devrait aborder les connaissances que cette méthode de conception a contribué à synthétiser, notamment grâce au développement des techniques de chauffage et de rafraîchissement conçues pour fonctionner avec le climat, dont la mise au point dans la seconde moitié du XX^e siècle a mis en évidence des problèmes qui ont mobilisé de nouvelles connaissances techniques.

C'est l'objet de cette thèse qui est consacrée à la genèse et au développement de la conception bioclimatique en architecture en France et aux États-Unis, de la période où elle a été théorisée à la fin des années 1940, jusqu'au moment où elle a été largement diffusée sous l'impulsion du premier choc pétrolier, entre le début des années 1970 et le milieu des années 1980. Temporellement, notre étude englobe la synthèse des connaissances intégrées à la conception bioclimatique, sa conceptualisation et sa diffusion, mais elle n'aborde pas ses développements les plus récents, qui sont plus diffus et se confondent en partie avec l'éco-conception en architecture. La période que nous avons choisie (1947-1986) comprend la publication en 1947 des premiers travaux importants de microclimatologues et de météorologues appliqués à l'architecture. Elle s'achève avec le désintérêt pour la conception bioclimatique et les énergies alternatives, marqué par la fermeture de la centrale solaire *Thémis*

en 1986¹, mais aussi par la disparition de figures importantes de la conception bioclimatique aux États-Unis, comme John I. Yellott (1908-1986) et Jeffrey E. Aronin (1927-1986).

Le choix de la France et des États-Unis s'explique par le fait que ces pays ont concentré l'essentiel des recherches sur les techniques solaires passives, qu'on peut désigner provisoirement comme l'ensemble des techniques de chauffage et de rafraîchissement conçues pour fonctionner avec le climat. On trouve également dans ces deux pays les principaux centres de recherches sur ces techniques que sont le Los Alamos Scientific Laboratory (LASL) situé au Nouveau-Mexique, aux États-Unis, et le Laboratoire de l'Énergie Solaire situé à Odeillo-Font-Romeu, en France, qui ont entretenu de nombreux échanges à partir du milieu des années 1970. La France et les États-Unis regroupaient la majorité des constructions présentées comme bioclimatiques, qui étaient essentiellement des maisons individuelles, construites entre le début des années 1970 et le milieu des années 1980 au moment où se structure la conception bioclimatique. La grande majorité des constructions bioclimatiques construites durant la décennie 1970 en Europe étaient situées en France², qui bénéficiait par ailleurs d'une avance sur les autres pays dans les recherches sur les matériaux et les techniques intégrées dans ces constructions, avant qu'elle ne s'estompe au milieu des années 1980 au profit d'autres pays, comme l'Allemagne ou l'Angleterre³. Le choix de ces deux terrains est donc justifié par leur importance dans le développement de la conception bioclimatique.

Contrairement à tous les travaux évoqués précédemment qui abordaient la conception bioclimatique du point de vue de l'histoire de l'architecture et selon le prisme des préoccupations environnementales, nous souhaitons étudier la genèse de cette méthode de conception à l'interface entre les différentes sciences et domaines de recherche qu'elle a mobilisés. Notre hypothèse principale est que la conception bioclimatique est plus qu'une méthode de conception en architecture : les connaissances qu'elle a contribué à synthétiser, à produire et à diffuser engageaient une compréhension renouvelée de nos relations au climat qui serait toujours signifiante aujourd'hui. Nous souhaitons dépasser l'*a priori* selon lequel cette méthode de conception aurait simplement été inventée pour économiser l'énergie de chauffage ou de rafraîchissement des bâtiments. Cette hypothèse s'appuie sur le témoignage d'ingénieurs et d'architectes associés à la conception bioclimatique, comme celui de David Roditi, qui

1 F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris : La Découverte, 2020, p. 305-306.

2 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, Paris : CNRS/COMES/PIRDES, 1979. (Archives personnelles de Michel Gerber - Treilles)

3 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, *op. cit.*, p. 36.

affirme que « [l'architecture] bioclimatique n'est pas seulement un moyen de faire des économies d'énergie ou de remplacer une source d'énergie par une autre¹ », mais qu'elle « est surtout l'art de construire en harmonie avec le climat². »

Mais cette notion d'harmonie est encore bien trop imprécise : notre hypothèse est que seule l'étude approfondie des connaissances et des techniques mobilisées par la conception bioclimatique peut nous permettre de comprendre les significations qui ont été associées au fait de construire en harmonie avec le climat à cette période. Nous entendons par « signification », ce par quoi une chose est intuitivement valorisée par rapport à un ensemble³. Selon cette définition issue de l'éthologie, une signification est ce qui sous-tend une action et oriente un projet suivant une dimension plus générale qui le rattache à d'autres significations⁴. Notre hypothèse soutient que les significations associées au fait de construire en harmonie avec le climat à la période qui nous intéresse engageaient une compréhension renouvelée du climat et des phénomènes climatiques qui serait toujours d'actualité.

Cette hypothèse ne rejette pas le rôle des motivations environnementales et écologiques dans le développement de la conception bioclimatique déjà mis en évidence par de nombreux historiens, mais soutient que ces préoccupations ne permettent pas d'expliquer les problèmes concrets rencontrés lors du développement de cette méthode de conception. Selon nous, ce sont ces problèmes qui singularisent la conception bioclimatique et qui doivent être au centre d'une étude historique de cette méthode de conception. À l'origine de la conception bioclimatique, il y aurait un problème général qui consiste à produire un microclimat habitable et qui a mobilisé les connaissances de la microclimatologie, de la thermique du bâtiment et de nombreux autres champs. Les constructions bioclimatiques de la période qui nous intéresse étaient des hypothèses techniques matérialisées : elles illustrent un certain niveau de compréhension des phénomènes microclimatiques et thermiques et sont autant de tentatives pour moduler le climat local, afin de produire une ambiance intérieure considérée comme confortable. Pour caricaturer notre propos, nous souhaitons montrer que le développement et l'évolution des techniques mobilisées par la conception bioclimatique ont moins été guidés par des préoccupations environnementales que par des problèmes de propagation de la chaleur. Malgré leur spécificité, nous voulons montrer que la résolution de ces problèmes thermiques avait une signification

1 *Ibid.*, p. 9.

2 *Ibid.*

3 J. Von Uexküll, « La théorie de la signification », *Mondes animaux et monde humain. La théorie de la signification*, [1ère éd. 1965], Paris : Pocket, (coll. Agora), trad. de l'allemand par P. Muller, 2004, p. 94-95.

4 *Ibid.*, p. 153.

plus générale, puisqu'elle confirmait que ces techniques pouvaient être couplées à un climat et permettaient effectivement de chauffer ou de rafraîchir naturellement des constructions.

Afin de vérifier notre hypothèse principale qui considère que les connaissances synthétisées par la conception bioclimatique engageaient une compréhension renouvelée du climat, nous avons scrupuleusement analysé les publications et les entretiens que nous avons pu rassembler suivant une méthode empruntée à l'épistémologie historique, et plus particulièrement à Gaston Bachelard. L'épistémologie historique est traditionnellement associée à l'étude du progrès des sciences physiques fondamentales (mécanique quantique, électromagnétique...), mais cette approche peut s'étendre à toutes les sciences qui produisent des preuves expérimentales validées par des mesures reproductibles par une communauté scientifique. La microclimatologie et la thermique du bâtiment, qui fait partie des sciences de l'ingénieur, répondent à ce critère et peuvent donc être étudiées selon les méthodes de l'épistémologie historique.

Pour Bachelard, qui a utilisé cette méthode sans l'avoir véritablement thématisée, l'épistémologie historique peut être présentée comme « une histoire jugée¹ » selon « la *finalité du présent*² » et « qui part des certitudes du présent et découvre, dans le passé, les formations progressives de la vérité³. » La méthode de l'épistémologie consiste à juger de l'histoire d'une science pour y « tracer des lignes de progrès⁴ », afin de déceler l'amélioration progressive ou la découverte de connaissances importantes au regard de critères contemporains, mais aussi de montrer les problèmes et les contradictions qu'elle a pu rencontrer au cours de son histoire et qui dialectise cette évolution. Bachelard affirme que l'épistémologie historique, qu'il assimile à l'histoire des sciences, est orientée « dans le sens d'une compréhension améliorée et d'une expérience élargie⁵ », car cette méthode étudie spécifiquement l'approfondissement et l'affinement progressif des connaissances au cours de l'histoire d'une science et montre les significations de ces évolutions. Bien qu'il soit tout à fait possible de critiquer l'idée d'un

1 G. Bachelard, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, [1ère éd. 1951], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque de Philosophie Contemporaine), 1965, p. 26.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* Voir également : G. Canguilhem, « L'Histoire des sciences dans l'œuvre épistémologique de Gaston Bachelard », *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, [1ère éd. 1968, 2e éd. rev. et augm. 1994], Paris : Vrin, (coll. Problèmes & controverses), 2002, p. 183-184.

4 G. Bachelard, « L'Actualité de l'histoire des sciences », *L'Engagement rationaliste*, Paris : PUF, (coll. Bibliothèque de philosophie contemporaine), 1972, p. 142.

5 *Ibid.*, p. 140.

progrès scientifique général, il nous semble que cette notion de progression peut être conservée à condition de bien circonscrire le contexte spécifique où elle a lieu¹, et de montrer en quoi un progrès apporté dans un domaine peut entraîner une régression dans d'autres domaines connexes². Selon nous, l'épistémologie historique doit étudier la localité ou la « régionalité³ » d'un progrès, pour reprendre une formulation bachelardienne.

Le recours à l'épistémologie historique pour l'analyse de nos sources s'explique par la volonté d'étudier la conception bioclimatique sous l'angle des connaissances qu'elle a contribué à synthétiser, à produire et à diffuser. Elle relègue au second plan le rôle des préoccupations sociales et politiques, qu'elle aborde comme des motivations d'ordre psychologique ou idéologique. Nous pensons que la conception bioclimatique elle-même peut être étudiée du point de vue de l'épistémologie historique, dans la mesure où les architectes, les ingénieurs, les inventeurs et les chercheurs qui ont revendiqué l'emploi de cette méthode de conception, ou ont contribué au développement des techniques qu'elle mobilisait, ont systématiquement été soucieux de prouver leurs résultats suivant une méthode expérimentale et ont cherché à les communiquer suivant certaines exigences scientifiques. C'est notamment le cas des communications présentées lors des *Passive Solar Conferences* qui permettent de suivre assez précisément l'évolution de la compréhension de certaines techniques. La méthode de l'épistémologie historique telle qu'elle a été employée par Bachelard se concentre particulièrement sur l'analyse des discours produits par les scientifiques, qui dans notre cas émanent d'architectes et d'ingénieurs ou plus rarement d'inventeurs ou de chercheurs. Elle étudie particulièrement les images, les métaphores et les analogies qu'ils ont employé pour décrire des phénomènes physiques parfois complexes, qui forment paradoxalement autant « d'obstacles⁴ » à leur compréhension une fois qu'elles se diffusent et sont réutilisées⁵. Dans notre cas, nous verrons que de nombreuses analogies ont été proposées pour décrire le fonctionnement de certaines techniques solaires passives et que ces analogies témoignaient d'une compréhension particulièrement approfondie des phénomènes thermiques. L'épistémologie historique nous permet d'étudier le développement de la conception

1 X. Guchet, *Le Sens de l'évolution technique*, Paris : Léo Scheer, (coll. Non & Non), 2005, p. 104-105.

2 P. Bihouix, *L'âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, Paris : Seuil, (coll. Anthropocène), 2014, p. 59-83.

3 G. Bachelard, *Le Rationalisme appliqué*, [1ère éd. 1949], Paris : PUF, (coll. Quadrige), 1994, p. 131-133.

4 G. Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, [1ère éd. 1938], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque des textes philosophiques), 1980, p. 83.

5 *Ibid.*, p. 80.

bioclimatique comme une série d'ajustements, à partir de discours provenant de disciplines dont les domaines d'études convergent, à l'interface entre la microclimatologie et la thermique du bâtiment.

Notre étude de la conception bioclimatique mobilise également la philosophie et l'histoire des techniques afin de vérifier notre hypothèse selon laquelle les connaissances diffusées par l'intermédiaire de la conception bioclimatique renouelaient la compréhension du climat. Notre analyse s'appuie notamment sur les travaux du philosophe Gilbert Simondon. Simondon a profondément renouvelé la philosophie des techniques en montrant que l'étude des objets techniques devait moins se concentrer sur l'usage de ces objets que sur les opérations qu'ils concrétisent, et qui permettent d'expliquer leurs significations¹. Il a également mis en évidence que la suite d'opérations propre à certaines techniques ou le fonctionnement de certains objets techniques pouvaient servir de modèles d'explication de phénomènes à d'autres échelles : par exemple, certains présocratiques se représentaient la naissance du cosmos à partir des techniques de la poterie ou de l'agriculture². Simondon montre que ces techniques permettaient de schématiser des phénomènes inconnus, et qu'à ce titre elles influençaient la mentalité de ces cultures et possédaient des significations qui dépassaient leur stricte utilité. Plus généralement, la philosophie simondonienne a considérablement influencé notre travail en nous incitant à étudier très précisément les techniques mobilisées par la conception bioclimatique, afin de vérifier notre hypothèse initiale sur les significations et la portée philosophique de cette méthode de conception. Les travaux de Bachelard et de Simondon nous semblent complémentaires³, puisqu'on trouve chez Bachelard une philosophie des techniques et de nombreuses intuitions reprises par Simondon.

Notre étude de la conception bioclimatique s'inscrit également dans le champ de l'histoire des techniques. Nous reprenons et nous discutons notamment des travaux d'André Leroi-Gourhan sur les phénomènes d'évolution et de diffusion des techniques⁴, et ceux de Bertrand Gille sur la « connaissance technique⁵ ». Vis-à-vis de notre hypothèse principale,

1 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, [1ère éd. 1958], Paris : Aubier, (coll. L'Invention philosophique), 1989, p. 10-16.

2 G. Simondon, « Sciences de la nature et sciences de l'homme », *Sur la philosophie (1950-1980)*, Paris : PUF, 2016, p. 257-263.

3 X. Guchet, *Le Sens de l'évolution technique*, *op. cit.*, p. 176-178.

4 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. L'Homme et la matière*, [1ère éd. 1943], Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1971, 348 p. ; A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. Milieu et technique*, [1ère éd. 1945], Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1973, 475 p.

5 B. Gille, « Essai sur la connaissance technique », p. 1416-1477 in : B. Gille (dir.), *Histoire des techniques*, Paris : Gallimard, (coll. Encyclopédie de la Pléiade), 1978.

l'utilisation de l'histoire des techniques se justifie par le fait qu'elle nous permet d'étudier la conception bioclimatique sous l'angle des techniques et des connaissances techniques mobilisées par cette méthode de conception. Cette méthode nous permet également d'aborder les constructions bioclimatiques comme des étapes dans la mise au point de ces techniques et de l'affinement de ces connaissances, plutôt que comme des œuvres architecturales achevées et définitives. En ce sens, elle complète l'approche épistémologique empruntée à Bachelard. L'étude de la conception bioclimatique par le prisme de l'histoire des techniques nous permet également d'intégrer les travaux récents en histoire environnementale qui traitent de l'énergie solaire, de l'évolution de certaines techniques solaires passives ou de l'amélioration des éléments de construction, notamment verriers et isolants, qui ont contribué au développement de la conception bioclimatique. Ils forment l'essentiel de nos sources secondaires avec les travaux en histoire de l'architecture que nous avons déjà évoqués.

Ce projet de mener une étude approfondie des connaissances et des techniques mobilisées par la conception bioclimatique à partir de la fin des années 1940 nécessitait de rassembler et d'étudier directement les documents où elles sont présentées afin de restituer leurs évolutions. Il paraissait essentiel d'étudier la conception bioclimatique du point de vue de ceux qui ont directement contribué à son développement. Afin d'orienter nos recherches, nous nous sommes d'abord appuyés sur des entretiens qualitatifs menés avec des ingénieurs et des architectes associés à la conception bioclimatique, ou avec leurs proches, et plus rarement avec des habitants et des habitantes vivant dans des maisons bioclimatiques. Au total, nous avons mené trente-sept entretiens, majoritairement avec des architectes et des ingénieurs français du Sud de la France, et avec quelques architectes américains à distance (liste p. 671). Ces entretiens, dont la durée varie entre une demi-heure et plusieurs demi-journées, n'ont pas été retranscrits car leur intérêt réside essentiellement dans les échanges qu'ils ont permis d'engager. Ils étaient souvent accompagnés de visites de constructions et de discussions informelles. Ils nous ont essentiellement servi à reconstituer le réseau des architectes, ingénieurs et inventeurs français et américains associés à la conception bioclimatique, et ils nous ont permis d'échanger sur les motivations personnelles de ce que nous avons appelé les acteurs de la conception bioclimatique. C'est grâce à ces entretiens que nous avons pu correctement orienter nos recherches. Ces entretiens ne constituent pas notre source principale, mais ils ont été absolument indispensables à nos recherches, puisqu'ils nous ont permis de sélectionner les publications que nous avons

étudiées et ont été l'occasion de découvrir les motivations politiques et éthiques des acteurs de la conception bioclimatique.

Les sources textuelles et iconographiques que nous avons consultées provenaient essentiellement des archives privées des architectes et des ingénieurs avec lesquels nous avons pu nous entretenir. Nous avons étudié les archives privées de huit ingénieurs et architectes (p. 645-648). Outre de nombreuses publications françaises, elles contenaient souvent des documents américains non publiés et diffusés de main en main particulièrement rares et difficiles à consulter. L'intégralité de ces archives appartenait à des architectes et des ingénieurs français mais elles contenaient principalement des publications américaines, ce qui nous a permis d'étendre notre étude aux États-Unis et de consulter les principales sources américaines sur la période qui nous intéressait¹. C'est grâce à ces archives privées que nous avons pu étudier les actes des *Passive Solar Conferences* qui constituent, avec les manuels sur la conception bioclimatique, les principales sources textuelles de notre travail. Lorsque certaines sources américaines étaient manquantes, nous en avons fait l'acquisition ou nous avons parfois directement contacté des architectes et des ingénieurs américains afin qu'ils nous les fassent parvenir. En complément, nous avons consulté les archives des laboratoires de recherche de deux écoles d'architecture (Marseille et Toulouse) et celles de deux institutions (UNESCO et Nations Unies), qui sont aujourd'hui numérisées. Nous avons ainsi constitué un corpus complet de sources textuelles et iconographiques relatives à la conception bioclimatique et solaire passive entre le début des années 1970 et la fin des années 1980.

Pour sélectionner ces sources, nous avons été très attentifs à leur redondance. Nombre des documents que nous avons pu consulter n'étaient que la reformulation d'éléments déjà présents dans des sources antérieures. Il est vite apparu que les sources principales étaient celles qui présentaient le contenu le plus original issu de recherches de première main. Ces publications étaient généralement les plus citées et les plus souvent mentionnées. Quand c'était possible, nous avons soigneusement étudié les citations et les mentions faites à d'autres auteurs dans les publications que nous avons pu consulter, afin d'identifier les principales références de leurs auteurs et de reconstituer les sources sur lesquelles ils s'étaient eux-mêmes appuyés. Par cette méthode, nous avons pu relier de nombreuses publications les unes aux autres. C'est ainsi que nous avons pu établir les principales sources concernant la microclimatologie qui ont

1 Le contexte sanitaire ne nous a pas permis de nous rendre aux États-Unis, entre autres pour consulter les archives de la New Mexico Solar Energy Association à Albuquerque, au Nouveau-Mexique.

été utilisées par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Nous avons été orientés dans ce travail de sélection par les entretiens que nous avons pu mener, qui nous ont permis de déterminer les publications principales, ainsi que les manuels sur la conception bioclimatique qui avaient été les plus utilisés et le plus largement diffusés en France et aux États-Unis. Ce critère de redondance, ainsi que la minutieuse étude des citations et les entretiens, nous ont permis de sélectionner les principales publications représentatives de la conception bioclimatique et solaire passive sur la période considérée.

La méthode d'analyse des sources que nous avons rassemblées croise donc l'épistémologie historique de Bachelard avec la philosophie des techniques de Simondon et différents travaux en histoire des techniques. Elle se déploie suivant un plan essentiellement chronologique qui s'appuie sur les travaux de l'architecte Donald Watson, qui a participé à la diffusion de la conception bioclimatique et a proposé la chronologie la plus convaincante du développement de cette méthode de conception¹. Il évoque notamment l'importance des recherches en microclimatologie du début du XX^e siècle pour la genèse de la conception bioclimatique². Nous étudions ces recherches dans la première partie et nous montrons comment certains architectes les ont interprétées pour proposer une méthode de conception qu'ils présentent comme bioclimatique (chapitres I.1, I.2 et I.3). Nous abordons dans un second temps l'ensemble des recherches menées par certains architectes, ingénieurs, chercheurs et inventeurs sur la fonction climatique des éléments et les techniques solaires passives dans la seconde moitié du XX^e siècle. Cette seconde partie constitue un inventaire complet de l'évolution des techniques de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation naturelle mise au point durant cette période (chapitres II.1, II.2 et II.3). Nous verrons que certaines de ces techniques prolongeaient indirectement des expérimentations menées au XIX^e siècle, ou des principes plus anciens déjà utilisés dans l'architecture vernaculaire. La troisième partie aborde la convergence entre ces recherches et les travaux théoriques sur la conception bioclimatique à partir du premier choc pétrolier (chapitres III.1, III.2 et III.3). Elle aborde directement le développement de la conception bioclimatique et les caractéristiques des réalisations issues de cette méthode de conception jusqu'au milieu des années 1980. Cette troisième partie montre également les limites et les contradictions auxquelles s'est heurtée la conception bioclimatique

1 D. Watson, « Bioclimatic Design Research », *op. cit.*, p. 402-438.

2 *Ibid.*, p. 404.

durant cette période et qui ont participé au désintérêt progressif pour cette méthode de conception. La quatrième et dernière partie consiste à déployer la portée philosophique de la conception bioclimatique suivant plusieurs dimensions, en prenant acte de la signification de ces contradictions (chapitres IV.1, IV.2 et IV.3). Elle nous permet de défendre l'actualité de l'approche bioclimatique et sa contribution aux problèmes concernant les relations entre les techniques, les climats et les modes de vie.

PARTIE I : LA NAISSANCE DE LA MICROCLIMATOLOGIE ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION À PARTIR DU CLIMAT

Il peut paraître curieux d'entamer l'étude d'une méthode de conception associée à l'architecture par l'examen de travaux de climatologues réalisés dans la première partie du XX^e siècle dans le domaine de la microclimatologie. Pourtant, leur influence nous paraît considérable. L'étude des climats dits « près du sol¹ » a permis de vulgariser auprès des concepteurs les phénomènes physiques de base qui existent à l'échelle des microclimats, afin qu'ils puissent les comprendre et les anticiper dans la conception architecturale et urbaine. Notre hypothèse est que ces travaux concernant l'étude des microclimats sont à la source des recherches menées par la suite par certains architectes et ingénieurs sur les méthodes de conception à partir du climat, qui se sont directement appuyés sur les écrits de nombreux climatologues et microclimatologues.

Toute cette partie aborde la genèse de la conception bioclimatique à partir des recherches menées en microclimatologie à partir des années 1920. À l'origine de la conception bioclimatique, il y aurait un problème introduit par la microclimatologie : comment modifier favorablement un microclimat ? Ce problème est apparu au moment où l'étude des climats près du sol initiée par le climatologue Rudolf Geiger a mis en évidence la diversité des microclimats existants à des échelles particulièrement réduites et l'action des surfaces aménagées sur les phénomènes microclimatiques. Il s'opère entre la première et la deuxième partie du XX^e siècle une prise de conscience de la nécessité de comprendre ces phénomènes et de les utiliser pour la conception architecturale et urbaine. Nous verrons que les méthodes de conception avec le climat mises au point par certains architectes et ingénieurs aux États-Unis et dans le contexte de l'architecture tropicale à cette période mobilisent directement et indirectement les recherches en microclimatologie. Elles reposent sur l'interprétation des résultats en microclimatologie et la déduction de prescriptions architecturales. Cette partie présente ces différentes méthodes de conception, et se concentre particulièrement sur la mise au point de la conception bioclimatique en architecture au début de la seconde moitié du XX^e siècle par l'architecte Victor Olgyay.

1 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, Cambridge : Harvard University Press, trad. de l'allemand par Milroy N. Stewart *et. al.*, 1950, 482 p.

I.1. Comprendre les microclimats par la microclimatologie

Cette partie est consacrée à la présentation des recherches initiées entre autres par les climatologues Rudolf Geiger et Helmut Landsberg, qui ont posé les bases modernes de la microclimatologie ou de ce que l'on nomme aujourd'hui la « climatologie de l'environnement¹ ». Malgré l'importance pratique de la microclimatologie pour des domaines comme l'agriculture, le développement de l'étude des microclimats au XX^e siècle n'est pratiquement jamais évoqué dans les histoires de la climatologie², qui abordent essentiellement les progrès dans la compréhension des phénomènes atmosphériques à grande échelle, mais mentionnent très rarement ceux concernant l'étude des climats locaux et microclimats³. Sans prétendre combler cette lacune, le but de cette partie est de présenter les principaux travaux en microclimatologie qui ont été mentionnés, cités et commentés par les architectes et les ingénieurs par la suite.

L'étude systématique des phénomènes microclimatiques, et l'observation comparée des microclimats naturels et transformés, ont permis de constater qu'un aménagement affectait localement les masses d'air, cet effet étant le plus souvent ignoré ou méconnu par les concepteurs. Les microclimats sont apparus comme des objets compréhensibles et susceptibles d'être modifiés par l'action technique, afin de produire très localement un microclimat favorable par la régulation des phénomènes microclimatiques. Cette prise de conscience de la possibilité de produire un microclimat favorable s'est également appuyée sur le constat que les mesures météorologiques, nécessaires pour caractériser un climat local et régional, n'étaient pas en mesure de rendre compte de la diversité des phénomènes climatiques d'un ordre de grandeur inférieur et propre à l'existence de surfaces exposées aux facteurs climatiques. Les travaux sur les microclimats et les climats près du sol ont considérablement complexifié l'idée d'un climat homogène et moyen : leur apport principal a été de démontrer qu'il existe différents

-
- 1 G. Escourrou, *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*, Paris : Masson, (coll. Géographie), 1981, 182 p. ; G. Guyot, *Climatologie de l'environnement*, [2ème éd.], Paris : Dunod, (coll. Sciences Sup), 2013, 544 p.
 - 2 L. Dorize, *Le Climat, objet de curiosité et de polémiques*, Paris : Ellipses, (coll. L'Esprit des sciences), 2005, 128 p. ; F. Nebeker, *Calculating the Weather: Meteorology in the 20th Century*, San Diego : Academic Press, (coll. International Geophysics Series), 1995, 255 p.
 - 3 P. De Félice, *L'Histoire de la climatologie*, Paris : L'Harmattan, (coll. Biologie, Écologie, Agronomie), 2006, p. 48-52.

ordres de grandeur dans les phénomènes climatiques locaux. Ils ont permis de définir assez précisément l'ordre de grandeur des microclimats, c'est-à-dire l'échelle à laquelle ces phénomènes existent, les moyens pour les détecter, les mesurer ainsi que pour les transformer. La prise de conscience de l'existence des phénomènes microclimatiques et de l'utilisation possible de ces phénomènes a permis de poser les premières bases des méthodes de conception à partir du climat et, plus tard, de la conception bioclimatique.

I.1.1. Rudolf Geiger et le climat près du sol

I.1.1.1. Une climatologie à proximité du sol

Avant l'apparition de la microclimatologie, la compréhension intuitive des phénomènes microclimatiques a fait partie du développement des pratiques agricoles, et la modification consciente des microclimats par l'aménagement (brise-vent, protections solaires...) est vraisemblablement aussi ancienne que l'agriculture elle-même¹. Les plantations de forêts brise-vent au XVII^e et au XVIII^e siècle sont bien documentées, notamment au Japon mais aussi en Europe². Au XVII^e siècle, des observations purement qualitatives mettent en évidence la différence entre le climat local des villes et le climat de la campagne environnante³. Elles seront confirmées au XIX^e siècle avec la multiplication et la systématisation des mesures de température et grâce à l'amélioration des instruments⁴. Bien que « la recherche sur le climat dans les petites régions commence avant que les instruments ne soient utilisés pour les observations météorologiques⁵ », comme l'affirme le climatologue japonais Masatoshi Yoshino, c'est véritablement entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle que les recherches sur les microclimats et les phénomènes microclimatiques sont systématisées.

On peut situer assez précisément dans le temps l'émergence de l'étude spécifique des microclimats et plus particulièrement l'étude des climats dits près du sol : les premiers travaux sur le sujet remonteraient au moins à 1911, date à laquelle le botaniste allemand Gregor Kraus

1 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. Milieu et technique*, [1^{ère} éd. 1945], Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1973, p. 128 ; P. De Félise, *L'Histoire de la climatologie, op. cit.*, p. 49.

2 M. M. Yoshino, *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*, Tokyo : University of Tokyo Press, 1975, p. 21-22.

3 *Ibid.*, p. 16.

4 *Ibid.*, p. 22-23.

5 *Ibid.*, p. 15. Traduction personnelle, citation originale : « The history of research on climate in smaller regions begins before instruments were used for meteorological observations. »

publie un opuscule intitulé « *Sol et climat dans un espace infiniment petit*¹ ». Mais ce sont les travaux du climatologue allemand Rudolf Geiger (1894-1981), considéré comme « le père de la microclimatologie² » et la publication de son ouvrage en allemand *Das Klima der bodennahen Luftschicht* en 1927 qui marque la naissance de l'étude scientifique des microclimats³. Geiger, qui a été professeur de météorologie à l'Université de Munich et directeur de différents instituts de recherche en météorologie, est notamment connu pour avoir collaboré avec Wladimir P. Köppen sur sa célèbre classification des climats. Son ouvrage de 1927 est issu de sa thèse d'habilitation ; son titre pourrait littéralement être traduit par *Le Climat près du sol*, pour reprendre le titre de la traduction anglaise de 1950⁴. L'ouvrage marque par son ampleur et la synthèse qu'il propose d'un ensemble d'études menées sur les températures, les mouvements de l'air ainsi que l'humidité près du sol dans différentes stations, par de nombreux météorologues et climatologues de par le monde. Certaines expériences ont également été réalisées par Geiger lui-même. La plupart de ces études ont été faites dans des contextes agroforestiers, dans le but de prévenir le gel des plantations.

Le nom de Rudolf Geiger est à peine évoqué dans les quelques travaux d'historiens contemporains qui portent sur la naissance de la climatologie appliquée à l'habitat, alors qu'un rapide examen des ouvrages de l'époque sur le sujet montre d'abondantes références à ses travaux, comme nous le verrons par la suite. Bien que ce soit l'édition anglaise de 1950 qui ait véritablement fait connaître les travaux et les concepts de Geiger, celle de 1927 n'est pourtant pas passée inaperçue, jusqu'en France où son ouvrage est mentionné par des météorologues importants⁵. Il est également mentionné en 1947 par l'architecte et historien de l'architecture James Marston Fitch (1909-2000) dans son livre *American Buildings: The Forces That Shape It* sur lequel nous reviendrons⁶. Il est remarquable de voir que Fitch a lu Geiger en allemand et qu'il en tire de nombreux enseignements, comme en ce qui concerne l'action de la végétation sur la régulation des températures et de la vitesse du vent :

-
- 1 R. Geiger, « Microclimatologie », in : *La Météorologie. Revue de météorologie et de physique du globe*, Tome X, Paris : Société météorologique de France, 1934, p. 86. Le titre original en allemand est : « Boden und Klima auf kleinstem Raum »
 - 2 P. De Félice, *L'Histoire de la climatologie*, op. cit., p. 49-50.
 - 3 R. Geiger, *Das Klima der bodennahen Luftschicht*, Braunschweig : F. Vieweg & Sohn, 1927, 246 p.
 - 4 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit.
 - 5 Ch. Maurain, *La Météorologie et ses applications*, Paris : Flammarion (coll. Bibliothèque de Philosophie Scientifique), 1950, p. 227.
 - 6 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, Cambridge : The Riverside Press, 1947, p. 294.

« En général, les arbres ont un effet stabilisateur sur leur environnement immédiat, réduisant ainsi tous les extrêmes environnementaux. Rudolph Geiger (*sic*), dans son excellente étude du micro-climat, a découvert qu'une forêt mixte d'épicéas, de chênes et de peupliers réduit soixante-neuf pour cent de la chaleur solaire du sol. Il a découvert que les forêts sont plus fraîches en été et plus chaudes en hiver que les terrains dégagés, et qu'une ceinture d'arbres réduirait la vitesse du vent jusqu'à soixante-trois pour cent¹. »

L'importance des travaux de Geiger pour Fitch est qu'ils mettent en évidence à travers des mesures quantitatives et systématiques certains phénomènes microclimatiques qui pouvaient être intuitivement connus par le passé, comme l'effet brise-vent d'une masse de végétaux, mais aussi d'autres phénomènes microclimatiques qui restaient généralement méconnus ou ignorés.

Malgré l'intérêt précoce pour ces travaux, il semblerait que ce soit l'édition anglaise de l'ouvrage de Geiger publiée en 1950, et issue de la seconde édition allemande publiée en 1942, qui ait vraiment fait connaître ses recherches sur le climat près du sol². Dans la nouvelle édition allemande de 1942, qui complète celle de 1927, Geiger ajoute le sous-titre : *Handbuch der Mikroklimatologie* (*Manuel de microclimatologie*). Ce sous-titre, qui traduit l'ambition de l'ouvrage, n'est pourtant pas repris dans la traduction anglaise de 1950. Cette traduction aura un certain écho dès le milieu des années 1960 en France : le géographe Jean Loup rédige un compte-rendu de cet ouvrage qu'il présente comme « un excellent traité sur les micro-climats³ » dont la lecture est « une révélation de ces phénomènes⁴ » microclimatiques. Les études de Geiger sur la température du sol sont aussi mentionnées dans les travaux en pédologie de l'époque⁵. En 1971, *The Climate Near the Ground* est considéré comme « le texte définitif sur la microclimatologie⁶ » par l'architecte américain Lloyd Kahn et l'ingénieur Steve Baer, et en 1978 il est encore présenté comme « la référence la plus complète sur le sujet de la

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « In general, trees have a stabilizing effect upon their immediate surroundings, reducing all environmental extremes. Rudolph Geiger, in his excellent study of the micro-climate, found that a mixed forest of spruce, oak, and poplar cuts off sixty-nine per cent of the sun's heat from the ground. He found that forests are cooler in summer, warmer in winter than clear land; and that a belt of trees would reduce wind velocities by as much as sixty-three per cent. »

2 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, *op. cit.*

3 J. Loup, « Rudolf Geiger - The Climate near the Ground. », *Revue de géographie alpine*, tome 53, n°4, 1965, p. 701-702.

4 *Ibid.*

5 G. Aubert, J. Boulaine, *La Pédologie*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1967, p. 31.

6 S. Brand (éd.), *The Last Whole Earth Catalog. Access to tools*, New York : Random House, 1971, p. 83. Traduction personnelle, citation originale : « the definitive text on microclimatology ».

microclimatologie dans les deux premiers mètres de la couche atmosphérique¹ » en France. Il peut être considéré comme le premier traité consacré exclusivement à l'étude des microclimats et reste toujours un ouvrage de référence aujourd'hui grâce à de nombreuses rééditions et mises à jour posthumes².

I.1.1.2. La définition de l'ordre de grandeur des microclimats

Dès l'introduction de *The Climate Near the Ground*, Geiger pose les limites de son étude des microclimats qui se concentre sur les phénomènes situés à une échelle fixée : le voisinage du sol. Il expose les insuffisances des appareils de mesures météorologiques traditionnels, conventionnellement situés sous un abri à environ deux mètres du sol afin de les protéger de l'influence de la « couche d'air adjacente au sol³ » qui est considérée comme « une zone de perturbation à éviter⁴. » Pour être considérées comme valides, les mesures météorologiques sont construites par abstraction des phénomènes provoqués par la morphologie et la nature du sol : elles sont issues d'un réseau d'appareils normalisés permettant d'obtenir « une image unifiée⁵ » du climat à l'échelle régionale ou nationale, échelle que Geiger nomme « macroclimat⁶ » pour la différencier de l'échelle microclimatique qu'il souhaite étudier. Le terme de « macroclimat », qui désigne le climat aux échelles les plus élevées, correspond à la définition la plus conventionnelle du climat comme « ensemble des éléments météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère au-dessus d'un lieu⁷ » ou plus simplement, la succession des conditions météorologiques au-dessus d'une zone géographique. Un « macroclimat » est une abstraction, issue de nombreuses données collectées selon un certain standard par plusieurs stations, pour définir le climat d'une région (climat méditerranéen) ou d'une aire géographique importante (climat continental), ainsi que la succession de ses états.

1 H. Pénicaud, *Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments*, Paris : Plan Construction/R.A.U.C., 1978, n. p. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

2 R. Geiger, R. H. Aron, P. Todhunter, *The Climate Near the Ground*, [7ème édition], Lanham : Rowman & Littlefield, 2009, 642 p.

3 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, *op. cit.*, p. XVII.

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The air layer adjacent to the ground was a zone of disturbance which should be avoided. »

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, Paris : Armand Colin, 1943, p. 13. Cette définition classique est issue de J. Hann, *Handbuch der Klimatologie* (1911).

Pour Geiger, la connaissance d'un « macroclimat » n'est cependant pas en mesure de fournir des renseignements précis qui dépendent de phénomènes près du sol, comme les périodes de gelée affectant les plantations forestières ou la vigne, qui caractérisent un microclimat. Ces exemples agricoles, utilisés par Geiger, traduisent le fait que la compréhension des phénomènes microclimatiques est avant tout engagée dans une perspective pratique : la prévention des pertes agricoles et agroforestières. Ce sont ces problèmes pratiques qui incitent Geiger à examiner les phénomènes microclimatiques et près du sol, dont il donne la définition suivante :

« Par l'expression "près du sol", nous entendons dans ce livre tout ce qui n'est pas à plus de deux mètres de la surface de la Terre. Par "couche d'air au sol", nous entendons donc les deux mètres les plus bas de l'atmosphère. Cette distance sert temporairement à donner au lecteur une idée des grandeurs impliquées¹. »

Cette limite imposée à l'étude des phénomènes situés à deux mètres du sol est précisément la mise en place d'un ordre de grandeur microclimatique faisant intervenir des variables propres à cette échelle, comme la friction du sol, sa texture ou sa conductibilité thermique. Nous reprenons la notion « d'ordre de grandeur » aux travaux en épistémologie historique de Gaston Bachelard, pour qui un ordre de grandeur désigne « une première connaissance approchée qui isole les phénomènes² » et qui prend « soin à se référer à elle-même, aux conditions de son exercice, aux actes réels et tangibles qu'elle exprime³. ». Pour Bachelard, à chaque échelle d'un phénomène correspond un ordre de grandeur, indissociable des méthodes de mesure qui ont permis de le spécifier. Selon Geiger, l'étude des phénomènes climatiques près du sol permet de mettre en évidence qu'à cette échelle un climat est inhomogène et considérablement affecté par les surfaces adjacentes. Il écrit :

« Alors que dans la couche d'air supérieure les conditions contrastées qui se produisent sont immédiatement égalisées, dans la couche d'air près du sol elles peuvent continuer à exister

-
- 1 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. XVIII. Traduction personnelle, citation originale : « By the expression "near the ground," we mean in this book, all that is not more than 2 meters from the earth's surface. By the "ground air layer" therefore, we mean the lowest 2 meters of the atmosphere. This distance serves temporarily to give the reader some idea of the magnitudes involved. »
 - 2 G. Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, Paris : Vrin, 1927, p. 78.
 - 3 *Ibid.*, p. 82. Cette notion « d'ordre de grandeur » a été reprise par d'autres philosophes comme Gilbert Simondon et Pierre Teilhard de Chardin.

presque côte à côte, car chaque mouvement convectif qui est initié est lié par le frottement à la surface. Les contrastes horizontaux sont ajoutés à la verticale. Il peut en résulter, dans les plus courtes distances, de grandes différences climatiques en raison du type de sol, de sa forme, des plantes qui y poussent, de l'ombrage variable ou de l'ensoleillement, de la protection contre le vent différente et de nombreuses autres circonstances¹. »

Les phénomènes qui caractérisent l'ordre de grandeur microclimatique et près du sol produisent une variété de microclimats. Le principal facteur est bien entendu le rayonnement solaire, dont le sol ne reçoit qu'une part directe et diffuse de la « constante solaire² » qui est essentiellement filtrée par l'atmosphère³. Toute la première partie de l'ouvrage de Geiger est ainsi consacrée à l'étude de cette couche d'air près du sol, la seconde partie étant concentrée sur l'étude de phénomènes microclimatiques correspondant à une échelle plus grande. Bien que le terme de « microclimat » soit polysémique et renvoie à différentes échelles, sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir, il désigne pour Geiger tous les phénomènes qui ne relèvent pas du « macroclimat⁴ ». Cette première distinction entre « macroclimat » et « microclimat », déjà reprise par Fitch en 1947⁵, sera utilisée par la suite : Victor Olgyay l'utilise en 1963 dans le premier ouvrage introduisant véritablement la conception bioclimatique⁶.

I.1.1.3. L'importance des surfaces et des échanges radiatifs qu'elles occasionnent

L'apport décisif de Geiger pour l'étude des microclimats, et indirectement pour la conception à partir du climat, concerne l'analyse approfondie des effets du rayonnement solaire sur le sol, et plus précisément l'étude des échanges radiatifs entre l'atmosphère et la surface du sol : ce phénomène est parfaitement synthétisé dans le premier diagramme de l'ouvrage intitulé

-
- 1 *Ibid.*, p. XVIII-XIX. Traduction personnelle, citation originale : « While, in the upper air contrasting conditions which occur are immediately equalized, in the air near the ground they may continue to exist almost side by side, for every convective movement which is initiated is tied up by friction on the surface. Horizontal contrasts are added to vertical. Great climatic differences can result within the shortest distances by reason of the kind of soil, its form, the plants growing thereon, variable shading or sunniness, different wind protection, and many other circumstances. »
 - 2 La constante solaire est une valeur qui fixe la quantité d'énergie issue du rayonnement solaire reçu à la normale d'une surface et en dehors de l'atmosphère. Geiger la fixe à 2 cal/cm²/min.
 - 3 *Ibid.*, p. 2.
 - 4 *Ibid.*, p. XIX.
 - 5 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 294.
 - 6 V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 44.

« Échange de chaleur à midi pour une journée d'été¹ » (*figure 1*). Ce diagramme montre une interaction : à partir du flux solaire, dont une importante partie est réfléchi par l'atmosphère, il exprime l'effet des surfaces sur la distribution de l'énergie solaire incidente, qui constitue le phénomène microclimatique principal, dont résulte d'autres effets microclimatiques (circulation de l'air, humidité des surfaces...). Il montre que le contact de ce flux solaire avec le sol entraîne certaines transformations visant à équilibrer le bilan énergétique au sol : ces transformations du rayonnement solaire en fonction des surfaces exposées constituent le phénomène central à cet ordre de grandeur, à l'origine de l'inhomogénéité des climats près du sol. Comme il l'écrit : « [les] conditions de température de la couche près du sol sont déterminées par l'immense quantité de chaleur que la surface du sol absorbe. En été, cette surface est chauffée dans notre région jusqu'à 60 °C, parfois jusqu'à 70° et 80°². » En abordant le rayonnement solaire par les effets microclimatiques qu'il produit, Geiger prolonge indirectement les recherches en actinométrie menées dès la fin du XIX^e siècle. Cette discipline est fondée sur la mesure de l'intensité du rayonnement solaire grâce aux actinomètres mis au point entre la fin du XVIII^e et le début XIX^e siècle. Elle est alors définie comme la « branche de la Météorologie qui a pour objet la mesure de la force du Soleil par l'un des effets quelconques qu'il produit³ », et ce sont précisément ces « effets » que la microclimatologie se propose de mesurer et d'expliquer.

Le diagramme de Geiger sur les échanges thermiques au niveau du sol est particulièrement important et circulera très largement aux États-Unis, ainsi qu'en Europe dans différentes publications relatives à la conception à partir du climat. Il sera d'abord repris en 1953 dans l'ouvrage *Climate & Architecture* par Jeffrey Ellis Aronin⁴, en 1963 par Victor Olgyay dans *Design with Climate*⁵ (*figure 2*) et dans d'autres ouvrages⁶. En France, il sera redessiné et traduit en 1977, dans un numéro spécial de la revue *L'Affranchi* sur le thème

1 *Ibid.*, p. 3. (Traduction personnelle). Titre original : « Heat exchange at noon for a summer day. »

2 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 6. Traduction personnelle, citation originale : « The temperature conditions of the layer near the ground are determined by the immense amount of heat which the surface of the ground absorbs. In summer, this surface is heated in our region up to 60 °C, sometimes to 70° and 80° »

3 R. Radau, *Actinométrie*, Paris : Gauthier-Villars, 1877, p. 6-7 ; V. Fernandez, « De l'épure géométrique au brise-soleil », p. 146-149 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, Paris : Hermann, (coll. InterSciences), 2015.

4 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, New York : Reinhold Publishing Corporation, (coll. Progressive Architecture Book), 1953, p. 29.

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 33.

6 A. Konya, *Design Primer for Hot Climates*, Londres : The Architectural Press, 1980, p. 10.

« Énergie solaire et habitat¹ », sans pourtant faire mention des travaux de Geiger (*figure 3*) et il sera également reproduit dans une publication intitulée *Connaissances fondamentales de climatologie en urbanisme et en architecture* en 1980². La circulation de ce diagramme témoigne de la puissance de synthèse de cette image, mais plus profondément il semble que l'importance des échanges radiatifs au sol pour la compréhension des phénomènes microclimatiques ait profondément marqué certains architectes et ingénieurs. Ces différentes publications relatives à l'architecture présentent une continuité directe avec les recherches de Geiger et l'importance des phénomènes radiatifs est mentionnée dans de très nombreuses autres publications consacrées aux relations entre architecture et climat.

Ce diagramme est l'occasion pour Geiger de rappeler les phénomènes de transfert thermique à la surface du sol à partir de la source incidente qu'est le soleil³. Il permet d'illustrer qu'une surface exposée au rayonnement solaire direct est, en théorie, continuellement le siège de phénomènes d'échanges par rayonnement (flux électromagnétique), conduction (propagation d'une agitation thermique dans un milieu), convection (mouvements au sein d'un fluide ou entre une surface et un fluide) et éventuellement changement de phase (évaporation et condensation), en vue d'atteindre l'équilibre thermique. Ces quatre phénomènes de transfert thermique indissociables, qu'on retrouve en calorimétrie classique ainsi qu'en thermodynamique, constituent une base nécessaire à la compréhension des échanges thermiques. Ils seront systématiquement présentés dans l'introduction des manuels bioclimatiques ou relatifs à la conception à partir du climat.

Pour Geiger, ces phénomènes physiques permettent de comprendre ce qu'il nomme « l'économie de la chaleur⁴ » au sol, et par extension à la surface de la Terre. À cause de ces différents phénomènes, et de l'alternance diurne et nocturne, c'est au niveau de la surface d'air au contact du sol qu'on trouve les variations de température les plus importantes. Comme il l'explique, l'une « des particularités du microclimat est qu'il devient plus extrême à mesure que l'on s'approche du sol⁵. » Geiger reprend de nombreux graphiques, issus de travaux d'autres météorologues ou climatologues, pour illustrer ce point⁶. À la station de Schleissheim par

1 P. Le Chapellier (dir.), *L'Affranchi*, « Énergie solaire et habitat », n°59, 1977, p. 17.

2 B. Frommes (dir.), *Connaissances fondamentales de climatologie en urbanisme et en architecture*, Luxembourg : FIHUAT, 1980, p. 41. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 *Ibid.*, p. 26.

4 *Ibid.*, p. 131.

5 *Ibid.*, p. 75. Traduction personnelle, citation originale : « One of the particular characteristics of the microclimate is that it becomes more extreme the closer we approach the ground. »

6 *Ibid.* p. 31-32.

exemple, près de Munich, Geiger a ainsi mesuré de mai à septembre une température moyenne à 5 cm du sol de 19,5 °C, alors qu'à 50 cm du sol cette moyenne n'est plus que de 15,4 °C et de 14,3 °C à 1 m 50. Ces effets au voisinage du sol illustrent l'importance de la couleur et de la nature des surfaces exposées au rayonnement solaire pour la production d'un microclimat spécifique. Ces paramètres sont généralement définis par l'albédo des surfaces¹. Le sol, à l'état naturel, produit un type de microclimat spécifique qui dépend notamment de son exposition au rayonnement solaire, de ses caractéristiques thermiques, de la couleur de sa surface et de son humidité : exposée aux mêmes facteurs climatiques, une pelouse sera toujours plus humide et plus fraîche qu'un sol composé de dalles de béton². Geiger explique que la nature du sol, et notamment sa conductibilité thermique, qui dépend grandement de son humidité si celui-ci est poreux, est déterminante :

« Pour le microclimat près du sol, le sol lui-même agit comme un réservoir de chaleur régulant. [...] Plus la conductivité thermique du sol est élevée, plus son rôle de réservoir de chaleur est efficace. Les microclimats sur des sols de bonne conductivité montrent par conséquent une évolution régulière de la température. En revanche, les microclimats sur un sol peu conducteur sont extrêmement froids la nuit, trop chauds le jour. Une modification artificielle de la diffusivité thermique du sol modifie donc également le microclimat près du sol³. »

Cette caractéristique du sol d'agir comme un réservoir thermique en fonction de ses qualités détermine son inertie thermique. Dans cet extrait, Geiger mentionne que la transformation des surfaces exposées provoque une modification du microclimat. Ces transformations peuvent être problématiques, dans la mesure où l'aménagement peut devenir une source potentielle d'inconfort thermique, bien qu'il n'évoque que très brièvement ces problèmes d'inconfort⁴.

1 *Ibid.*, p. 129.

2 *Ibid.*, p. 179.

3 *Ibid.*, p. 35. Traduction personnelle, citation originale : « For the microclimate near the ground, the ground itself acts as a regulating reservoir of heat. [...] The greater the thermal conductivity of the ground, the more effective is its role as a heat reservoir. Microclimates over soils of good conductivity consequently show a smooth march of temperature. On the other hand, microclimates over a poorly conducting soil are extreme too cold by night, too hot by day. An artificial modification of the soil's heat diffusivity therefore modifies the microclimate near the ground as well. »

4 *Ibid.*, p. 375.

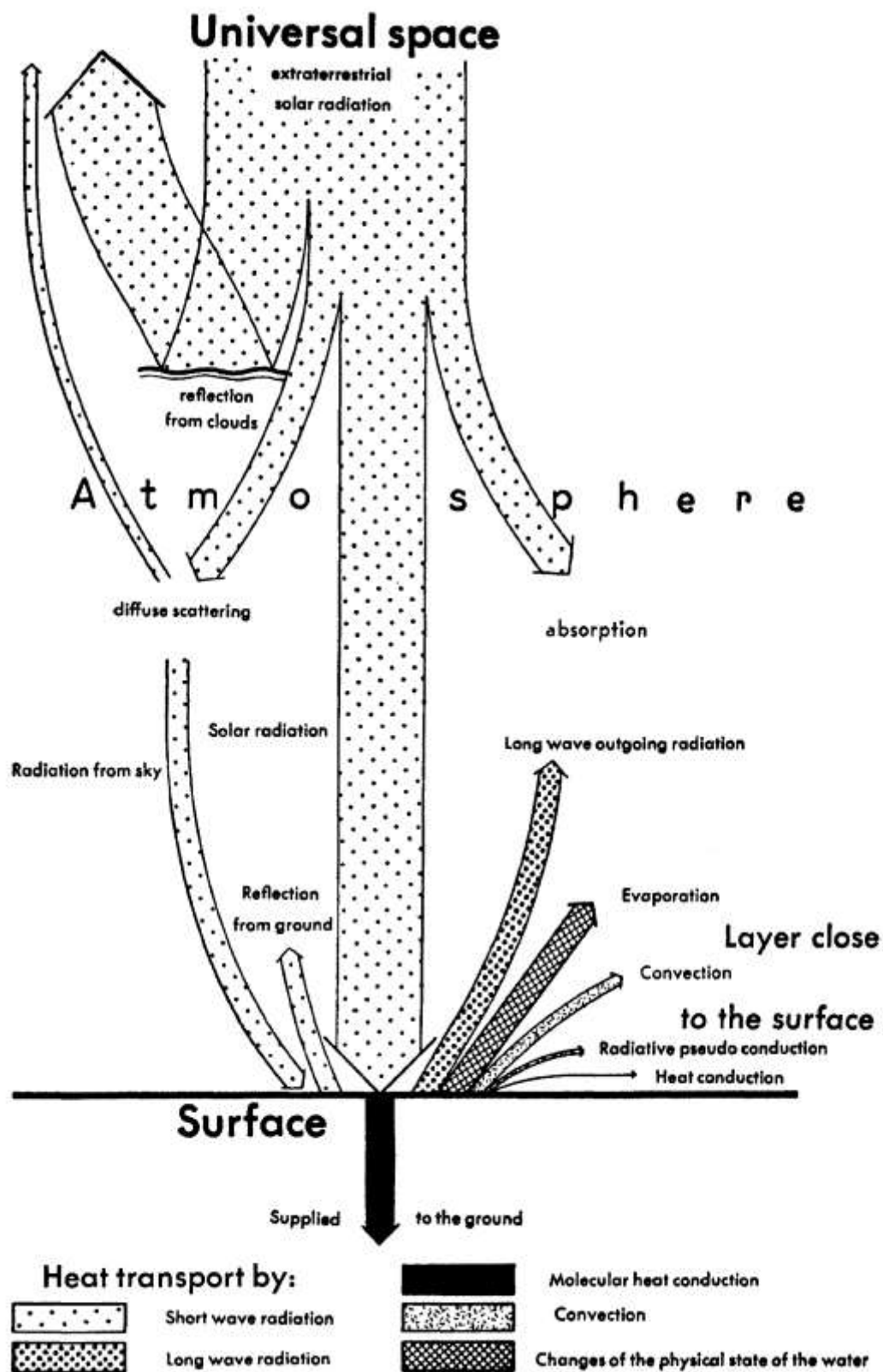


Figure 1 : *Échange de chaleur à midi pour une journée d'été.*
 (R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, Cambridge : Harvard University Press,
 trad. de l'allemand par M. N. Stewart *et. al.*, 1950, p. 3)

RADIANT HEAT TRANSFER

It is customary to divide radiant heat transfer affecting buildings into five main channels. In order of importance they are:

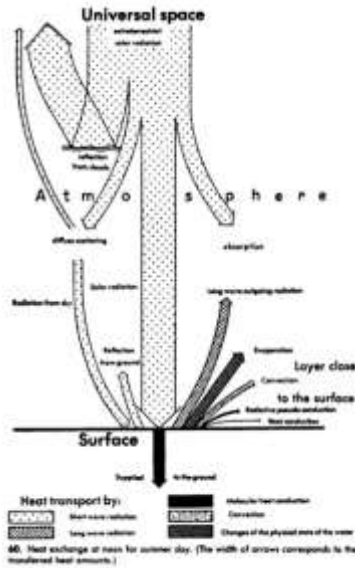
1. direct short-wave radiation from the sun;
2. diffuse short-wave radiation from the sky (suff.);
3. short-wave radiation reflected from the surrounding terrain;
4. long-wave radiation from the heated ground and nearby objects;
5. outgoing long-wave radiation exchange from building to sky.

The effect of mean radiant temperatures which affect closed spaces is discussed on page 36.

Radiation reflected from surrounding terrain (3). Roughly twice as much solar energy falls on a horizontal surface during overcast times as on a vertical surface; so that surrounding horizontal surfaces reflect a good amount of heat onto buildings. This heat flux can constitute a considerable load; the amount depends on the exposure and reflectivity of the immediate terrain. The table indicates the reflectivity percentage of various surfaces.¹

PERCENTAGE OF INCIDENT SOLAR RADIATION REFLECTED

NATURE OF SURFACE	PERCENTAGE % REFLECTED
Blank ground, dry	10-20
Blank ground, wet	8-9
Blank, dry	18-20
Blank, wet	15-18
Blank, black, dry	14
Blank, black, wet	8
Blank	10-15
Blank, grass	20
Green fields	15-20
Green, forest	12-15
Dark forest	5
Dark	14-20
Dark, dry	10
Black, depending on color	10-40
Asphalt	15
City area	10



33

Figure 2 : Reproduction du diagramme de Geiger en 1963.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 33)

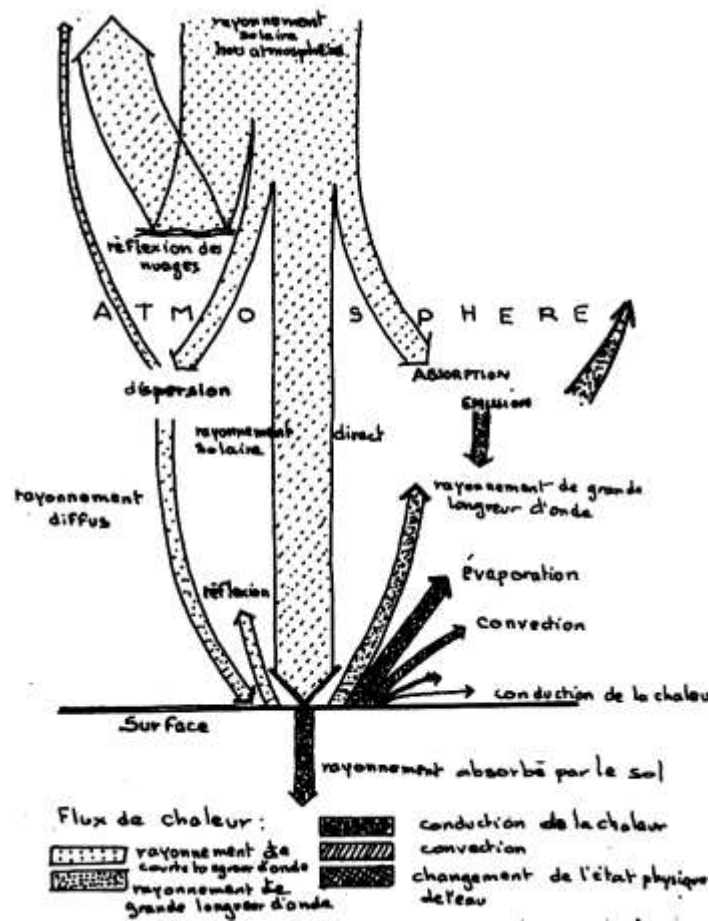


Figure 3 : Traduction en français du diagramme de Geiger.
(P. Le Chapellier (dir.), *L'Affranchi*, « Énergie solaire et habitat », *L'Affranchi*, n°59, 1977, p. 17)

L'attention à la couleur et à la nature des surfaces exposées au rayonnement solaire évoquée par Geiger est un trait constant des travaux ultérieurs sur l'architecture bioclimatique et solaire passive. Dans *Direct Use of the Sun's Energy* (*L'Usage direct de l'énergie solaire*), manuel particulièrement célèbre sur l'utilisation de l'énergie solaire publié en 1964 et qui fut une source importante des premiers architectes bioclimatiques, le chimiste Farrington Daniels (1889-1972) évoque l'importance des phénomènes d'absorption du rayonnement solaire par différents types de sols et conseille de les étudier très précisément¹. Sans faire référence aux travaux de Geiger, Daniels mentionne des situations où la couleur et la nature du sol ont des répercussions directes et importantes sur le microclimat, et indirectement sur la vie végétale qui s'y développe. Il prend l'exemple d'une culture de tabac située dans une région semi-aride qui aurait été menacée par la sécheresse, après que les pierres calcaires claires recouvrant le sol aient été retirées. Ce changement dans la couverture du sol aurait fait baisser son humidité, la remise en place des pierres calcaires ayant permis de retrouver une humidité satisfaisante². Il prend également l'exemple des cultures de tomates situées sur l'île de Santorin, dont le sol composé de cendres volcaniques a la propriété de se refroidir rapidement par rayonnement de grande longueur d'onde durant la nuit et permet de condenser l'humidité de l'air marin : ce phénomène alimente les plants de tomate en eau, sans que ceux-ci soient irrigués³. Ces exemples utilisés par Daniels illustrent des préoccupations analogues à celles de Geiger et servent à expliquer comment la nature des surfaces exposées au rayonnement solaire affecte le microclimat, en modifiant dans ce cas les conditions hygrothermiques du sol. Le fait que ces phénomènes soient mentionnés dans l'ouvrage d'un ingénieur consacré à l'usage direct de l'énergie solaire témoigne du caractère transversal de cette problématique des effets microclimatiques des surfaces et de l'importance de leur prise en compte.

Geiger souligne aussi que les gradients de température observés près du sol animent l'air de mouvements de convection qui permettent de l'étudier non plus comme une couche stratifiée, mais comme une masse d'air en mouvement, permettant d'intégrer la topographie dans l'étude des microclimats. Cependant, les effets de la topographie nécessitent de changer l'ordre de grandeur des phénomènes microclimatiques initialement fixé à deux mètres au-dessus du sol. Ce changement permet d'intégrer « des microclimats d'un nouvel ordre de

1 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, New Haven/Londres : Yale University Press, 1964, p. 193.

2 *Ibid.*, p. 192-193.

3 *Ibid.*, p. 192.

grandeur¹ » afin de prendre en compte la topographie, mais aussi la végétation ou l'aménagement à une plus grande échelle. Toute la seconde partie de *The Climate Near the Ground* est consacrée à l'étude de cet autre ordre de grandeur. Ce changement permet d'intégrer certaines analogies pour schématiser les mouvements de l'air en fonction de la topographie, de la friction des surfaces et des différences de températures entre couches d'air près du sol. En agriculture, Geiger rappelle que l'écoulement des couches d'air froid, plus denses que celles d'air chaud, est particulièrement important durant les périodes nocturnes où l'humidité est faible et permet au sol de se refroidir rapidement : le moindre obstacle en amont d'une pente bloque cet écoulement et retient l'air qui forme alors ce qu'il nomme un « lac froid² », à l'origine de gelées. L'étude de l'écoulement des masses d'air froid à l'échelle des microclimats sera l'objet de nombreuses considérations appliquées à l'architecture par la suite, notamment dans les travaux du météorologue Helmut Landsberg. Les études synthétisées par Geiger sur l'écoulement de l'air en fonction des différences de températures et de la topographie, notamment dans les vallées³ (figure 4), vont particulièrement intéresser les premiers architectes associés à la conception bioclimatique qui vont en tirer des prescriptions importantes sur les choix d'implantation dans les sites vallonnés.

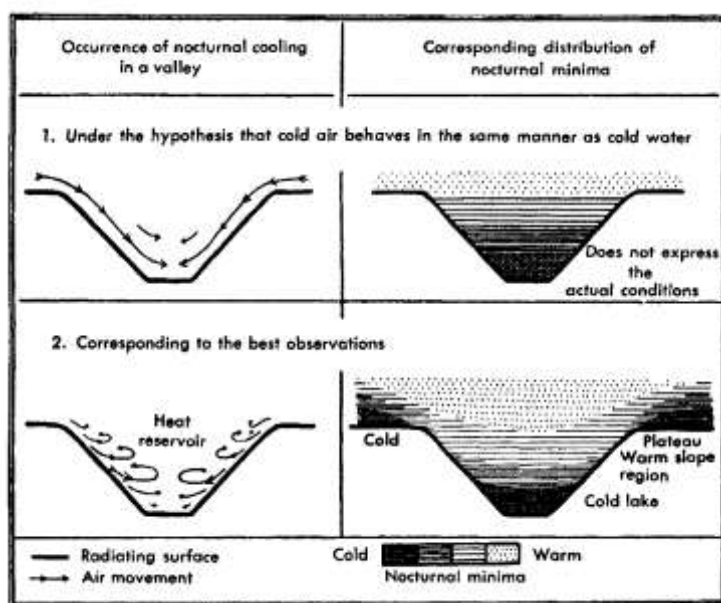


Figure 4 : Représentation schématique de la distribution des températures en fonction des pentes.

(R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, Cambridge : Harvard University Press, trad. de l'allemand par M. N. Stewart *et. al.*, 1950, p. 206)

-
- 1 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, *op. cit.*, p. 192. Traduction personnelle, citation originale : « We come therefore to microclimates of a new order of magnitude ».
 - 2 *Ibid.*, p. 195.
 - 3 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, *op. cit.*, p. 206.

À cette échelle qui inclut la topographie, la prise en compte de l'exposition au rayonnement solaire des versants est également indispensable pour suivre le mouvement des masses d'air en journée, d'autant plus que l'exposition variable des versants modifie considérablement le climat près du sol. Pour étudier ce phénomène, Geiger considère cinq paramètres que sont « l'heure de la journée, la saison, le degré de nébulosité, la direction de la pente et l'angle de la pente¹. » En prenant en compte ces paramètres et les variations d'exposition à l'ensoleillement qu'ils occasionnent, Geiger affirme ainsi retrouver le sens initial du terme « climat », terme qui possédait, selon lui, une importante connotation pratique. Il écrit à ce propos :

« L'ensoleillement différentiel a un tel effet sur le climat que c'est ce sens que les Grecs de l'Antiquité attribuaient au "climat". Car le climat est bien sûr dérivé de κλινειν, incliner. Le climat de *versant*, ou le climat d'*exposition*, n'était pour eux que *le* climat. Aujourd'hui comme à l'époque, il revêt la plus grande importance pratique pour de nombreuses questions d'agriculture, de sylviculture, de jardinage et d'autres professions techniques². »

Geiger propose donc une étude différentielle du climat, basée sur les contrastes d'humidité relative, de température, de rayonnement près du sol qui produisent une diversité microclimatique non négligeable et qu'il estime indispensable à considérer dans certains problèmes agricoles pratiques. La microclimatologie, comme science nouvelle, se constitue donc au contact de nombreux autres domaines de connaissances préexistants. C'est en ce sens que Geiger définit la microclimatologie comme « une science limite³ », dans la mesure où les problèmes qu'elle soulève « intéressent non seulement la météorologie et la climatologie, mais encore la zoologie, la botanique⁴ » ainsi que « l'écologie, la géographie, les sciences forestières, les sciences agricoles et jusqu'à la médecine⁵. ». L'action des haies et des forêts comme brise-vent pour la protection des cultures, problème typiquement agricole mais riche d'enseignement

1 *Ibid.*, p. 215. Traduction personnelle, citation originale : « the time of day, the season, the degree of cloudiness, the direction of slope, and the angle of slope. »

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Differential sunning has such a great effect on climate that it was this meaning that the ancient Greeks attributed to the "climate." For climate is of course derived from κλινειν, to slope. *Side-hill* climate, or *exposure* climate was to them merely *the* climate. Today, as then, it has the greatest practical significance for many questions of agriculture, forestry, gardening and other technical occupations. »

3 R. Geiger, « Microclimatologie », in : *La Météorologie, op. cit.*, p. 86.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

pour l'aménagement, est ainsi intégrée à la microclimatologie¹. Geiger rappelle les conséquences dramatiques qui ont été causées par une négligence des phénomènes microclimatiques. Il évoque ainsi un épisode tragique de décembre 1930 où les conditions météorologiques dans la vallée de la Meuse ont favorisé un brouillard persistant, qui a anormalement enrichi la concentration de résidus toxiques des fumées produites par les usines locales, notamment du dioxyde de soufre, entraînant la mort de soixante personnes et des centaines de maladies respiratoires².

The Climate Near the Ground peut être considéré comme la première synthèse des connaissances relatives aux microclimats et aux phénomènes microclimatiques. Il forme une première introduction à cette nouvelle science que serait la microclimatologie. Dès 1927, Geiger pose les bases scientifiques de l'étude des microclimats, nécessairement corrélée aux problèmes pratiques susceptibles d'être résolus par une meilleure connaissance des phénomènes à cet ordre de grandeur. Les études regroupées dans cet ouvrage concernent cependant presque exclusivement les milieux naturels, cultivés ou faiblement aménagés, et l'importance de l'action technique dans la transformation voire la production d'un nouveau microclimat n'est que rapidement évoquée. Afin de clarifier l'apport de Geiger aux méthodes de conception en architecture par la suite, il importe de développer précisément la place de l'aménagement, et plus généralement de la transformation des microclimats par l'action technique, qui permet d'expliquer la genèse des méthodes de conception à partir du climat, forme primitive de la conception bioclimatique.

I.1.2. Microclimats aménagés et rôle de la climatologie appliquée

I.1.2.1. L'étude des microclimats aménagés et l'héritage de Geiger

Geiger n'est pas indifférent au rôle des architectes et des urbanistes dans la modification et la production de microclimats. Dans *The Climate Near the Ground*, il affirme qu'une prise de conscience des microclimats et de leur modification est nécessaire. Il observe qu'avec « la civilisation grandissante, l'homme perd cette sensibilité au microclimat³ », mais que la

1 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 393-395.

2 *Ibid.*, p. 201, voir également : A. Zimmer, *Brouillards toxiques. Vallée de la Meuse, 1930, contre-enquête*, Bruxelles : Zones Sensibles, 2016, 270 p.

3 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 375.

microclimatologie réintroduit une « recherche rationnelle du meilleur microclimat¹ » qui compense cette perte de sensibilité. L'ouvrage de Geiger peut être interprété comme faisant partie de ce processus de développement scientifique qui vise à orienter plus rationnellement la recherche et la transformation de microclimats favorables. Le risque qu'il évoque est que cette perte de « sensibilité au microclimat² » entraîne une perte effective de la diversité microclimatique, comme dans le domaine agricole, où Geiger constate que « [le] climat près du sol est devenu un climat unifié³ », notamment par les effets de la standardisation des variétés cultivées. Il affirme néanmoins que l'aménagement est en mesure de produire et de recréer une diversité microclimatique, comme il l'écrit dans le passage suivant :

« [Le] travail de l'homme ne conduit pas toujours à la destruction du microclimat. Il établit également de nouveaux microclimats, notamment à travers ses activités de construction. Chaque logement nouvellement construit crée un certain nombre de climats distincts à partir de l'unique préexistant près du sol au-dessus du site de construction. Sur le mur sud, le microclimat sera si favorable que de bons fruits, peut-être même des raisins, pourront être cultivés. Ce gain se fait au détriment du côté nord, qui est sombre, froid, humide et brut. Les côtés est et ouest sont encore différents. Les climats des différentes pièces sont des modifications de ces quatre climats extérieurs. De plus, il y a le climat de la cave et le climat du grenier⁴. »

Dans cet extrait, Geiger met en évidence la différenciation des microclimats à l'extérieur et à l'intérieur d'une même construction. Mais cette constatation n'engage aucune considération pratique, ni aucune recommandation. À partir du constat qu'il établit, Geiger pourrait suggérer l'intérêt de la différenciation des façades et l'étude de chaque façade en fonction de l'exposition, mais il ne le fait pas. En ce qui concerne l'architecture, il en reste à des considérations générales et affirme que « l'architecte doit tirer le meilleur parti de l'emplacement qu'il a, en utilisant le

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « With increasing civilization man loses such sensitivity to the microclimate. Only at a later stage of development is there a conscious process of a rational search for the best microclimate »

2 *Ibid.*, p. 376

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The climate near the ground has become a unified climate. »

4 *Ibid.*, p. 377. Traduction personnelle, citation originale : « But the labor of man does not always lead to destruction of the microclimate. He also establishes new microclimates, especially through his building activities. Every newly built dwelling makes a number of separate climates out of the single one preexisting near the ground above the building site. On the south wall the microclimate will be so favorable that good fruit, perhaps even grapes, can be grown. This gain is at the expense of the north side, which is dark, cold, damp and raw. Still different are the east and west sides. The climates of the various rooms are modifications of these four outdoor climates. In addition there is the cellar climate and the attic climate. »

matériau de construction à portée de main et en utilisant au mieux le nombre, la forme et la disposition des fenêtres¹. »

Les références de Geiger à l'architecture s'arrêtent à ces quelques conseils. Bien qu'il aborde également le climat des villes dans *The Climate Near the Ground*², il ne développe pas non plus de considérations prescriptives en urbanisme. Les recherches de Geiger constituent néanmoins un support d'information scientifique particulièrement riche. Geiger est véritablement à l'origine d'une problématique qui a pour origine le constat qu'il existe une multitude de microclimats diversifiés, le plus souvent produits involontairement, dont les mécanismes physiques sont souvent délicats à observer et à mesurer. Ces microclimats résultent de phénomènes d'un certain ordre de grandeur, existants près du sol et issus de l'interaction entre des facteurs climatiques et des surfaces de différentes natures exposées à ces facteurs³. L'apport décisif de Geiger est essentiellement d'avoir mis en évidence ces phénomènes microclimatiques et d'avoir expliqué leurs mécanismes du point de vue de la climatologie : il a montré l'existence d'une tension entre des données climatiques générales et des phénomènes microclimatiques d'un ordre de grandeur inférieur qui, bien que très localisés, sont néanmoins indispensables à comprendre et à anticiper dans de nombreux domaines pratiques (agriculture, aménagement...). Il a montré que l'étude des microclimats était un domaine riche en enseignements et susceptible de transformer de nombreuses pratiques. Indirectement, le projet de Geiger sera prolongé dans les travaux théoriques relatifs à la conception bioclimatique et solaire passive par la suite, parfois sans que son nom ne soit mentionné.

I.1.2.2. Helmut Landsberg et la microclimatologie de l'aménagement

Mais la problématique soulevée par Geiger est en l'état incomplète dans la mesure où elle ne met pas suffisamment en évidence le rôle de l'architecture et plus généralement de l'aménagement dans la modification consciente d'un microclimat. On doit à un autre

1 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 389. Traduction personnelle, citation originale : « The skill of the architect must get the best out of the location he has, using the building material at hand, and utilizing the number, form and arrangement of windows to the best advantage. »

2 *Ibid.*, p. 379-385.

3 Nous reprenons à notre compte la distinction faite par Sorre entre « facteurs » et « éléments » d'un climat. Les « éléments » désignent les caractéristiques d'un climat et ils sont « susceptibles d'une expression numérique » ; tandis que les « facteurs » désignent les circonstances et les mécanismes qui agissent sur la variation des éléments, ainsi que leur combinaison. La quantité de rayonnement solaire, comme la pression atmosphérique, est à la fois un élément (une grandeur définissant type de climat ou de temps) et un facteur (mécanisme entraînant des variations). Voir M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, op. cit., p. 16.

climatologue l'introduction de cette problématique dans le champ opérationnel de l'aménagement : il s'agit d'Helmut E. Landsberg (1906-1985). Landsberg est un climatologue et météorologue d'origine allemande émigré aux États-Unis à qui l'on doit de nombreux travaux de recherche dans le domaine de la climatologie appliquée et de la microclimatologie dès la fin des années 1940. La décennie 1940-1950 est plus généralement marquée par le progrès de la météorologie, principalement pour des besoins militaires, sous l'impulsion de la Seconde Guerre mondiale¹. Landsberg est connu pour avoir développé pendant cette période le traitement statistique des données météorologiques². Parmi ses très nombreuses publications, son article de mars 1947 publié dans *The Architectural Forum*³, écrit en collaboration avec Fitch⁴, constitue sa contribution la plus importante à l'étude des microclimats.

Cet article, richement illustré, a été publié dans un magazine d'architecture très largement diffusé. Malgré sa faible longueur, il sera abondamment cité et repris par la suite. Dans cet article, l'héritage de Geiger est nettement perceptible puisque Landsberg définit un microclimat par sa proximité avec le sol et les surfaces avec lesquelles il est en contact. Il écrit :

« Nous vivons près du sol dans une fine pellicule perturbée de l'atmosphère qui est parsemée de différences microclimatiques. Les fluctuations les plus profondes de ce microclimat sont dues aux variations de la topographie locale, à la présence ou à l'absence de plans d'eau, aux zones de forêt et de parc, à la structure et à la couverture du sol. Dans une moindre mesure, le microclimat est influencé par les haies, les murs et les bâtiments⁵. »

-
- 1 Ch. Maurain, *La Météorologie et ses applications*, op. cit., p. 7 ; D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 160.
 - 2 En ce qui concerne la vie d'Helmut Landsberg on peut se référer à l'ouvrage : F. Baer, N. L. Canfield, J. M. Mitchell (dir.), *Climate in Human Perspective: A Tribute to Helmut E. Landsberg*, Dordrecht : Springer Science+Business Media, 1991.
 - 3 H. E. Landsberg, « Microclimatology », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 86(3), New York : Time, mars 1947, p. 114-119.
 - 4 Le statut de cet article est imprécis : l'historien de l'architecture Daniel Barber qui le mentionne, cite indifféremment Landsberg et Fitch comme auteurs de l'article. Cet article a été récemment republié comme ayant été écrit par Fitch « en consultation avec le météorologiste Helmut Landsberg », bien que l'ensemble des travaux de l'époque l'attribuent à Landsberg. Cette confusion entretient l'idée qu'il existerait deux articles au contenu identique : il y aurait, selon Barber, un article intitulé « Microclimatology » et écrit par Fitch en collaboration avec Landsberg en février 1947, et un article avec le même titre écrit par Landsberg en mars 1947. Or il n'y a pas deux, mais un seul et même article, qui semble avoir majoritairement été écrit par Landsberg lui-même, à la demande et en collaboration avec Fitch. Conformément aux travaux de l'époque, nous l'attribuons donc à Landsberg. Voir : D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 163, 169, 172 et J. M. Fitch, « Microclimatology », in : M. Sawin (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, New York/Londres : W.W. Norton & Company, 2006, p. 15, 222.
 - 5 H. E. Landsberg, « Microclimatology: facts for architects, realtors, and city planners on climatic conditions at the breathing line », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 86(3), New York : Time, mars 1947, p. 114. Traduction personnelle, citation originale : « We live close to the ground in a disturbed thin

La prise en compte du sol dans la définition du microclimat est directement issue de l'ouvrage *The Climate Near the Ground* et dans d'autres publications plus tardives Landsberg reprend également le terme de « macroclimat » issu de Geiger¹. Ils partagent une définition analogue de la microclimatologie, le « micro » faisant référence au « champ de la zone étudiée et non à la taille des différences². » Par rapport à Geiger, le ton de cet article est cependant nettement plus pédagogique, le but étant de mettre en évidence la diversité microclimatique par des considérations simples, car Landsberg affirme que si « tout le monde est en réalité conscient du climat général de sa localité, personne ne sait grand-chose du climat de sa propre cour³ ».

Les considérations de Landsberg sur la topographie sont analogues à celles de Geiger, il souligne cependant l'importance des plans d'eau et de leur taille dans la modification du microclimat. Il prend l'exemple des effets du lac Michigan sur la ville de Chicago, dont les brises fraîches permettraient de réduire de près de 10 °F (environ 5,5 °C) la température sur son pourtour⁴. Ces observations ont été faites par Landsberg lui-même qui a réalisé l'ensemble des mesures⁵. Mais l'exemple le plus frappant présenté par Landsberg est une coupe topographique de la ville de Toronto sur laquelle ont été reportées des mesures de températures (*figure 5*). Cette étude a été réalisée par les météorologues W. E. Knowles Middleton et F. Graham Millar en 1936⁶. Landsberg interprète ce schéma en ces termes :

« Deux caractéristiques sont notables : l'une est la *diminution* progressive de la température à mesure que l'on s'éloigne du lac. La seconde est la température remarquablement "basse" dans la vallée à sept milles [$\approx$ 11 km] du lac. Le différentiel entre ce point et celui de la rive du lac

skin of the atmosphere which is studded with microclimatic differences. The most profound fluctuations in this microclimate are due to variations in local topography, to the presence or absence of water bodies, to forest and park areas, to the structure and cover of the soil. To a lesser extent, the microclimate is influenced by hedges, walls and buildings. »

- 1 H. E. Landsberg, « Bioclimatology of housing », p. 81 in E. Wendell (éd.), *Meteorological Monograph. Recent Study in Bioclimatology: a group*, vol. 2, n°8, Boston : American Meteorological Society , octobre 1954.
- 2 H. E. Landsberg, « Microclimatology », *op. cit.*, p. 114. Traduction personnelle, citation originale : « The "micro" refers to the scope of the area studied, not the size of the differences. »
- 3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « although everyone is actually aware of the general climate of his locality, no one knows much about the climate of his own backyard. »
- 4 *Ibid.*, p. 115
- 5 H. Taba, « The Bulletin Interviews: Professor H. E. Landsberg » in F. Baer (dir.), N. L. Canfield (dir.), J. M. Mitchell (dir.), *Climate in Human Perspective: A Tribute to Helmut E. Landsberg*, Dordrecht : Springer Science+Business Media, 1991, p. 100.
- 6 W. E. Knowles Middleton, F. Graham Millar, « Temperature Profiles in Toronto », *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, vol. 30, septembre 1936, p. 265.

est d'environ 30 degrés [$\approx 16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$] ! Si des informations comme celle-ci avaient été disponibles pour les hommes qui avaient initialement aménagé la ville, la configuration de Toronto serait sans aucun doute différente aujourd'hui.¹ »

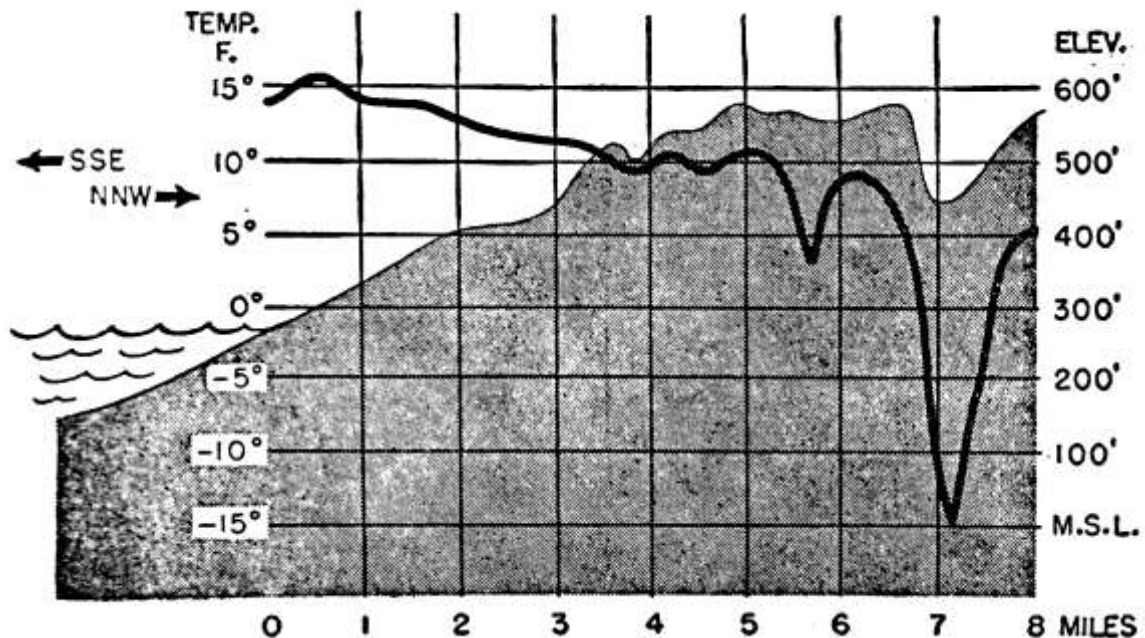


Figure 5 : Profil de température à Toronto, d'après W. E. Knowles Middleton et F. Graham Millar. (J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, Cambridge : The Riverside Press, 1947, p. 292)

Ce graphique met en évidence deux phénomènes microclimatiques importants. Premièrement, il montre l'effet de stabilisation des températures à proximité de larges plans d'eau, ici du lac Ontario : l'eau ayant une capacité thermique massique bien plus importante que celle de l'air, une masse d'eau possède un effet de volant thermique qui influence les températures à son voisinage. Deuxièmement, ce graphique illustre les effets de rétention de l'air froid dans les points topographiquement les plus bas, ce phénomène étant accentué par les brises nocturnes fraîches descendant le long des versants (vents catabatiques). Dans une même ville, ces deux phénomènes antagonistes, de régulation et d'accentuation, peuvent avoir des

1 H. E. Landsberg, « Microclimatology », *op. cit.*, p. 115. Traduction personnelle, citation originale : « Two features are noteworthy: One is the gradual *decrease* of temperature as one moves away from the lake. The second is the remarkable temperature "low" in the valley seven miles distant from the lake. The differential between this point and that of the lake-shore is around 30 degrees! Had information like this been available to the men who originally laid out the city, the configuration of Toronto would undoubtedly be different today. »

conséquences considérables. Landsberg a contribué à populariser ce graphique, qui sera très largement reproduit dans d'autres publications plus tardives, parfois sans mentionner ses auteurs originaux. On retrouve ainsi le schéma de cette étude dans les écrits de James Marston Fitch en 1947¹, de Jeffrey E. Aronin en 1953² et de Victor Olgyay en 1963³.

Landsberg insiste plus particulièrement sur les différences de températures susceptibles de se produire aux mêmes lieux sous l'influence des surfaces exposées au rayonnement solaire. Si « le soleil est, bien sûr, le facteur le plus important dans le climat⁴ », il affirme que ses effets microclimatiques seront « dans une très large mesure, déterminés par la taille, la relation et les textures des différentes surfaces sur lesquelles il tombe⁵. » Les travaux de Geiger avaient déjà montré l'importance de la nature de ces surfaces et des différences de températures qu'elles occasionnent, mais ces travaux n'abordaient que rapidement les effets des surfaces artificialisées. Landsberg présente au contraire un ensemble de valeurs pour appréhender les effets thermiques provoqués par les surfaces artificiellement minéralisées. Il propose ainsi quelques valeurs générales sur les différences de températures entre surfaces, qui donnent des approximations des effets produits à l'échelle du microclimat :

« On constate généralement que la température de l'air à environ 1 pied [$\approx 0,30$ m] au-dessus du sol les jours d'été ensoleillés est d'environ 8 à 10° [≈ 4 et 5,5 °C] inférieure à la surface du sol lui-même. La différence entre le sol exposé (dépendant quelque peu de sa couleur) et les surfaces enherbées est entre 10 et 14° [$\approx 5,5$ et 8 °C] ; l'herbe, bien sûr, étant la surface la plus froide. Entre l'herbe et les surfaces pavées, le différentiel de température peut être beaucoup plus important⁶. »

Landsberg énonce également une règle générale, selon laquelle les transformations de ces surfaces par l'action humaine tendent à amplifier plutôt qu'à atténuer les phénomènes

1 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 292.

2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 45.

3 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 154.

4 H. E. Landsberg, « Microclimatology », op. cit., p. 116.

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « « The sun is, of course, the most important factor in the climate [...] the effect of the sun on a given site will, to a very large degree, be determined by the size, relation and textures of the various surfaces on which it falls. »

6 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « It is generally found that air temperatures about 1 ft. above the soil on sunny summer days are about 8 to 10° lower than the soil surface itself. The difference between exposed soil (depending somewhat on its color) and grass surfaces is between 10 to 14° – the grass, of course, being the cooler surface. Between grass and paved surfaces, the temperature differential may be much greater. »

microclimatiques. Il affirme que si « [la] couverture naturelle du sol tend à stabiliser les températures et à diminuer les extrêmes¹ », à l'inverse les surfaces artificielles « tendent presque sans exception à les exagérer². » Cette règle introduit un jugement implicite qui n'était pas présent chez Geiger : les surfaces transformées par l'activité humaine peuvent induire un certain inconfort thermique et leur emploi doit être étudié avec attention. Landsberg évoque à ce titre les périodes de fortes chaleurs où le rayonnement solaire est intense et il donne l'exemple d'une situation où la température de l'air sous abri a été mesurée à 98 °F [$\approx$ 37 °C], alors que celle de l'asphalte atteignait 124 °F [$\approx$ 51 °C] et que la température de l'air à un mètre du sol était de 108 °F [$\approx$ 42 °C]. En Arizona, pour une température sous abri mesurée à 108 °F [$\approx$ 42 °C], celle de l'asphalte atteignait 160 °F [$\approx$ 71 °C]³.

L'amplification de ces gradients thermiques près du sol par certains matériaux suggère un inconfort possible durant certaines périodes de l'année, et Landsberg n'hésite pas à adopter une attitude critique à propos de l'aménagement de certaines villes américaines qu'il décrit en ces termes :

« Parce qu'elle est climatiquement mal planifiée, la ville américaine typique produit un microclimat spécial qui ressemble étroitement à celui d'un désert pierreux. Le ruissellement rapide de toutes les précipitations la prive, surtout en été, d'un refroidissement bénéfique par évaporation [...]. Dans certaines zones le long de rues bâties en dur, la température du pavage, des murs et des toits sera bien sûr beaucoup plus élevée [que dans la campagne environnante]. Ici, sur des surfaces nues, fabriquées par l'homme et exposées au soleil, un œuf peut littéralement être frit jusqu'à devenir croustillant⁴. »

L'argumentation de Landsberg n'est pas dénuée d'humour, mais elle traduit une opinion nettement négative sur la planification des villes américaines qui n'était pas présente chez Geiger. Il estime le potentiel de rafraîchissement saisonnier par évaporation de l'eau pluviale à

1 *Ibid.*

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The natural cover of the land tends to stabilize temperatures and decrease extremes. Man-made surfaces, on the other hand, tend almost without exception to exaggerate them. »

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 119. Traduction personnelle, citation originale : « Because it is climatically ill-planned, the typical American city produces a special microclimate which closely resembles that of a stony desert. The rapid runoff of all precipitation deprives it, especially in summer, of beneficial cooling by evaporation [...]. In certain areas along solidly built-up streets, the temperature of paving, walls and roofs will, of course, be much higher [than the surrounding countryside]. Here an egg may literally be fried to a crisp on naked man-made surfaces exposed to the sun. »

1250 kcal/m² (1500 BTU/ft²)¹. Ce potentiel est cependant ignoré et Landsberg affirme que les microclimats des villes sont un effet « accidentel² » et non anticipé dans la planification. Les effets de smog sur la santé, et plus généralement les problèmes générés par la pollution urbaine liée à l'activité en milieu urbain le préoccupent également. Selon lui, les urbanistes américains devraient prendre pour exemple les villes nouvelles russes qui sont mieux conçues, dans la mesure où elles intègrent des facteurs climatiques comme la topographie, les vents dominants et l'exposition solaire³.

I.1.2.3. Landsberg et l'application de la climatologie à la conception architecturale et urbaine

À la lumière des problèmes qu'il met en évidence, Landsberg insiste sur la nécessité de concevoir des villes plus confortables en hiver comme en été. Préoccupé par l'inconfort thermique parfois ressenti en milieu urbain, il conclut son article de 1947 sur la perspective suivante :

« L'un des moyens les plus sûrs d'améliorer la performance des bâtiments individuels et des villes entières serait d'intégrer la connaissance microclimatique dans leur conception. Les coopérations entre architectes et climatologues aboutiront à des projets mieux adaptés à leur environnement naturel⁴. »

C'est précisément ce souhait, émis en 1947, qui sera moteur pour la conception bioclimatique par la suite. Landsberg travaillera activement à développer cette collaboration plus intime entre architectes et climatologues. Il participera notamment, avec d'autres, à l'étude du plan de la ville nouvelle de Chandigarh en Inde. Ce point est méconnu et le plan de cette ville, dont la prise en compte du climat est à juste titre considérée comme exemplaire, est injustement attribué à Le Corbusier alors qu'il était originellement l'œuvre des urbanistes Albert Mayer et Julian Whittlesey. Mayer et Whittlesey avaient confié à Landsberg la tâche de faire une étude

1 *Ibid.*, p. 119.

2 *Ibid.*, p. 118.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 119. Traduction personnelle, citation originale : « One of the surest ways of improving the performance of individual buildings and whole cities would be to incorporate microclimatic knowledge into their design. Cooperations between architects and climatologists will yield designs better adapted to their natural environment. »

climatique et microclimatique du site d'implantation de Chandigarh¹. Landsberg aurait privilégié l'orientation des rues principalement en fonction des vents dominants et secondairement en fonction de l'exposition solaire, aboutissant à une orientation selon l'axe nord-ouest/sud-est². L'implantation des sites industriels à l'ouest et au sud-ouest choisi par Landsberg était motivée par la volonté d'éviter la circulation des fumées au-dessus de la ville. L'implantation du Capitole sur les hauteurs, bien que justifiée par des fonctions symboliques, permettait également de libérer des espaces pour la construction d'habitations bénéficiant de brises nocturnes favorables³. Le Corbusier, Edwin M. Fry et Jane Drew ont conservé la majorité des choix urbanistiques de Mayer et Wittlesey⁴, choix qui étaient étayés par l'étude climatique de Landsberg et de son équipe.

Plus généralement, Landsberg peut être considéré comme une figure importante de la climatologie théorique et pratique. Son article de 1947 traduit un engagement pour une méthode de conception intégrant l'étude des microclimats à l'échelle urbaine. Les considérations agricoles qui sous-tendent *The Climate Near the Ground* de Geiger sont absentes de l'article de Landsberg qui est publié dans une revue d'architecture largement diffusée qui s'adresse directement à des architectes, des ingénieurs et des urbanistes. Il appartient au champ de la climatologie appliquée, alors que le traité de Geiger sur les climats près du sol relevait de la climatologie scientifique. Landsberg a cherché à promouvoir l'intérêt des applications de la climatologie. Dans un de ses premiers articles sur la climatologie appliquée publié en 1946, il propose de considérer le climat « comme une ressource naturelle⁵ » et d'intégrer l'étude du climat pour la conception des habitations, des hôpitaux, mais aussi dans les domaines de l'aviation, de l'agriculture ou de l'énergie, afin d'utiliser les « gains climatiques⁶ » comme le vent, la pluie ou le rayonnement solaire. Ce texte manifeste une volonté de généraliser l'emploi de la climatologie, susceptible d'améliorer de nombreux domaines d'activités souvent liés à des domaines économiques importants, comme l'agriculture ou l'énergie. D'autres publications sur la climatologie appliquée suivront, entre autres dans le *Compendium of Meteorology*⁷, ouvrage

1 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 214.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 214.

4 T. Banerjee, « U.S. Planning Expeditions to Postcolonial India: From Ideology to Innovation in Technical Assistance », [en ligne], *Journal of the American Planning Association*, 75:2, 2009, p. 198.

5 H. E. Landsberg, « Climate as a Natural Resource », *The Scientific Monthly*, vol. 63, n°4, oct. 1946, p. 297.

6 *Ibid.* L'expression « gain climatique » traduit l'anglais « climatic income ».

7 H. E. Landsberg, W. C. Jacobs, « Applied climatology », in T. F. Malone (éd.), *Compendium of Meteorology*, Boston : American Meteorological Society, 1951, p. 976-992.

massif qui synthétise les connaissances météorologiques de l'époque, auquel participe également Geiger.

En ce qui concerne spécifiquement l'architecture, Landsberg est l'auteur de nombreux autres articles sur la climatologie appliquée à l'architecture, moins célèbres que celui de 1947, les principaux étant « Comfortable Living Depends on Microclimate » (1950), « Bioclimatology of Housing » (publié en 1954) ou « A Note on Bedroom Bioclimate » (1961). Son article de 1954 apporte de nombreux compléments à celui de 1947, notamment de nombreuses mesures ainsi qu'une importante bibliographie sur le rapport entre climat et architecture. Landsberg mentionne des valeurs de pression du vent en fonction de sa vitesse, d'illumination des murs d'une construction en fonction de la largeur d'une rue ou les différences de température entre l'air et certaines surfaces durant une journée ensoleillée¹. Il évoque également les mesures réalisées sur un prototype de maison solaire situé à Boston entre 1949 et 1950, dont près de 60 % des besoins de chauffage ont été assurés par le rayonnement solaire durant le mois le plus froid de février 1950². Il aborde également des problèmes de confort thermique³. Cet article, bien plus riche que celui de 1947 a cependant moins été cité par la suite. En réalité, au moment où il le remet en 1952⁴, soit cinq ans après son article paru dans *The Architectural Forum*, la collaboration entre architecte et climatologue qu'il souhaitait en 1947 est déjà bien engagée, comme en témoigne l'abondante bibliographie de son article de 1954, dont la majorité est composée de travaux de recherche réalisés entre 1947 et 1954.

1.1.2.4. Le problème des données relatives aux microclimats

Malgré le développement d'un intérêt pour la conception à partir du climat, un problème mentionné régulièrement par Landsberg depuis le début de ses travaux en climatologie appliquée est le manque de données climatiques, et *a fortiori* microclimatiques, à même de fournir des valeurs utilisables aux concepteurs, qu'ils soient architectes ou ingénieurs. En ce qui concerne les données microclimatiques, il remet en cause comme Geiger le système de recueil des données météorologiques aux États-Unis, où les mesures sont évidemment réalisées sous abri, mais également sur des bâtiments en hauteur ou à proximité des aéroports, les

1 H. E. Landsberg, « Bioclimatology of housing », *op. cit.*, p. 86.

2 *Ibid.*, p. 87.

3 *Ibid.*, p. 92.

4 *Ibid.*, p. 81.

prévisions météorologiques étant principalement destinées à l'aviation civile¹. En ce qui concerne l'étude des microclimats et leurs mesures, Landsberg affirme qu'elles pourraient être assurées par des amateurs ayant une connaissance élémentaire des phénomènes météorologiques et indépendamment des réseaux de stations météorologiques officiels. La microclimatologie serait une science susceptible d'être pratiquée par chacun à une échelle locale et pour des besoins identifiés. Il explique ce point en 1950, dans la conclusion d'un bref article sur la relation entre confort et microclimat :

« [Nous] notons que les enquêtes microclimatiques sont un domaine très amusant pour le météorologue amateur qui voudrait mettre ses connaissances à profit pour vivre confortablement. Voici la manière de procéder. Relevez les différentes dissemblances climatiques du quartier où vous habitez par rapport aux stations officielles, en toutes saisons. Observez les différences dans la vie des plantes, en particulier les dates de première floraison au printemps. Elles offrent de nombreux indices utiles sur le microclimat. Regardez les effets microclimatiques des arbres, des arbustes, des haies. Notez les différences de pentes des diverses expositions et les différences entre le sommet des collines et les vallées. Regardez les influences des surfaces d'eau. Notez les différences de température de diverses surfaces. Prenez la mesure des températures à l'intérieur et à l'extérieur dans divers contextes. Il est généralement facile de mettre à profit les connaissances ainsi acquises pour améliorer le microclimat de votre propre maison². »

Cet extrait prend la forme d'un protocole à suivre afin d'étudier un microclimat. Landsberg énonce une série de points d'observation à privilégier. On remarque que les effets microclimatiques de la végétation et sur la végétation sont importants à relever. Les considérations phénologiques, sur le retard ou l'avance de la floraison, sont mentionnées : leur étude au début du XX^e siècle a fourni les premières intuitions sur l'importance des

1 H. E. Landsberg, « Microclimatology », *op. cit.*, p. 114.

2 H. E. Landsberg, « Comfortable living depends on microclimate », *Weatherwise*, 3:1, février 1950, p. 10. Traduction personnelle, citation originale : « In conclusion, we note that microclimatic investigations are a field full of fun for the amateur weatherman who would like to use his knowledge for comfortable living. Here is the way to proceed. Survey the various climatic differences of your home district compared to official stations in all seasons. Observe differences in plant life, especially dates of first blooming in spring. They offer many useful hints on microclimate. Watch the microclimatic effects of trees, shrubbery, hedges. Note the differences of slopes of various exposures and the differences between hilltops and valleys. Watch the influences of water surfaces. Note the temperature differences of various surfaces. Take readings of temperatures indoors and outdoors in various settings. It is usually easy to turn the knowledge thus gained to advantage for improving the microclimate of your own home. »

microclimats¹. Pour Landsberg, la connaissance du microclimat est un savoir directement utilisable par un habitant amateur de météorologie pour améliorer le confort de son habitation. Si ces observations sont essentiellement qualitatives, il conseille de les compléter avec des mesures quantitatives à l'aide d'un psychromètre (un ensemble de deux thermomètres mesurant la température sèche et la température humide) et d'un anémomètre (un appareil pour mesurer la vitesse du vent²). L'étude des microclimats est donc présentée comme une activité accessible aux amateurs équipés d'instruments de mesure relativement sommaires.

Bien que le manque de données microclimatiques puisse être justifié par l'impossibilité de mettre en place un réseau national de mesures à cette échelle et par la diversité considérable des microclimats, Landsberg signale également le manque de données météorologiques plus générales et pourtant cruciales, comme celles relatives à l'ensoleillement. En 1946, il faisait déjà l'observation suivante sur la disponibilité des données d'intensité du rayonnement solaire :

« La lacune la plus importante dans nos connaissances est le manque de données sur l'intensité du rayonnement solaire. Les observations d'une vingtaine de stations mal réparties dans les États-Unis sont insuffisantes pour évaluer le facteur de rayonnement comme source additionnelle de chaleur pour les structures modernes utilisant de nouveaux matériaux, tels que les briques de verre. Cela nécessite un réseau élargi de stations mesurant les intensités solaires³. »

Landsberg constate la pauvreté des données d'ensoleillement disponibles et formule le souhait de développer leur collecte. Malgré son influence, il sera amené à répéter ce constat d'une sous-estimation de la ressource solaire, liée à une négligence des mesures de son intensité au sol. En 1973, dans un article d'*Architectural Design* consacré à l'utilisation de l'énergie solaire dans l'habitat⁴, l'auteur cite un article de Landsberg daté de 1961 qui pointe encore ce manque⁵. La mesure du rayonnement solaire a des conséquences sur l'étude des microclimats, dans la mesure

1 Voir : C. Gaillard, « De la loi bioclimatique à la conception bioclimatique en architecture », *La Météorologie. Revue de l'atmosphère et du climat*, n°113, mai 2021, p. 41-46.

2 H. E. Landsberg, « Comfortable living depends on microclimate », *op. cit.*, p. 10.

3 H. E. Landsberg, « Climate as a Natural Resource », *op. cit.*, p. 295. Traduction personnelle, citation originale : « The most important gap in our knowledge is the lack of data on the intensity of solar radiation. Observations from about 20 poorly distributed stations in the United States are insufficient to evaluate the radiation factor as an additional source of heat for modern structures using new materials such as glass bricks. This calls for an expanded network of stations measuring solar intensities. »

4 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *Architectural Design*, vol. XLIII, n°10, 1973, p. 634- 661.

5 *Ibid.*, p. 640. Voir : H. E. Landsberg, « Solar Radiation at the Earth's Surface », *Solar Energy*, 5(3), 1961, p. 95.

où l'intensité du flux solaire atteignant une certaine surface détermine dans une très large mesure les effets microclimatiques, comme nous l'avons vu à partir des travaux de Geiger¹.

Cette insistance sur le manque de données disponibles sur le rayonnement solaire à l'échelle microclimatique, mais également à l'échelle locale et régionale, sera souvent évoquée dans les travaux sur l'architecture solaire passive, et l'étude des microclimats par les architectes et les ingénieurs restera essentiellement qualitative par la suite. En insistant sur l'insuffisance des données microclimatiques disponibles et surtout en approfondissant le rôle de l'aménagement dans la modification des microclimats, Landsberg a prolongé les travaux de Geiger et les a étendus à l'étude des zones urbanisées. Il a montré l'importance pratique de la microclimatologie pour les architectes, ingénieurs et urbanistes et a contribué à promouvoir l'intérêt pour l'étude des microclimats auprès de ces concepteurs. Mais avant d'aborder l'influence de Landsberg et de Geiger sur le développement des méthodes de conception à partir du climat et de la conception bioclimatique, il nous paraît nécessaire d'approfondir la signification de cette notion de microclimat qui concentre l'intérêt de leurs travaux.

I.1.3. La notion de microclimat et sa signification

I.1.3.1. Les échelles du climat

L'intérêt épistémologique de la notion de microclimat a déjà été évoqué : elle circonscrit un ensemble de phénomènes climatiques d'un ordre de grandeur déterminé par l'interaction avec des surfaces adjacentes. Différentes surfaces exposées produisent différents microclimats à leur voisinage, parfois dans une distance de quelques centaines voire dizaines de mètres². Conformément aux travaux en épistémologie de Gaston Bachelard, un ordre de grandeur définit une certaine « zone d'influence³ » où s'exerce l'action d'un phénomène. Les phénomènes microclimatiques sont repérés à une échelle où l'interaction entre les facteurs climatiques et les surfaces matérielles est primordiale et largement indépendante de la circulation atmosphérique normalement déterminante aux autres échelles⁴. C'est dans cet ordre de grandeur que l'effet des surfaces est sensible et c'est ce qui explique que la microclimatologie reste circonscrite à l'étude

1 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 3.

2 J. M. May, « Preface », p. III in E. Wendell, E. (éd.), *Meteorological Monograph. Recent Study in Bioclimatology: a group*, op. cit.

3 G. Bachelard, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, op. cit., p. 77.

4 Pour une discussion plus complète de ces importantes distinctions d'échelles des climats, voir : M. M. Yoshino, *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*, op. cit., p. 3-14.

des phénomènes atmosphériques près des surfaces. En insistant sur la singularité des phénomènes microclimatiques, il nous paraît nécessaire de développer la signification de cette notion de microclimat, afin de comprendre comment celle-ci a pu être intégrée et investie par d'autres champs disciplinaires par la suite, et notamment par l'architecture. Nous avons évoqué l'intuition de Geiger pour qui la microclimatologie est une « science limite¹ » qui se serait constituée à la limite d'autres sciences comme la botanique ou l'agroforesterie. Nous aimerions conserver cette perspective tout en considérant ces limites comme des zones de contact entre disciplines.

Bien qu'ils se concentrent au voisinage du sol, il est important de souligner que les phénomènes microclimatiques produisent des effets non négligeables, qui peuvent être mesurés, perçus et ressentis. De nuit et en extérieur par exemple, la sensation de chaleur au voisinage d'une paroi provoquée par le rayonnement infrarouge de celle-ci est un effet microclimatique sensible. On doit ainsi insister sur l'intensité des variations microclimatiques en donnant quelques valeurs. Dans un même lieu, à quelques centimètres d'un sol enherbé, la température peut être de 6 °C et l'humidité relative de 90 %, alors que cent cinquante mètres plus loin, au-dessus d'une dalle en béton à proximité d'un bâtiment, la température est de 13 °C et l'humidité relative de l'air n'est plus que de 60 %². Ces mesures ont été réalisées de nuit par W. Knochenhauer, à l'aéroport d'Hanovre en 1934³. Elles montrent que les gradients de températures et d'humidité représentés par les isolignes normalement horizontales sont redressés à la verticale par la présence du bâtiment situé à une centaine de mètres (*figure 6*). Dans les régions montagneuses, où les effets microclimatiques sont particulièrement marqués à cause des différences d'exposition liées à la topographie, la différence entre les microclimats de l'adret (versants bénéficiant de l'ensoleillement le plus important) et de l'ubac (versants bénéficiant de l'ensoleillement le plus faible) est considérable. Le climatologue français Charles-Pierre Péguy estime que « l'énergie solaire reçue par jour sur un adret alpin est en général de 8 à 10 fois plus grande que cette même énergie reçue sur un ubac⁴. » Cette valeur permet de fixer une proportion pour l'intensité des variations microclimatiques et des contrastes entre versants différemment exposés au rayonnement solaire, alors que deux stations

1 R. Geiger, « Microclimatologie », in : *La Météorologie*, op. cit., p. 86.

2 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 179.

3 *Ibid.*, p. 178.

4 Ch. P. Péguy, *Précis de climatologie*, Paris : Masson & Cie, 1961, p. 313.

météorologiques, situées respectivement à l'adret et à l'ubac placées sous abri et à la même altitude, relèveront sensiblement les mêmes températures de l'air selon Péguy¹.

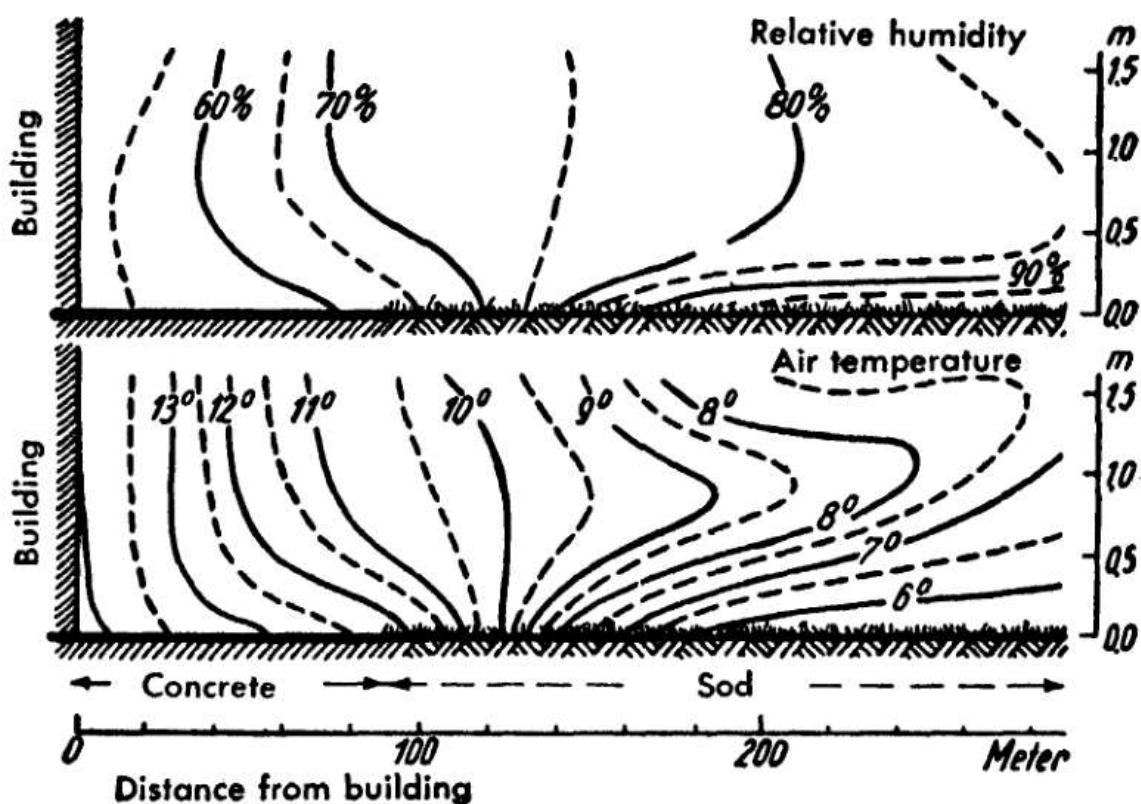


Figure 6 : Influence des pistes et de l'enherbement sur les couches d'air proches du sol d'un aérodrome, d'après W. Knochenhauer.

(R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, Cambridge : Harvard University Press, trad. de l'allemand par M. N. Stewart et al., 1950, p. 179)

Cependant, on pourrait soupçonner la microclimatologie d'exagérer les différences microclimatiques. Il est vrai que ces différences n'existent que dans des conditions déterminées ou intermittentes, notamment l'ensoleillement, et dépendent systématiquement de la saisonnalité. Le climatologue français Pierre Pédelaborde, citant le géographe et climatologue britannique Arthur Austin Miller, affirme que la « microclimatologie est essentiellement une "climatologie du beau temps"² », puisque c'est l'ensoleillement direct qui entretient les principaux phénomènes microclimatiques. Ce point de vue est partagé par d'autres

1 *Ibid.*, p. 92. Péguy estime que l'étude des microclimats « consiste à tenter de dégager les lois de leur répartition par référence au climat local. » (p. 316).

2 P. Pédelaborde, *Introduction à l'étude scientifique du climat*, [1ère éd. 1955], Paris : Société d'Édition d'Enseignement Supérieur, 1983, p. 41.

climatologues et certains affirment que pour une même surface, les microclimats sont les plus nombreux « par ciel clair et par vent calme¹ ». C'est pourquoi Pédelaborde précise :

« Il ne faudrait pas, toutefois, exagérer l'importance des microclimats. Lorsque l'atmosphère est troublée, ce qui est la règle dans les climats océaniques de la zone tempérée, le brassage permanent de la basse troposphère rend négligeables les influences microclimatiques². »

L'observation de Pédelaborde est juste et permet de préciser qu'un microclimat ne constitue pas une réalité stable et immuable puisque les phénomènes qui les produisent varient en intensité au cours du temps. Ainsi, ce qu'il nomme « [l'action] perturbatrice du sol³ » n'est pas un phénomène continu dans le temps.

Il importe de rappeler que le but de la microclimatologie est de mesurer des contrastes climatiques à une certaine échelle et au voisinage des surfaces, ces contrastes étant nécessairement négligés ou ignorés pour d'autres ordres de grandeur. Comme Geiger l'avait déjà souligné, le développement des mesures météorologiques s'est constitué à partir de la négligence des effets microclimatiques, par la normalisation des appareils de mesure, les phénomènes microclimatiques étant considérés comme des erreurs à négliger. L'usage de l'abri météorologique, nommé « abri Stevenson⁴ », et qui est placé à environ deux mètres au-dessus du sol pour l'enregistrement des données météorologiques permet cette normalisation. Par son emplacement à bonne distance du sol, il rend négligeable l'influence de son rayonnement et des températures à son voisinage⁵. Sa couleur blanche, l'usage du bois pour sa construction, et l'utilisation d'une « double cloison à claire-voie⁶ » permettent de parfaitement ventiler l'intérieur de l'abri, pour contenir l'élévation de la température intérieure, tout en minimisant les effets du rayonnement solaire. Tous ces choix techniques pour la protection des appareils de mesure concourent à rendre négligeables les effets microclimatiques et servent à normaliser les mesures. L'homogénéité des conditions de mesure est alors privilégiée⁷. À l'inverse, l'étude des microclimats vise à réintégrer les variations microclimatiques, non plus comme des erreurs,

1 H. Grisolle, B. Guilmet, R. Arlery, *Climatologie. Méthodes et pratiques*, Paris : Gauthier-Villars, (coll. Monographies de météorologie), 1962, p. 51.

2 P. Pédelaborde, *Introduction à l'étude scientifique du climat*, op. cit., p. 41.

3 *Ibid.*, p. 38.

4 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 116-117.

5 Ch. P. Péguy, *Précis de climatologie*, op. cit., p. 117.

6 *Ibid.*, p. 116-117.

7 Ch. Maurain, *La Météorologie et ses applications*, op. cit., p. 42-43.

mais en tant qu'elles possèdent une signification locale et ce, au détriment de conditions de mesure homogènes. Pour ce faire, le microclimatologue n'enregistre que rarement des valeurs moyennes qui masquent la variation d'intensité des phénomènes microclimatiques : la température moyenne près du sol dans un climat chaud, désertique et ensoleillé n'aurait aucun sens de ce point de vue puisque c'est l'amplitude de la variation thermique dans le temps, lisible à travers l'oscillation des températures près du sol qui est signifiante.

Dès lors, les relevés d'un ensemble de microclimats adjacents ou proches ne constituent en aucun cas une image vraisemblable du climat local : la moyenne de leurs valeurs ne possède aucune signification climatique plus générale. Il importe donc de bien distinguer un climat local et un microclimat : Geiger et de nombreux auteurs ont par la suite insisté sur ce point¹. Le climat local, aussi appelé « climat stationnel² », désigne « le climat tel qu'on le reconstitue à partir des stations d'observation elles-mêmes³ » et « de façon à éliminer toute influence perturbatrice de l'environnement⁴ », alors que « l'étude du micro-climat tend au contraire à souligner l'importance de cet environnement⁵. » Les mesures effectuées à l'échelle du climat local constituent une première abstraction du microclimat qui est homogène pour toutes les stations⁶. Chaque climat local ou stationnel est lui-même « comme un faciès du climat régional⁷ » existant à plus grande échelle et « soutient avec lui les mêmes rapports que l'individu avec l'espèce⁸ », selon l'analogie proposée par Maximilien Sorre. Certes, des données climatiques générales et « d'ordre cosmique⁹ », comme les valeurs d'ensoleillement en fonction de la latitude d'un lieu, peuvent informer *a priori* l'étude des microclimats à cette latitude, mais cette relation n'est pas réciproque. Un microclimat possède une singularité irréductible (topographie, nature du sol...) qui n'est plus significative à d'autres échelles.

1 M. Sorre, « La Notion de micro-climat », *Bulletin de l'Association de géographes français*, n°301-302, 38e année, novembre-décembre 1961, p. 165-166.

2 Ch. P. Péguy, *Précis de climatologie*, *op. cit.*, p. 283. La notion de « climat stationnel » est reprise à Sorre, dans l'article cité précédemment.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, *op. cit.*, p. 13.

8 *Ibid.*

9 Ch. P. Péguy, *Précis de climatologie*, *op. cit.*, p. 55. En première approximation, la quantité d'énergie solaire reçue par une surface peut être estimée à partir d'une équation qui fait intervenir la constante solaire, modulée par le coefficient de transparence (nébulosité du ciel) et l'angle d'incidence du rayonnement au zénith par rapport à la surface en question, qui est fonction de la latitude et de la saison.

I.1.3.2. La signification biologique et technique de la notion de microclimat

Les premiers travaux en microclimatologie répondaient à des problématiques concrètes, liées à des enjeux agricoles, entomologiques ou botaniques. En ce sens, il existe une zone de contact disciplinaire entre la microclimatologie et les sciences de la vie. Geiger mentionnait déjà ce point en 1934 :

« L'importance de la microclimatologie repose sur le fait qu'elle nous fait connaître les véritables conditions de vie, en tant qu'elles se rapportent au climat des plantes et des animaux et même, comme nous le verrons plus tard, des hommes. On peut avec raison, comme l'a fait W. Hausmann, parler d'un "climat de la vie" tout court. [...] Le biologiste cherche en premier lieu à saisir ce "climat de la vie" en étudiant les organismes vivants ; il tâche de répondre aux questions que soulève l'observation des phénomènes vitaux. Les instruments de mesure et les lois météorologiques ne constituent pour lui que des moyens indispensables, qu'il utilise plus ou moins pour trouver une réponse à ses questions¹. »

Cette association de la microclimatologie et de la biologie traduit le vœu d'une climatologie concrète qui puisse s'appliquer à l'étude des organismes vivants, des plus élémentaires aux plus complexes. Geiger mentionne ainsi des études sur la microclimatologie des fourmilières, dont l'agencement des zones intérieures dépend de l'exposition au rayonnement solaire extérieur². Il fait également référence à des études sur la répartition des insectes en fonction des microclimats sur des souches d'arbres différemment exposées³.

Cette compréhension biologique de la notion de microclimat est partagée par d'autres auteurs dans d'autres disciplines et appliquée à d'autres formes d'organismes. L'étude des microclimats a pris une signification toute particulière en géographie humaine et notamment dans les travaux du géographe Maximilien Sorre. Sorre donne une grande importance à la notion de microclimat, qu'il connaît des travaux menés par Geiger avec Köppen qu'il a lus et commentés. En 1943, dans son ouvrage sur *Les Fondements biologiques de la géographie humaine*, il critique l'abstraction de la définition générale du climat « pour un biologiste soucieux de serrer de près le mécanisme de répartition des formes vivantes⁴. » Sorre souhaite

1 R. Geiger, « Microclimatologie », *op. cit.*, p. 86-87.

2 *Ibid.*, p. 91.

3 *Ibid.*, p. 92.

4 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, *op. cit.*, p. 13.

en effet insister sur le « caractère local du complexe climatique¹ » qui est concrètement vécu par les organismes, et il affirme que « [l'ensemble] des variations atmosphériques [...] présente en chaque lieu une individualité originale, parfois irréductible à l'individualité la plus voisine². » L'intérêt de la notion de microclimat, qu'il distingue de celles de « climat local » et de « climat régional » qui renverraient à des ordres de grandeur et des échelles différentes, est qu'elle permet de poser l'existence de climats « plus ou moins confinés, plus ou moins isolés du milieu général³. »

Le degré de confinement d'un microclimat par rapport au climat local fait toute la difficulté de la définition proposée par Sorre. En 1961, il propose dans un article issu d'une communication intitulée « La Notion de micro-climat » de clarifier une nouvelle fois l'emploi de cette notion qui aurait connu « de curieux détournements de sens⁴ » selon lui. Il critique l'imprécision des notions de « macroclimat » et de « mésoclimat » issues de Geiger. Il rappelle que « le terme de micro-climat s'applique dans tous les cas à *l'atmosphère d'un espace restreint*⁵ » : à ce titre un vêtement constitue un microclimat qui interpose « un matelas d'air⁶ » entre l'atmosphère et la peau, mais le versant d'une pente bien ensoleillée ne constitue pas un microclimat, mais un climat local. Sorre insiste sur la clôture relative des microclimats qui doivent être partiellement soustraits de l'action du climat local par des parois naturelles (il prend l'exemple d'une grotte) ou artificielles, dont les qualités physiques assurent une perméabilité plus ou moins grande⁷. Sorre rentre dans le détail de ces phénomènes : un mur par exemple, qui n'est jamais « totalement imperméable à la chaleur⁸ », bloque le rayonnement visible tandis que le verre est « diathermane », c'est-à-dire qu'il transmet la chaleur sous forme de rayonnement infrarouge⁹. Il aboutit ainsi à une définition définitive du microclimat comme « *ensemble des qualités de l'atmosphère dans un espace limité et plus ou moins complètement clos*¹⁰. » La définition de Sorre, bien que marginale et plus restrictive que celle de Geiger, permet néanmoins d'interpréter un microclimat comme une série de qualités climatiques localement transformées. Qu'il soit naturel ou artificiel, un microclimat est le résultat d'un ensemble d'actions sur un

1 *Ibid.*, p. 14.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 15.

4 M. Sorre, « La Notion de micro-climat », *op. cit.*, p. 162.

5 *Ibid.*, p. 165.

6 *Ibid.*, p. 164.

7 *Ibid.*, p. 166.

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*, p. 167.

climat local. En mettant l'accent sur les opérations de transformation réalisées pour produire un microclimat à partir d'un climat local, notamment par la nature et la qualité des parois et des surfaces, Sorre propose une définition technique du microclimat, se référant essentiellement aux éléments de l'architecture. Une grotte est en ce sens déjà une architecture, partiellement soustraite aux variations atmosphériques extérieures et utilisable dans un but déterminé (conservation alimentaire, habitation...)

Sorre illustre comment la notion de microclimat a pu être reçue et comprise à la suite de Geiger et de Landsberg : il insiste sur le fait qu'un microclimat est un ensemble de transformations qualitatives d'un climat local. Dans la compréhension des travaux de Geiger, et plus généralement des premières recherches sur les microclimats, il est alors possible de distinguer deux types de réception : une compréhension qualitative des microclimats et de leurs transformations illustrée par Sorre, et une compréhension heuristique des microclimats issue de Geiger, concentrée sur l'étude et la mesure des phénomènes à cet ordre de grandeur dans la perspective d'approfondir leur compréhension. Dans la pratique, ces deux modes de compréhension constitueront deux approches intimement liées. La compréhension qualitative des microclimats apparaît comme la plus immédiate et la plus simple à mettre en œuvre en l'absence d'appareils de mesure : elle sera largement partagée par les architectes, ingénieurs et chercheurs associés à la conception bioclimatique. L'étude des microclimats a ainsi été largement encouragée dans ce sens et de très nombreux ouvrages et manuels sur la conception bioclimatique ou solaire passive présentent une section ou un chapitre consacré à ce sujet.

Aux États-Unis, l'ouvrage de Victor Olgyay publié en 1963, sur lequel nous reviendrons en détail, comporte tout un chapitre consacré aux « effets microclimatiques » pour la sélection d'un site¹. En 1978 le manuel de David Wright mentionne « la conception du microclimat² » (*microclimate design*) ainsi que l'importance de son étude³. En France, on peut lire en 1974 dans la brochure *La Face cachée du soleil* que « l'étude des composantes essentielles du microclimat permettra de déterminer les possibilités d'utilisation de l'énergie solaire, dans le domaine

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 44-52.

2 D. Wright, *Natural Solar Architecture: A Passive primer*, New York : Van Nostrand Reinhold Inc., 1978, p. 26-27. Trad. *Soleil, Nature, Architecture*, Roquevaire : Parenthèses, trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1979, p. 30-31.

3 D. Wright, « Natural Solar/Microclimate/Solid-State Design », p. 13-15, in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art: Proceedings of the 2nd National Passive Solar Conference, March 16-18, 1978, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania, 3 vol.*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1978. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

du contrôle climatique de l'habitat¹. » Dans des manuels plus tardifs, comme *Archi de soleil* publié en 1978, on trouve une présentation des phénomènes microclimatiques à partir « des états de l'atmosphère² » qui « sont liés aux échanges radiatifs au niveau du sol et au bilan thermique³ », cette définition étant analogue à celle de Geiger qui définissait les microclimats à partir des échanges thermiques au sol. Dans l'ouvrage *Archi bio* publié chez le même éditeur une année plus tard, un chapitre entier est consacré aux effets microclimatiques du vent et aux informations que la végétation est susceptible de fournir pour l'analyse de ces phénomènes⁴.

La conception bioclimatique donne ainsi une très grande importance à l'analyse qualitative des microclimats, l'analyse d'un site étant avant tout une analyse microclimatique. Les données climatiques régionales et générales disponibles auprès des organisations officielles sont considérées comme largement insuffisantes pour les besoins de l'architecte, les données d'ensoleillement n'existant à l'époque que pour quelques rares stations. L'analyse des microclimats est alors considérée comme indispensable. L'observation des facteurs climatiques suivants est souvent mentionnée : l'ensoleillement direct et son intensité, les températures et l'humidité relative de l'air, la direction et la vitesse du vent ainsi que la pression atmosphérique⁵. Plus rarement, les données des précipitations sont aussi considérées comme importantes, ces phénomènes étant intimement liés à la température et à l'humidité relative de l'air⁶.

Au niveau microclimatique, la qualité de l'exposition, qui dépend de l'inclinaison du terrain, de la saison et des masques (obstacles portant ombrage), la présence régulière de brumes ou de brouillard ainsi que les brises ou les mouvements locaux des masses d'air, sont des éléments microclimatiques généralement mentionnés dans les différents ouvrages⁷. La nature du sol, la présence de plan d'eau et la proximité avec un microclimat urbain sont également évoquées⁸. Les mécanismes qui affectent les mouvements de l'air, les brises et les vents sont souvent détaillés⁹, puisqu'ils montrent l'importance de la rugosité du sol et de la topographie.

1 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, Paris : Bricolo-Lézardeur, 1974, p. 25.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 11.

3 *Ibid.*

4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 21-37.

5 *Ibid.*, p. 15.

6 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par Jean-Louis Izard, 1978, p. 33-35.

7 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 10-13.

8 *Ibid.*

9 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 50-51.

L'importance de ces paramètres est expliquée en ces termes par l'ingénieur Pierre Le Chapellier et l'architecte Michel Beuzard en 1977 :

« Au voisinage du sol, en raison des frottements et des échanges informationnels, il se crée des ralentissements des filets et courants d'air, qui poussent à la genèse de tourbillon. Il peut donc se créer un écoulement turbulent [...]. L'information que transporte le vent est supportée par une énergie vibratoire qui a l'inconvénient de frapper en rafales et à des fréquences continûment variables¹ ».

Cette analogie entre les mouvements de l'air à l'échelle microclimatique et l'information paraît traduire une idée très profonde si on la généralise : l'énergie mise en jeu dans les phénomènes climatiques est informée par la présence de surfaces ou d'objets qui en modifient les effets à l'échelle d'un microclimat². En un sens, un microclimat est un ensemble de phénomènes climatiques informés par leur interaction avec des surfaces (sol, mur...).

Ce souci d'une prise en compte du microclimat a également été diffusé d'une manière beaucoup moins détaillée et dans des publications plus largement distribuées relatives à la conception bioclimatique. Dans un numéro de 1976 de la revue écologiste *Le Sauvage* consacrée à « La Maison écologique », Dominique Simonnet écrit que « [la] moindre colline affecte la direction du vent³ » et que « la situation climatique locale est modifiée par les formes de terrain, la végétation aux alentours ou les constructions avoisinantes⁴ », ce qui explique que le « microclimat brouille les cartes météorologiques⁵. » Il évoque également l'intérêt de se renseigner auprès des anciens habitants et des agriculteurs d'une localité susceptibles de mieux connaître le microclimat⁶. Quelques années plus tard, on retrouve les mêmes conseils dans le numéro intitulé « Guide pratique de la maison solaire » où il est rappelé l'importance d'étudier le microclimat où doit être implantée une construction. On peut ainsi lire :

1 M. Beuzard, P. Le Chapellier, « L'énergie éolienne », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », n° 315, juin-juillet 1977, p. 62.

2 Cette intuition est justifiée dans la mesure où l'analyse de la turbulence du vent, qui s'accroît au voisinage des surfaces et à cause la friction, est souvent réalisée au moyen d'une analyse statistique étudiant la distribution spectrale suivant la longueur d'onde des rafales (entretien avec Jacques Gandemer, le 9/11/2020).

3 D. Simonnet, « Inventaire des maisons écologiques », *Le Sauvage*, « La Maison écologique », n° 34, octobre 1976, p. 51.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.* Ce type de diagramme a été mis au point par l'américain Anthony Adams en 1975.

« Pour s'adapter aux conditions climatiques, il faut choisir avec soin le site d'implantation. Dans une même commune, à cent mètres près, les facteurs météorologiques peuvent énormément varier. On trouvera des microclimats très différents entre le versant nord et le versant sud d'une même colline. [...] Il ne faut pas non plus oublier qu'il est parfois possible de modifier le microclimat d'un site, par exemple en plantant un rideau d'arbres pour se protéger du vent¹. »

L'auteur recommande également d'étudier les constructions traditionnelles à proximité qui peuvent donner des indications sur le climat local et le microclimat d'un site. On remarque dans les différents documents mentionnés qu'il s'agit moins d'établir une mesure précise du microclimat, à l'aide d'un protocole et d'appareils de mesure, que de collecter des données qualitatives par l'observation (ensoleillement sur la parcelle, direction approximative du vent...)

I.1.3.3. L'intérêt pour l'action des surfaces sur le microclimat

Outre cette approche qualitative, il existe un second type de compréhension de la notion de microclimat que nous avons nommé heuristique et qui serait directement hérité des premiers travaux de Geiger. Il se prolongerait dans l'approche bioclimatique à travers le développement des connaissances microclimatiques, par l'intermédiaire de l'architecture et de la transformation concrète des microclimats. Ce point est selon nous central : en tant qu'elle transforme un microclimat, l'architecture est un terrain d'étude privilégié des phénomènes microclimatiques. Dans la continuité indirecte des travaux menés par Geiger, de nombreux architectes et inventeurs associés à la conception bioclimatique et solaire passive ont insisté sur l'importance des mesures des températures de surfaces exposées au rayonnement solaire. Geiger mentionne l'utilisation de thermocouples, basés sur l'effet thermoélectrique, pour la mesure de la température du sol². Mais en 1951, il constate que le manque d'instruments de mesure constitue le principal frein aux recherches systématiques sur les phénomènes microclimatiques³.

Le développement postérieur à cette période des thermomètres infrarouges a permis de simplifier ces mesures, notamment la mesure de la température des surfaces. Dans un texte

1 F. Lewino, « Guide de construction », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 66, juin 1979, p. 20.

2 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 131.

3 R. Geiger, « Microclimatology », in T. F. Malone (éd.), *Compendium of Meteorology*, Boston : American Meteorological Society, 1951, p. 1002.

récent, l'ingénieur et inventeur Steve Baer (1938-) affirme que mesurer des températures de surface avec ce type de thermomètre bon marché permet de comprendre ce que certains inventeurs associés à la conception bioclimatique avaient pressenti¹. Pour Baer, mesurer, ne serait-ce que par curiosité, les différences de température des mêmes surfaces entre le jour et la nuit avec un thermomètre infrarouge permet d'appréhender la nature des phénomènes à l'œuvre dans les systèmes passifs de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde imaginés durant les années 1970. Des questions aussi triviales que de savoir pourquoi « le toit d'une voiture [est] à 10 °F [$\approx$ 5,5 °C] sous la température ambiante la nuit² » alors qu'il est à « 60 °F [$\approx$ 33 °C] au-dessus dans la journée³ » permettent de prendre conscience des variations extrêmes de température des surfaces exposées au rayonnement solaire direct. C'est l'étude de ces mêmes phénomènes qui a motivé la mise au point de la microclimatologie en 1927 par Geiger. Pour Baer, la compréhension de ces phénomènes est à la base du développement de certaines techniques solaires passives de rafraîchissement, qui ont été utilisées par la suite dans des réalisations bioclimatiques. Selon lui, le simple acte de mesurer est à l'origine d'une prise de conscience de l'importance des phénomènes thermiques au voisinage des surfaces et l'accès à des appareils de mesure inaccessibles par le passé est une occasion d'appréhender directement des phénomènes microclimatiques simples. On retrouve ici l'intuition de Landsberg qui estimait que la microclimatologie pouvait être pratiquée par tous.

Pour Baer, chaque technique solaire passive peut être expliquée du point de vue de son action microclimatique. Par extension, certains architectes ont affirmé que le but de la conception bioclimatique était de concevoir une construction qui fonctionne comme un microclimat équilibré, grâce à un contrôle entre les apports thermiques journaliers par le rayonnement solaire sur les surfaces exposées et les déperditions thermiques nocturnes de ces surfaces, par rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Les architectes Patrick Bardou et Varoujan Arzoumanian, dont les travaux ont été particulièrement influents, définissent l'architecture bioclimatique comme « une maîtrise du bilan thermique et de ses deux composants : rayonnement solaire et rayonnement terrestre, et ceci par l'intermédiaire d'une

1 S. Baer, « Harold Hay's influence on Zomeworks Corporation », p. 41 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, Londres : Routledge, (coll. Routledge Research in Architecture), 2018.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Why is the roof of a car 10 °F below ambient temperature at night? »

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Why 60 °F above in the day? »

enveloppe habitable la plus simple et la plus efficace possible¹. » Selon eux, si une construction produit nécessairement un microclimat, elle doit surtout être conçue pour utiliser ces phénomènes microclimatiques afin d'équilibrer ses apports et ses déperditions thermiques. Dans leur manuel *Archi de soleil*, ils donnent ainsi de nombreuses valeurs indicatives, notamment quant à la conduction en fonction du type de matériau (massif, isolant) et du gradient thermique, qui permet de fixer « l'ordre de grandeur des phénomènes thermiques² » selon leur expression. Ils reprennent ces valeurs à un article de 1976 titré « Les échanges d'énergie entre un bâtiment et son environnement » du climatologue et météorologue français Christian Perrin de Brichambaut³, auteur d'un « traité⁴ » intitulé *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels* largement inspiré des recherches de Geiger.

L'étude des microclimats initiée par Geiger et Landsberg a doublement influencé les développements ultérieurs de la conception bioclimatique : d'une part en insistant sur l'importance de l'analyse qualitative des microclimats des sites de construction et, d'autre part, en clarifiant les phénomènes existants à cet ordre de grandeur et en indiquant comment il est possible d'en tirer parti. On peut considérer que l'étude des microclimats et des climats près du sol a attiré l'attention sur une classe de phénomènes physiques existants à un ordre de grandeur déterminé, au voisinage du sol et des surfaces, qui constitue le milieu de vie de nombreux êtres vivants, et notamment de l'homme. La prise de conscience de l'existence des microclimats, ainsi que de la complexité des phénomènes dont ils résultent, peut être considérée comme un moment central dans la genèse et la formalisation de la conception bioclimatique, dans la mesure où elle a ouvert un champ d'action possible pour l'architecture. Si les noms de Geiger et de Landsberg sont associés à ces premiers travaux sur les microclimats, il est important de préciser que l'intérêt pour les phénomènes microclimatiques s'est diffusé indépendamment de leur œuvre par la suite, notamment à travers les traités de climatologie et plus tard les manuels relatifs à la conception bioclimatique. Pour résumer les travaux présentés précédemment, il importe de garder à l'esprit que chaque surface exposée à des facteurs climatiques produit un microclimat à son voisinage. Notre hypothèse voudrait que ce soit la conscience de ce phénomène d'un ordre de grandeur réduit et très localisé qui a primitivement motivé la recherche d'une conception par le climat en architecture. La conscience que le climat est

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 39.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 62.

4 Ch. Perrin de Brichambaut, *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Méthodes actinométriques*, Paris : Gauthier-Villars, (coll. Monographies de météorologie), 1963, p. 4.

toujours vécu et perçu comme transformé par la présence de surfaces adjacentes, et que la nature de ces surfaces détermine en grande partie les effets microclimatiques, aurait ouvert un champ de possibilité à l'architecte. Les chapitres suivants sont consacrés au développement de cette prise de conscience.

I.2. Concevoir à partir du climat : synthèses des connaissances et premières tentatives

Les travaux sur les microclimats de Geiger et de Landsberg évoqués précédemment ont très tôt suscité l'intérêt théorique de certains architectes américains et canadiens qui ont reconnu l'importance de ces recherches pour l'architecture et le développement de méthodes de conception à partir du climat dès la fin des années 1940. Les écrits de James Marston Fitch aux États-Unis et de Jeffrey E. Aronin au Canada, que nous présenterons dans cette partie, sont imprégnés des recherches en microclimatologie et s'appuient sur ces travaux pour proposer des méthodes de conception en architecture qui prendraient en compte les contraintes des climats tempérés et froids. Parallèlement, un important programme visant à promouvoir la conception à partir du climat est lancé aux États-Unis dès la fin des années 1940, avec la contribution de Landsberg et de nombreux autres climatologues importants. C'est d'abord aux États-Unis que la portée pratique de la microclimatologie a été véritablement comprise, et c'est par l'intermédiaire de ces travaux que les recherches de Geiger et de Landsberg seront internationalement diffusées auprès des architectes et des ingénieurs.

Indépendamment de ces travaux, et durant la même période située entre la fin des années 1940 et le début des années 1950, de nombreux ingénieurs et architectes travaillant dans les climats tropicaux de par le monde cherchent à mettre au point des méthodes de conception à partir du climat adaptées aux contraintes spécifiques des zones tropicales chaudes et humides. Souvent portées par des ingénieurs sensibles aux phénomènes thermiques et à l'importance de la physiologie, les recherches sur l'architecture tropicale de cette période ont permis de synthétiser de nombreuses connaissances. Les expérimentations et les publications qui émanent des ingénieurs et des architectes travaillant dans les climats tropicaux apparaissent comme autant de tentatives pour mettre au point des méthodes de conception en architecture à partir du climat. À ce titre, l'architecture tropicale paraît avoir eu un rôle crucial dans l'émergence de la conception bioclimatique en architecture par la suite.

I.2.1. L'émergence du « contrôle climatique »

I.2.1.1. James Marston Fitch : de la météorologie à l'architecture

Parmi les premiers lecteurs des recherches menées par Geiger sur le climat près du sol, nous avons évoqué le nom de James Marston Fitch qui dans son ouvrage de 1947 intitulé *American Buildings : The Forces that Shape it*, évoque les travaux de Geiger en allemand¹. Fitch (1909-2000) est un architecte et historien américain particulièrement influent dans le champ de l'histoire de l'architecture. Sa carrière a été marquée par son passage à l'armée durant la Seconde Guerre mondiale où il est engagé comme météorologue et travaille dans différentes bases américaines de 1942 à 1945². Comme l'explique le météorologue français Charles Maurain, la situation des États-Unis est particulière à la suite de la Seconde Guerre mondiale puisque l'armée américaine avait formé un nombre considérable de météorologues pour les besoins militaires, dont Fitch faisait partie. Maurain explique :

« [Les] besoins de la météorologie pendant la guerre avaient conduit à former de nombreux météorologistes, et, à la fin des hostilités, environ 7000 météorologistes entraînés ont été rendus à la vie civile ; la compétence qu'il avait acquise a été souvent utilisée³ ».

Fitch fait partie de ces météorologistes qui ont quitté l'armée après la guerre. Cet apprentissage de la météorologie a marqué les travaux ultérieurs de Fitch : ses connaissances en météorologie et en climatologie auraient eu un impact important sur sa compréhension de l'architecture, en renforçant sa certitude d'un rapport intime entre climat et architecture⁴. Il est le premier à avoir compris l'intérêt des travaux en microclimatologie évoqués précédemment pour les architectes et a joué un rôle crucial de passeur entre le domaine de la climatologie et de l'architecture aux États-Unis. En tant qu'architecte, Fitch a collaboré avec Henry Wright, architecte et urbaniste

1 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 294.

2 « James Marston Fitch 1909-2000: A Brief Biography », in M. Sawin (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, op. cit.

3 Ch. Maurain, *La Météorologie et ses applications*, op. cit., p. 233. Landsberg signalait en 1946 que tous ces météorologistes formés durant la guerre pouvaient offrir leur expertise dans de nombreux domaines et pouvaient contribuer à étendre le champ de la climatologie appliquée. Voir : H. Landsberg, « Climate as a Natural Resource », op. cit., p. 294.

4 « James Marston Fitch 1909-2000: A Brief Biography », in M. Sawin (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, op. cit., p. 15.

proche de Lewis Mumford ayant intégré très tôt les facteurs d'ensoleillement et d'exposition solaire dans sa pratique de l'urbanisme¹. Nous avons évoqué les travaux menés avec le climatologue Landsberg, avec qui il aurait partagé l'écriture de l'article « Microclimatology », bien que celui-ci ne lui soit pas attribué à l'époque. Ses travaux avec Landsberg ont eu une influence importante sur l'écriture de son ouvrage *American Buildings* publié à la fin de l'année 1947 et dont le propos est marqué par l'étude des relations entre le climat et l'architecture.

Dans cet ouvrage, Fitch étudie l'influence du milieu physique, notamment climatique, sur l'évolution des formes d'architecture, depuis les premiers abris des colons américains, dont la forme et les techniques de construction auraient évoluées sous la pression d'un climat plus rude qu'en Europe². Son analyse des phénomènes microclimatiques est concentrée sur quelques chapitres. Le postulat à l'origine de son étude consiste à considérer les interactions réciproques entre un bâtiment et son environnement, il affirme par exemple que « chaque aspect de l'environnement physique immédiat – topographie, arbres et bâtiments adjacents, trajectoire du soleil, brise dominante – affecte et est affecté par le bâtiment³. » Ces phénomènes de rétroaction caractérisent les microclimats, qui sont le résultat des interactions entre les couches d'air et les surfaces adjacentes. Fitch rappelle que l'existence de ces phénomènes microclimatiques, selon lui largement ignorés, est bien distincte du « macroclimat » défini par le bureau national de météorologie (le « Weather Bureau⁴ »), en reprenant à son compte la distinction de Geiger entre micro et macroclimat. Il insiste sur l'importance des échanges radiatifs liés au rayonnement de grande longueur d'onde produit par l'échauffement des surfaces minérales dans l'espace urbain, dont l'influence sur le confort est ignorée et dont la mesure est négligée⁵.

Les connaissances du microclimat et des phénomènes thermiques présentées par Fitch l'engagent à émettre un certain nombre de préconisations. L'ouvrage *American Buildings* est donc plus qu'un ouvrage historique et il était même considéré comme un manuel de conception « particulièrement solide sur les aspects thermiques de la conception des bâtiments⁶. » À ce propos, il insiste notamment sur la nécessité d'envisager le paysage non seulement du point de

1 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 300.

2 *Ibid.*, p. 2.

3 *Ibid.*, p. 289. Traduction personnelle, citation originale : « Every aspect of the immediate physical surroundings – topography, adjacent trees and buildings, path of sun, prevailing breeze – affects and is affected by the building. »

4 *Ibid.*, p. 291.

5 *Ibid.*, p. 297.

6 J. Reynolds, « The Roots of Bioclimatic Design », in : V. Olgyay et. al., *Design with Climate*, op. cit., p. IX. Traduction personnelle, citation originale : « particularly strong on the thermal aspects of building design. »

vue esthétique, mais également du point de vue technique, dans la continuité des organes thermiques d'une construction, en vue de produire un microclimat favorable. Il écrit :

« Les arbres, arbustes, gazon et couverture du sol ne doivent pas être considérés comme des produits de luxe, ni comme des ornements, mais comme de véritables équipements, aussi essentiels au fonctionnement efficace du bâtiment que son fourneau ou son système d'éclairage¹. »

Ainsi, toujours selon Fitch, au même titre qu'un poêle nécessite un entretien, la végétation, dont la fonction thermique est tout aussi nécessaire puisqu'elle participe à produire un microclimat favorable, nécessite une « maintenance² » dont l'importance est analogue. L'aménagement extérieur, et notamment la disposition et la nature de la végétation, s'inscrit dans la continuité des dispositifs intérieurs nécessaires au confort.

Fitch considère qu'il est nécessaire d'intégrer les éléments de l'environnement, en minimisant le recours aux moyens artificiels. Selon lui, l'enjeu pour l'architecte n'est pas d'opposer moyens artificiels et naturels, comme on opposerait « la climatisation contre les brises marines³ » ou « les tubes néon contre le soleil⁴ », mais d'intégrer chacun de ces éléments « au niveau le plus élevé possible⁵ ». Cette problématique du niveau d'intégration des éléments naturels sera un enjeu central dans la conception bioclimatique par la suite, le but n'étant pas de se passer du chauffage électrique ou à bois, mais de les utiliser comme un appoint durant les périodes où le climat ne fournit pas les apports nécessaires. Cette recherche d'une intégration des éléments naturels était motivée par le développement diffus des « maisons solaires », que Fitch mentionne⁶. Ces maisons développées durant la première moitié du XX^e siècle, et dont l'histoire est aujourd'hui bien documentée⁷, utilisent le rayonnement solaire sous forme directe,

1 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 295. Traduction personnelle, citation originale : « Trees, shrubs, sod, and ground cover must be viewed not as luxuries, not as ornaments, but as actual items of equipment, as essential to the efficient operation of the building as its stoker or lighting system. Their selection, disposition, feeding, and watering need not be charged off to overhead or justified as pleasant hobbies: they become serious matters of maintenance. »

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 290

4 *Ibid.*

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « It is not a question of air-conditioning versus sea breezes, of neon tubes against the sun. It is rather the necessity for integrating the two at the highest possible level. »

6 *Ibid.*, p. 298.

7 A. Denzer, *The Solar House: Pioneering Sustainable Design*, New York : Rizzoli, 2013, 256 p. ; D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit.

via de larges baies vitrées, ou indirecte, via des capteurs et un système de distribution à air ou à eau. En plus de l'usage du rayonnement solaire, Fitch mentionne quelques techniques de rafraîchissement passif, comme les « toitures-piscines¹ » ou les « brumisateurs de toits² » qui fonctionnent par évaporation, ainsi que les toits et les murs ventilés, employés dans les constructions tropicales. *American Buildings* peut être considéré comme le premier ouvrage largement diffusé où l'on trouve un grand nombre de prescriptions relatives à la connaissance et à l'intégration des phénomènes climatiques et microclimatiques. La publication de cet ouvrage en 1947 propulse Fitch au rang d'historien de l'architecture et spécialiste des relations entre l'architecture et l'environnement³.

1.2.1.2. Le *House Beautiful Climate Control Project*

De par cette notoriété et son intérêt pour les liens entre climat et architecture, Fitch sera associé comme éditeur du célèbre magazine américain *House Beautiful*, et il contribuera à développer le premier projet d'ampleur d'application des données climatiques à la conception architecturale entre 1949 et 1952 : le *House Beautiful Climate Control Project*⁴. Ce projet, mené en collaboration avec l'AIA (American Institute of Architects) regroupe de nombreux spécialistes, dont Landsberg qui est présenté comme « microclimatologue » ainsi que Paul Siple, climatologue et ingénieur pour l'armée américaine, qui est le principal consultant scientifique⁵. D'autres spécialistes issus d'autres disciplines que la climatologie participent à ce projet : Wolfgang Langewiesche, journaliste et aviateur qui écrira de nombreux articles relatifs au vent⁶, L. P. Herrington, physiologiste, Walter A. Taylor, architecte, Dana Coman, spécialiste de géographie médicale ainsi que Miles L. Colean qui est économiste. Le projet est dirigé par Ralph Linton, anthropologue, sous la supervision de Fitch. Tous ces spécialistes participent à

1 J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 207.

2 *Ibid.* Fitch emploie les termes « roof pools » et « roof sprays ».

3 « James Marston Fitch 1909-2000: A Brief Biography », in M. Sawin (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, op. cit., p. 16.

4 Les sources historiques sur ce projet sont essentiellement secondaires, on trouve les principaux renseignements sur un blog hébergé par le MIT : *A Machine for Climate: The House Beautiful/AIA Climate Control Project*, [consulté le 11/11/2020], disponible à l'adresse : <http://web.mit.edu/nature/archive/student_projects/2007/rsr/> [consulté le 11/11/2020], ainsi que dans des publications plus tardives qui l'évoquent et dans les travaux d'historiens contemporains.

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 172.

6 M. G. Abbrussese, *Climate and Architecture: Selected References*, Washington : Housing and Home Finance Agency, mars 1951, p. 1-3.

interpréter les données climatiques, à établir les différents conseils présentés mensuellement dans chaque numéro et émettent des recommandations architecturales propres à chaque climat.

Le *Climate Control Project* est composé d'une série de rapports publiés mensuellement dans chaque numéro de *House Beautiful* entre octobre 1949 et le début de l'année 1952. Chaque numéro aborde une région climatique des États-Unis. Ces publications sont accompagnées par la diffusion en parallèle de données climatiques plus précises dans le *Bulletin de l'American Institute of Architects*, publié bi-mensuellement et distribué dans le milieu des architectes¹. Alors que les documents publiés dans les numéros de *House Beautiful* sont majoritairement des articles proposant des conseils, des schémas de dispositifs ainsi que des exemples de maisons, le *Bulletin* regroupe un ensemble de données sous forme de cartes, des graphiques ainsi que des données techniques pour le dimensionnement des éléments. Leur vocation est de servir de manuel ou de guide climatique pour chaque région climatique abordée. Ces bulletins ont paradoxalement été mieux diffusés : le laboratoire de recherche du Groupe A.B.C. (Ambiances Bio-Climatiques en architecture) de l'école d'architecture de Marseille-Luminy en possède un exemplaire daté de septembre 1949, qui contient un article de Siple.

Le but du *Climate Control Project* est, selon les mots de Siple, d'offrir « une orientation aux architectes, aux urbanistes, aux ingénieurs-conseils, aux producteurs de matériaux de construction et à ceux qui s'intéressent au développement ou à la réglementation de la construction de maisons². » Il vise à introduire aux problèmes de l'intégration à l'environnement naturel par « l'isolation contre la chaleur et le froid excessifs, la pluie, le vent et le soleil³ », mais aussi la préservation de l'intimité et « la protection contre les animaux et autres intrus⁴. » Les historiens de l'architecture contemporains ont analysé l'importance de cette opération pour la prise de conscience des enjeux énergétiques après les pénuries occasionnées par la Seconde Guerre mondiale⁵. En plus de ces enjeux énergétiques, et propres au contexte économique des États-Unis d'après-guerre, le *Climate Control Project* est le premier projet d'ampleur de diffusion des connaissances climatiques et microclimatiques en vue d'assister les

1 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 173.

2 P. A. Siple « American Climates », *Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, septembre 1949, p. 17. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) Traduction personnelle, citation originale : « to offer a guidance to architects, community planners, consulting engineers, producers of building materials, and those interested in the development or regulation of house construction. »

3 *Ibid.*

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « insulation against excessive heat and cold, rain, wind and sun, and privacy and protection from animals and other intruders. »

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 169.

architectes, et plus généralement les concepteurs, afin qu'ils puissent concevoir facilement des constructions profitant du climat dans lequel elles se situent. Ce projet consiste plus fondamentalement à interpréter les données climatiques et microclimatiques signifiantes pour la conception, et à les traduire afin de les rendre utilisables ou *a minima* compréhensibles par le plus grand nombre, et ce pour l'ensemble des États-Unis. À la même époque, en France, l'idée d'utiliser les données météorologiques en urbanisme et en architecture est à peine évoquée par les météorologues¹, cet écart pouvant être expliqué par un intérêt moindre pour les applications de la météorologie².

En ce qui concerne le *Climate Control Project*, on remarque que la motivation sous-jacente à une meilleure prise en compte du climat est avant tout économique ; le premier numéro présentant le projet affirme qu'une maison conçue à partir du climat permet de réaliser d'importantes économies de chauffage et d'éclairage artificiel. Ces enjeux d'économie d'énergie pour l'habitant étaient déjà évoqués par Landsberg dans ses premiers articles sur le sujet. Une motivation moins importante mais significative consistait à valoriser les particularités climatiques régionales, susceptibles de justifier des formes régionales d'architecture, ainsi qu'un mode de vie plus proche de la nature et une décoration intérieure plus rustique (matériaux bruts...). Cette motivation, à la fois architecturale et identitaire, d'un retour à une forme de régionalisme se perpétuera par la suite dans la conception bioclimatique³.

L'intérêt pour la prise en compte du climat et la recherche du « contrôle climatique » semble avoir émergé à la suite de la publication durant la seconde guerre mondiale d'un ouvrage intitulé *Climate and the Energy of Nations*⁴ (*Le Climat et l'énergie des nations*), écrit par Sydney Frank Markham, un homme politique britannique. Cet ouvrage très populaire, et dont la lecture est recommandée dans le premier numéro sur le *Climate Control Project* au côté de l'ouvrage *American Buildings* de Fitch, est une analyse essentiellement déterministe du progrès des civilisations en fonction des ressources énergétiques disponibles sur leur territoire. L'idée générale de l'ouvrage est que « [la] civilisation dépend dans une large mesure du contrôle

1 Ch. Maurain, *La Météorologie et ses applications*, op. cit., p. 248.

2 *Ibid.*, p. 233.

3 Cette forme de régionalisme climatique est très différente du « régionalisme critique » analysé plus tard par l'historien de l'architecture Kenneth Frampton, qui est avant tout une posture politique et idéologique. Voir, K. Frampton, « Vers un régionalisme critique : pour une architecture de résistance », trad. de l'anglais par L. Dousson, p. 20-22 in : Dousson, L., Viala, L. *Art, architecture, recherche. Regards croisés sur les processus de création*, Montpellier : L'Espérou, (coll. Carnets de la recherche), 2016.

4 S. F. Markham, *Climate and the Energy of Nations*, Londres : Oxford University Press, 1942, 144 p.

climatique dans un bon climat naturel¹. » La notion de contrôle climatique est centrale dans l'ouvrage de Markham : elle permet de déterminer le niveau des techniques mises en œuvre par les différentes « civilisations » pour tirer parti des climats présents sur leurs territoires. Pour la réédition de son ouvrage aux États-Unis en 1947, Markham ajoute un chapitre sur la climatisation à compression, qu'il présente comme la technique de contrôle climatique la plus aboutie. Il affirme que la « plus grande contribution à la civilisation de ce siècle pourrait bien être le conditionnement d'air² ». Le nom du *Climate Control Project* semble directement issu de cet ouvrage de Markham et l'expression de « contrôle climatique » sera abondamment reprise par la suite aux États-Unis, entre autres par Victor Olgyay. On la retrouve aussi en France, par exemple dans la brochure *La Face cachée du soleil*, où il est question du choix « des techniques de contrôle climatique³. » D'autres travaux tout aussi déterministes que ceux de Markham, comme ceux du géographe Ellsworth Huntington, seront également mentionnés par les protagonistes du *Climate Control Project*.

I.2.1.3. L'étude des microclimats et la traduction des données climatiques selon le *Climate Control Project*

L'intérêt historique du *House Beautiful Climate Control Project*, auquel de nombreux architectes américains associés à la conception bioclimatique et solaire passive se référeront par la suite⁴, est de deux natures : d'une part, il a largement encouragé l'étude des microclimats, à travers une multitude d'exemples concrets et de schémas, dans la continuité des travaux de Landsberg ; d'autre part il constitue le premier effort systématique d'ampleur de traduction de données climatiques sélectionnées, à travers des documents visuellement explicites et utilisables par des concepteurs. En ce qui concerne l'étude des microclimats, l'essentiel des articles présentés dans le premier numéro de *House Beautiful* consacré au projet insiste sur la diversité des climats locaux, ainsi que des microclimats. L'article de Landsberg « Comfortable

1 *Ibid.*, p. 24. Traduction personnelle, citation originale : « Civilization to a great degree depends upon climate control in a good natural climate. »

2 S. F. Markham, *Climate and the Energy of Nations*, [3ème éd.], New York : Oxford University Press, 1947, p. 208. Traduction personnelle, citation originale : « The greatest contribution to civilization in this century may well be air conditioning ».

3 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 11. Cette terminologie est reprise de l'ouvrage de Olgyay, *Design with Climate*.

4 M. J. Holtz, « Climate and Site: Influence of Passive Solar Design », p. 18-19 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings. May 18-19 1976, University of New-Mexico, Albuquerque, New Mexico*, Los Alamos : Los Alamos Scientific Laboratory, 1976. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

living depends on microclimate », que nous avons déjà évoqué, en est issu. Parmi les nombreuses contributions, l'article de James M. Fitch intitulé « How You Can Use *House Beautiful* Climate Control Project » (*Comment vous pouvez utiliser le Projet de Contrôle Climatique de House Beautiful*) présente l'essentiel du projet en insistant sur l'importance de l'aménagement dans la modification des effets microclimatiques. Il écrit par exemple :

« Vous changez le climat chaque fois que vous coupez un arbre, labourez un champ ou pavez une route. Vous changez de climat à chaque fois que vous construisez deux maisons côte à côte. Tout ce que vous faites au paysage modifie le climat de cette parcelle de terre particulière. C'est peut-être un petit changement, mais c'est définitif. Et lorsque vous ajoutez de nombreux changements de ce type ensemble, comme lorsque vous construisez une ville entière, vous créez en fait un tout nouveau climat créé par l'homme¹. »

Cet extrait insiste sur les conséquences microclimatiques des moindres choix d'aménagement et sur le caractère essentiellement irréversible des transformations occasionnées. L'influence des travaux Landsberg est ici nettement perceptible.

L'insistance sur la diversité microclimatique est redoublée d'une insistance sur la diversité des climats régionaux, recensés par Siple. Il affirme qu'il existe aux États-Unis « presque toutes les sortes de climats² », mais que « [dans] tous ces climats, nous essayons de vivre dans les mêmes types de maisons³ », ce qu'il estime incorrect. Les données météorologiques utilisées pour le *Climate Control Project* sont vraisemblablement issues des cent dix stations réparties dans tous les États-Unis et collectées par le Weather Bureau. Ces données servent également aux ingénieurs en conditionnement d'air américains (ASHVE), qui les utilisent depuis 1935⁴. Une difficulté majeure de ce projet auquel Siple et ses associés sont confrontés consiste dans la définition des régions climatiques, en raison de la multitude des stations dont les relevés définissent un climat stationnel ou local systématiquement différencié

-
- 1 J. M. Fitch, « How You Can Use *House Beautiful's* Climate Control Project », *House Beautiful*, « Climate Control », vol.91, n° 10, octobre 1949, p. 143. (Traduction personnelle). Citation personnelle : « You change the climate every time you cut down a tree, plow a field, or pave a road. You change the climate every time you build two houses site by side. Everything you do to the landscape alters the climate of that particular bit of earth. It may be a small change but its definite. And when you add many such changes together, as when you build a whole city, you actually make a brand-new, man-made climate. »
 - 2 P. A. Siple, « How many Climates do we have in the U.S.? », *House Beautiful*, « Climate Control », vol.91, n° 10, octobre 1949, p. 136.
 - 3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « We have in this country, almost every sort of climate [...]. In all these climates we try to live in the same types of houses. T'aint't right! »
 - 4 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 171.

des climats voisins¹. En première approximation, l'étude de l'ensemble des relevés météorologiques pour chaque station du territoire américain révèle l'existence de « centaines de zones² » ayant chacune un climat local caractérisé. La difficulté qui s'est présentée à Siple et ses collègues était de catégoriser ces zones selon des critères architecturalement signifiants : la centaine de climats repérée a ainsi été réduite à quinze grandes zones climatiques, dont chacune a fait l'objet d'une publication³. Chaque région climatique est alors définie comme un « centre » moyen, selon le terme de Siple, et l'éloignement de ce centre est cartographié comme une altération du climat régional moyen⁴.

Les cartes des différentes régions climatiques illustrent les variations locales en pourcentage par rapport à ce climat régional moyen, en ce qui concerne le rayonnement solaire, les précipitations, l'humidité et la température pour les mois de janvier et juillet⁵. Pour le New Jersey par exemple, des zones sont identifiées comme étant « 5 % plus sèches⁶ », moins enneigées et plus chaudes en juillet (*figure 7*). Ainsi les effets climatiques des singularités orographiques ou géographiques locales, comme l'influence des Grands Lacs sur les précipitations dans la région de l'Ohio, ou l'effet de l'altitude sur la variation des températures dans la région de Denver, étaient exprimés comme une modification du climat régional en pour cent et reportée pour chaque zone⁷. On retrouve ainsi une hiérarchie très nette entre trois échelles de phénomènes climatiques que nous avons déjà mentionnés : le microclimat, le climat local, qui apparaît comme une modification du climat régional, et le climat régional issu de la synthèse de relevés météorologiques regroupés. Siple distingue nettement le microclimat, les qualités naturelles locales comme la topographie qu'on peut assimiler au climat local, et le climat « typique d'une zone⁸ », à l'échelle régionale.

1 *Ibid.*, p. 173-174.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 174.

4 *Ibid.*

5 P. A. Siple, « 15,750,000 Americans live in this Climate », *House Beautiful*, vol.91, n°11, novembre 1949, p. 202.

6 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 174.

7 *Ibid.*

8 P. A. Siple, « American Climates », *op. cit.*, p. 17.

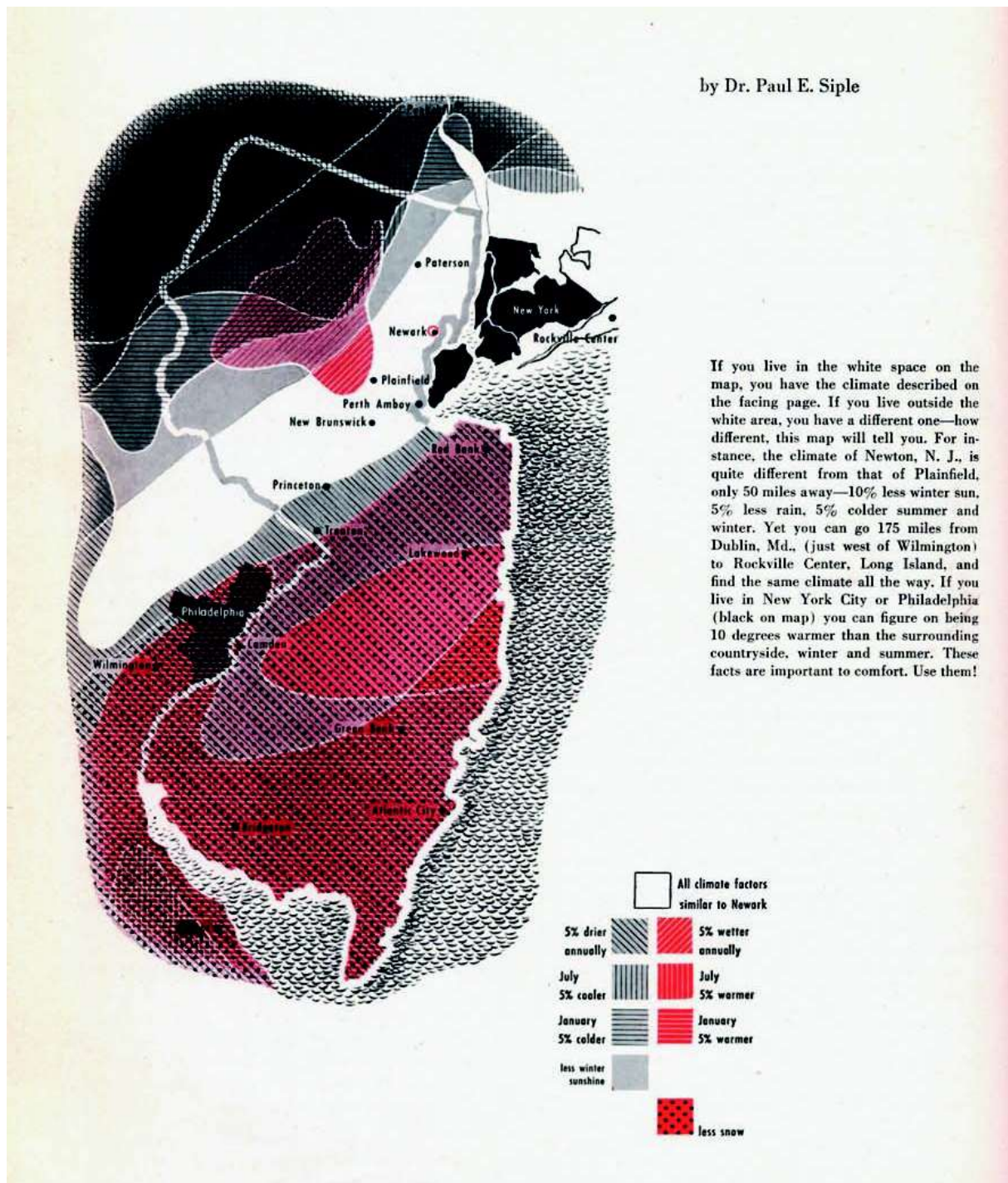


Figure 7 : Carte climatique de la zone de New Jersey publiée dans le numéro de novembre 1949 de *House Beautiful*, d'après P. E. Siple.

(D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, Princeton : Princeton University Press, 2020, p. 176)

Outre l'insistance sur l'étude des microclimats, la seconde nouveauté introduite avec le *Climate Control Project* est l'effort de traduction et de visualisation d'un maximum de données

climatiques. Les diagrammes climatiques régionaux mis au point pour le projet ont été pris comme exemple par la suite et leur clarté a été saluée¹. Si les numéros de *House Beautiful* emploient des moyens assez conventionnels, notamment des cartes, des schémas et des photographies retouchées, les *Bulletins* publiés simultanément présentent des graphiques assez complexes pour illustrer les données climatiques de chaque région. Parmi l'ensemble des données météorologiques, le problème du choix des données de températures est crucial : des valeurs moyennes tendent à niveler les oscillations de températures journalières et saisonnières, mais l'utilisation de valeurs extrêmes, comme les températures *maxima* et *minima*, tend à valoriser insidieusement les événements climatiques extrêmes qui ont été enregistrés depuis le début des relevés d'une station². L'interprétation des données météorologiques s'est appuyée sur les études proposées par la Société Américaine des Ingénieurs en Chauffage et en Ventilation (American Society of Heating and Ventilating Engineers ou ASHVE³), organisme national aux États-Unis, qui propose de présenter les événements climatiques selon leurs fréquences, suivant une distribution statistique⁴. Le but était de représenter la fréquence des événements climatiques, pour chaque mois. Les analyses climatiques proposées dans chaque *Bulletin* se décomposent ainsi en cinq facteurs et éléments climatiques pour chaque climat régional⁵ : la distribution des températures sèches et humides, la quantité de rayonnement solaire direct et diffus, sa direction ainsi que la durée de ces différents ensoleillements par rapport à une surface horizontale, la vitesse et la direction du vent, la quantité et le type de précipitations et les données d'humidité, sous forme de valeurs d'humidité relative⁶ et de valeurs de la pression de vapeur saturante⁷.

Toutes ces données sont regroupées dans de nombreux tableaux et graphiques, pour chaque mois de l'année et avec les variations horaires, suivant trois grandes catégories que sont « l'analyse thermique » (*figure 8*) qui présente les températures, « l'analyse du rayonnement solaire et du vent » (*figure 9*) et « l'analyse de l'humidité et des précipitations⁸ » (*figure 10*). La

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 24-25. J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 132.

2 P. A. Siple, « American Climates », op. cit., p. 18.

3 En 1954, cette association est devenue l'American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

4 *Ibid.*

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 24-25.

6 Pour une température donnée et dans un système défini, l'humidité relative mesure la quantité d'humidité présente dans l'air par rapport à la quantité d'humidité maximale qu'il peut contenir (point de saturation) sous la forme d'un pourcentage.

7 Pour une température donnée et dans un système défini, la pression de vapeur saturante désigne la pression à laquelle la phase liquide et gazeuse est en équilibre, où évaporation et condensation se compensent.

8 « Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful* Climate Control Project: X. Boston Area », *Supplement to Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, mars 1951, 16 p.

forme des diagrammes de températures reprend un système « en forme de feuilles¹ » pour illustrer leur fréquence (*figure 8*) et montre à lui seul tout l'effort de visualisation des données climatiques entrepris pour le *Climate Control Project*. On peut y lire la variation de la température sèche (zone hachurée) et de la température humide (zone blanche) pour chaque mois : la hauteur de chaque zone en forme de feuille représente la valeur de la température rapportée à une échelle en °F, et sa largeur illustre la fréquence de ces températures. Plus la zone est large, plus la fréquence de cette température, exprimée en pourcentage est élevée. D'un simple regard, on peut ainsi visualiser les températures extrêmes, à la pointe de chaque zone, et l'intervalle des températures moyennes, illustré par le renflement de chaque « feuille ». La moyenne annuelle des températures est également donnée dans un diagramme à part, et reprenant ce même système de zones en forme de feuille. Une échelle qualitative, allant de « très froid » à « très chaud », traduit approximativement les données numériques en sensations thermiques.

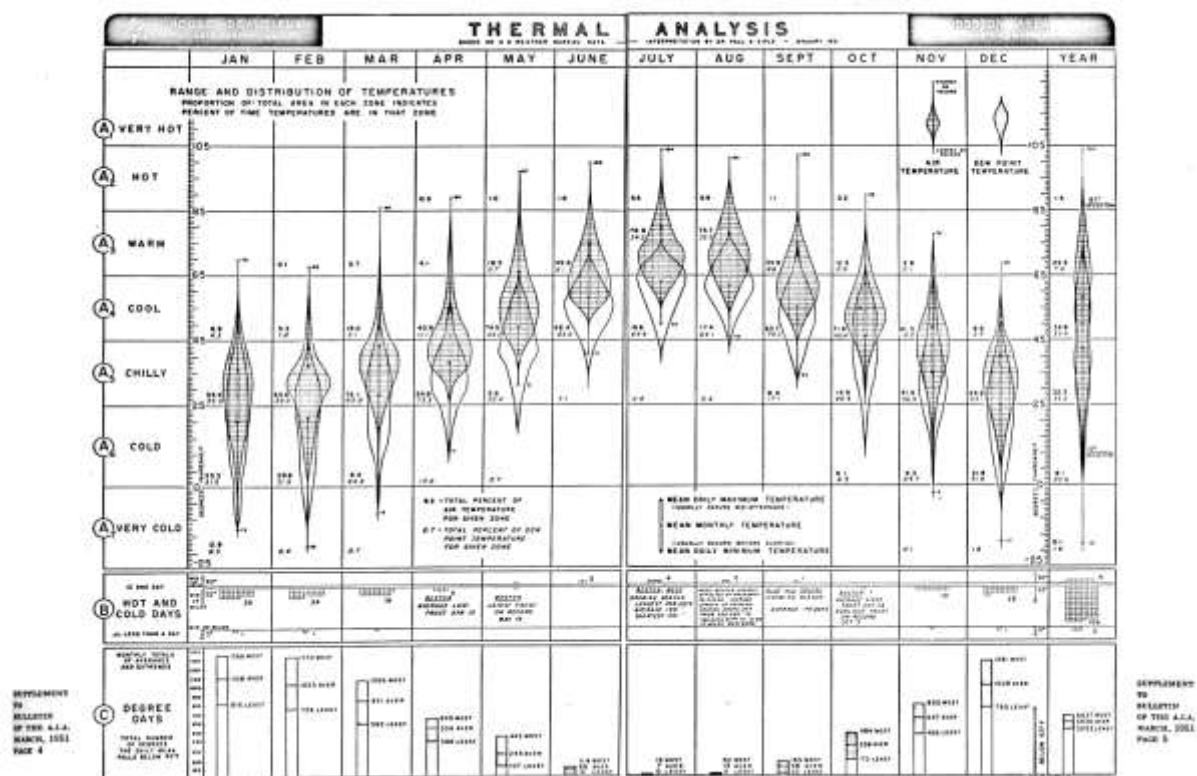


Figure 8 : Analyse thermique de la zone de Boston, publiée dans le numéro de mars 1951 du Bulletin de l'American Institute of Architects.

(« Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful* Climate Control Project: X. Boston Area », *Supplement to Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, mars 1951, p. 4-5)

1 « Climatic Summary of Ohio », *Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, septembre 1949, p. 20. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

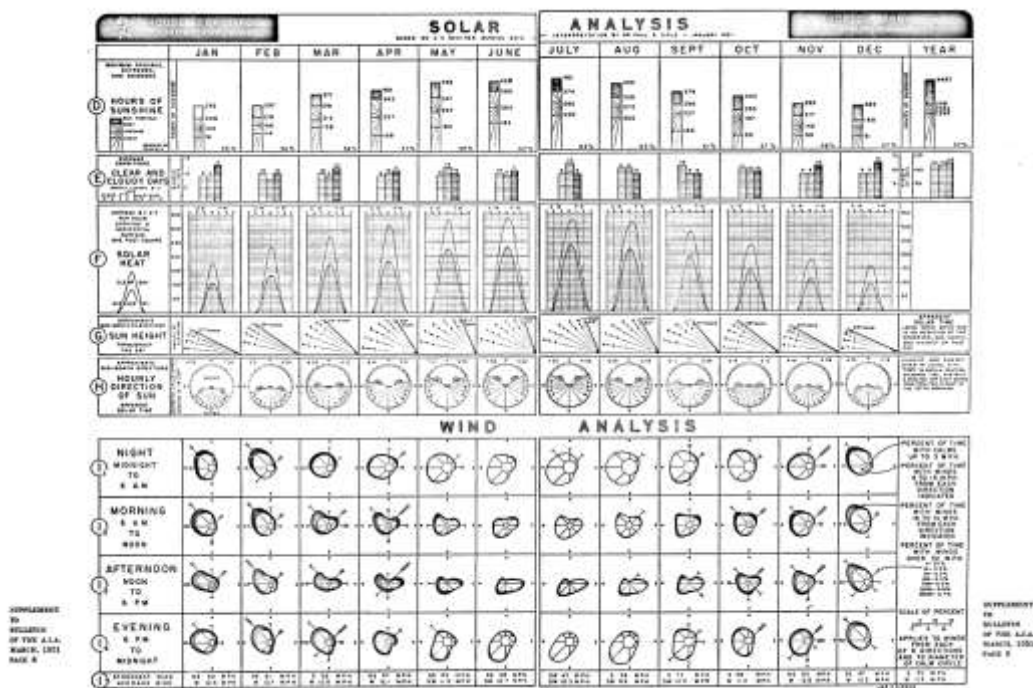


Figure 9 : Analyse du rayonnement solaire et du vent de la zone de Boston, publiée dans le numéro de mars 1951 du Bulletin de l'American Institute of Architects.

(« Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful* Climate Control Project: X. Boston Area », *Supplement to Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, mars 1951, p. 8-9)

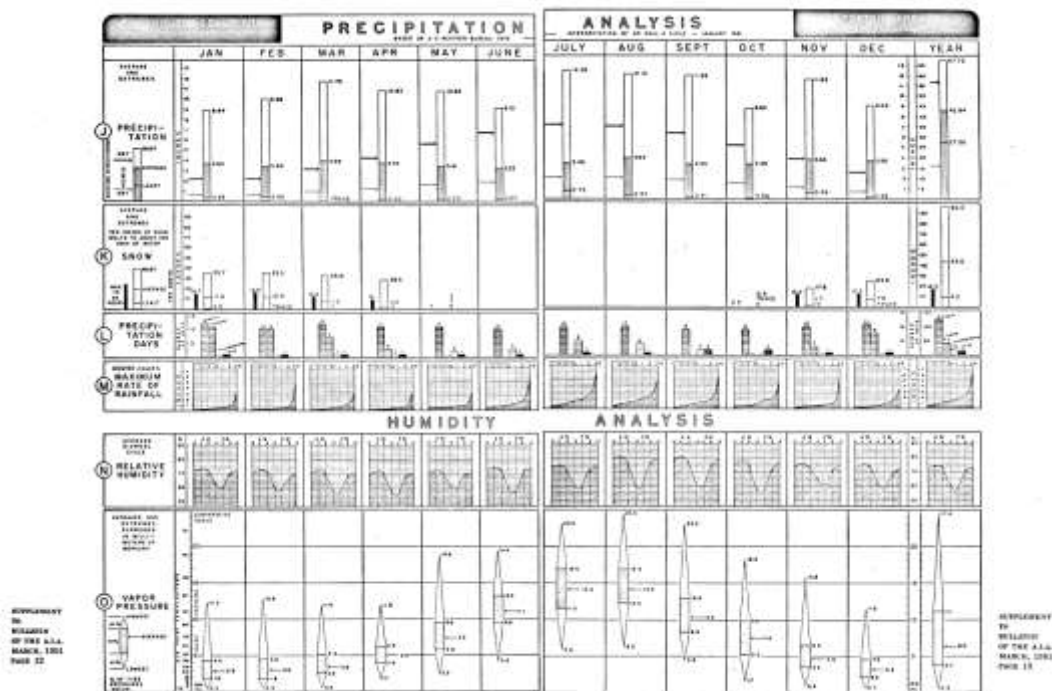


Figure 10 : Analyse de l'humidité et des précipitations de la zone de Boston, publiée dans le numéro de mars 1951 du Bulletin de l'American Institute of Architects.

(« Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful* Climate Control Project: X. Boston Area », *Supplement to Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, mars 1951, p. 12-13)

L'intérêt de ces diagrammes réside dans la résolution du problème de la représentation des données moyennes et des données extrêmes : les deux sont présentées simultanément. La moyenne n'est pas exprimée comme une valeur, mais comme une zone moyenne, symbolisée par une épaisseur plus importante correspondant à la fréquence la plus élevée. Les valeurs extrêmes sont également présentées comme des événements statistiquement exceptionnels, à la pointe de chaque zone. Ces valeurs extrêmes, issues de mesures réalisées sur au moins soixante-huit années, indiquent des événements rares qui, à ce titre, « devraient être généralement ignorés dans la conception¹ ». Elles permettent néanmoins de lire, par approximation, l'amplitude possible des variations de température pour chaque mois : plus une zone sera verticalement allongée, plus la variation des températures est importante et moins la moyenne est significative ; à l'inverse, une zone ramassée et largement étendue en largeur traduit une faible variation des températures, permettant d'utiliser avec une bonne approximation la température moyenne.

La qualité de ces documents, qui illustrent des données météorologiques complexes, constitue un travail considérable de traduction visuelle d'un climat régional dans un but opérationnel, vraisemblablement inégalé par la suite pour ce qui concerne l'architecture. L'utilisation de moyennes mensuelles a considérablement compliqué ce travail. Les autres diagrammes présentant l'analyse des autres facteurs et éléments climatiques, notamment l'analyse du rayonnement solaire suivant la variation journalière moyenne de la quantité d'énergie solaire reçue par une surface horizontale, sont tout aussi riches (*figure 9*). L'analyse de la direction et de l'intensité du vent est également complète. En pratique, toutes ces valeurs n'ont pas le même intérêt ni la même utilité. Les mesures des températures sèches et du rayonnement solaire sont les plus facilement utilisables : la mesure de l'énergie solaire reçue par une surface horizontale, donnée en BTU (British Thermal Unit) dans les documents, permet de quantifier approximativement l'apport thermique du rayonnement solaire pour une construction dont on connaît approximativement la surface de vitrage.

I.2.1.4. Le manque d'une méthode de conception à partir du climat

Mais le but du *Climate Control Project* et de la publication des données climatiques dans les *Bulletins* de l'AIA n'est pas de proposer une méthode de conception à partir de données climatiques et microclimatiques. Les recommandations d'aménagement présentées dans les

¹ *Ibid.*, p. 20.

numéros de *House Beautiful* concernent essentiellement des systèmes simples, comme les clôtures brise-vent aux abords des jardins. Dans les *Bulletins*, où les recommandations adressées à des professionnels concernent des choix techniques plus précis et dont les effets sont approximativement quantifiés, on ne trouve pas de méthodes de traduction numérique des données climatiques en dispositifs architecturaux, comme celles développées pour la conception bioclimatique par la suite¹. Les données climatiques sont très largement interprétées qualitativement et par inférence, bien que certaines données numériques sur le rayonnement solaire soient susceptibles d'une utilisation numérique, par exemple pour calculer la charge de chauffage ou de climatisation.

Mais ces méthodes de calcul, qu'on retrouve à l'époque dans les différents guides utilisés par les ingénieurs thermiciens², ne sont pas intégrées dans la méthode de conception du *Climate Control Project* : on peut en déduire que les méthodes des thermiciens ou des ingénieurs et les calculs thermiques qu'ils effectuent n'apparaissent pas encore utiles pour concevoir à partir du climat. Les interprétations de l'ensemble des données climatiques sont présentées après chaque analyse pour orienter et assister le concepteur. Elles sont rédigées par Siple, le plus souvent en collaboration avec un architecte travaillant dans la région étudiée³. On trouve ainsi trois rubriques respectivement intitulées « Données de conception basées sur l'analyse thermique » (*Design Data Based on Thermal Analysis*), « Données de conception basées sur l'analyse du soleil et du vent » (*Design Data Based on Sun and Wind Analysis*) et « Données de conception basées sur l'analyse de l'humidité » (*Design Data Based on Moisture Analysis*⁴). Ces données de conception traduisent les données climatiques en préconisations architecturales et techniques, concernant non seulement la construction, mais plus généralement le choix d'implantation ainsi que l'aménagement extérieur.

Pour chaque niveau de température (très chaud, chaud...) ou facteur climatique considéré (précipitations, humidité...), on trouve ainsi une interprétation générale, des considérations sur le choix du site et l'orientation, ainsi que pour la toiture, les murs, les

1 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 178.

2 On trouve par exemple dans le *Heating, Ventilating and Air Conditioning Guide* de 1949 deux chapitres intitulés « Heating Load » et « Cooling Load » où sont utilisées des données climatiques moyennes pour anticiper les charges de chauffage et de climatisation en fonction de la localisation. Voir *Heating, Ventilating and Air Conditioning Guide*, vol. 27, New York : American Society of Heating and Ventilating Engineers, 1949, p. 249-269, 272-324.

3 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 177.

4 « Climatic Summary of Ohio », op. cit., p. 24-25, 28-29, 32-33. « Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful Climate Control Project: X. Boston Area* », op. cit. p. 6-7, 10-11, 14-15.

ouvertures et les fondations. On trouve aussi des recommandations relatives à l'utilisation de moyens mécaniques (chauffage ou climatisation). Pour le climat de Boston par exemple, les recommandations concernent le choix des matériaux en toiture à partir de l'analyse de la température et du rayonnement solaire pour les périodes très chaudes : puisque « [les] matériaux de construction exposés au soleil direct doivent résister à des cycles répétés et continus de 4 heures à des températures jusqu'à 160 °F [≈ 71 °C]¹ », il est suggéré de choisir une toiture et des murs de « couleur claire » avec une « isolation d'au moins 4" [≈ 10 cm] et lame d'air². » Cette recommandation prend en compte les problèmes microclimatiques des températures de surfaces exposées au rayonnement solaire, que nous avons évoqués précédemment. Toutes les recommandations présentées dans ces sections sur les données de conception sont étayées par les données climatiques présentées : elles permettent progressivement de dimensionner une construction, en suivant les choix techniques recommandés, jusque dans le détail des matériaux résistants à l'oxydation dans les régions humides³.

À travers ces recommandations, le concepteur peut se constituer une image virtuelle d'une construction adaptée au climat qui est étudié. Cette continuité directe entre des données climatiques et des recommandations architecturales, qui engagent des choix techniques justifiés par un climat donné, caractérise la conception à partir du climat, dont le *Climate Control Project* est le premier exemple systématique. Mais l'importance des données climatiques et de leur présentation ne doit pas masquer la variabilité des microclimats locaux. Dans le texte introduisant le premier *Bulletin* de l'AIA consacré au projet où sont présentées les données climatiques de l'Ohio, Siple insiste sur l'importance d'une étude du microclimat et du site d'implantation. En plus de souligner la nécessaire interprétation des données météorologiques régionales, Siple ne manque pas de rappeler le caractère « arbitraire » de certaines mesures et en appelle au « jugement⁴ » de l'architecte dans la prise en compte des variations locales et des phénomènes microclimatiques. Dans d'autres articles, il regrette le fait que les architectes

1 « Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful* Climate Control Project: X. Boston Area », *op. cit.* p. 7.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Building materials subject to direct sun should withstand repeated cycles of 4-hr continuous temps as high as 160° [...] Light color roof & walls, former, with at least 4" insulation & air space. »

3 *Ibid.*, p. 15.

4 P. A. Siple, « American Climates », *op. cit.*, p. 18.

négligent systématiquement certains facteurs microclimatiques déterminants, comme l'angle d'incidence du rayonnement solaire en hiver et en été¹.

Siple insiste également sur l'importance des compromis entre des recommandations proposées. Il prend l'exemple théorique d'une maison construite dans un État du nord qui nécessite une protection contre le froid pendant 75 % de l'année, et une protection contre la chaleur pendant seulement 25 %². Il est logique de concevoir cette construction comme essentiellement protégée du froid³, par exemple en limitant les effets du vent, en augmentant l'isolation et en réduisant l'inertie, mais ces dispositions pourront être défavorables pendant les périodes de chaleur qui représentent 25 % de l'année : le compromis est donc inévitable et nécessite l'expertise de l'architecte. L'importance du compromis s'explique par les variations annuelles importantes des climats tempérés et sera un souci constant de la conception à partir du climat, ainsi que de la conception bioclimatique par la suite. Les variations climatiques et les compromis qu'elles appellent encourageront par la suite le développement de systèmes réversibles ou saisonniers, tirant parti de ces variations.

L'ampleur du travail et la qualité de la documentation proposée dans le *Climate Control Project* marquent le premier intérêt significatif pour l'intégration des données climatiques et la traduction visuelle des données météorologiques afin d'offrir aux concepteurs les données nécessaires pour concevoir à partir du climat. Ce projet a également largement contribué à la popularisation de l'expression de « contrôle climatique ». Cependant, le *House Beautiful Climate Control Project* a échoué à fonder une méthode de conception à partir des phénomènes climatiques et microclimatiques. Le projet est largement imprégné des méthodes de la climatologie appliquée : les données météorologiques et climatiques sont largement interprétées par des climatologues qui émettent des préconisations, non par des architectes ou des ingénieurs. Malgré l'effort de visualisation des données climatiques, l'architecte n'est pas en position d'interpréter lui-même ces données. Comme le note justement l'historien Daniel Barber, « un mécanisme pour l'interprétation⁴ » des données climatiques présentées dans les publications du *Climate Control Project* « restait à prévoir⁵ » et manque à l'ensemble du projet. De plus, la

1 P. A. Siple, « Climatic Criteria for Building Construction », *Proceedings of the Research Correlation Conference on Weather and the Building Industry*, Washington : National Academy of Sciences, 1950, p. 8. Voir : D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 178.

2 P. A. Siple, « American Climates », *op. cit.*, p. 17-18.

3 *Ibid.*

4 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 178.

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Although the data were clear, a mechanism for their interpretation into a usable architecture remained wanting »

relative complexité des données climatiques présentées et la difficulté pour prendre en compte l'ensemble des préconisations qui en découlent rendent délicate l'élaboration d'un projet concret. À partir de 1952, date à laquelle paraissent les derniers numéros de *House Beautiful* consacrés au projet, on peut considérer que l'essentiel des données météorologiques et des phénomènes climatiques considérés comme signifiants pour l'architecture sont établis. Les analyses des microclimats, ainsi que des climats locaux et régionaux, apparaissent comme complémentaires. La collecte des données météorologiques de la station la plus proche du site d'implantation envisagé pour une construction est présentée comme nécessaire à tout projet architectural soucieux de prendre en compte le climat. Les bases d'une traduction visuelle de ces données sont également posées, permettant d'envisager une approche qualitative de données initialement quantitatives. Les développements ultérieurs relatifs à la conception à partir du climat seront essentiellement consacrés à élaborer une véritable méthode de conception à partir de ces éléments et directement accessible à l'architecte.

I.2.2. Jeffrey E. Aronin et l'idée d'une « airchitecture »

I.2.2.1. De l'architecture à « l'airchitecture »

Le projet d'une méthode de conception en architecture à partir du climat, encore latente dans le *Climate Control Project*, s'est progressivement développé par la suite. Mis à part les quelques préconisations disponibles dans l'ouvrage de Fitch, et des articles moins largement diffusés, le développement des connaissances en microclimatologie appliquée à l'habitat n'a pas engagé de recherches systématiques pour produire une méthode générale de conception à partir du climat. Les souhaits de Landsberg et de Fitch d'une collaboration entre architecte et climatologue s'étaient essentiellement orientés dans le sens d'une climatologie appliquée à l'architecture. Il faut attendre 1953 et la publication de l'ouvrage *Climate & Architecture* de l'architecte canadien Jeffrey Ellis Aronin pour qu'émerge en architecture la volonté de produire une méthode de conception intégrant systématiquement des données climatiques et microclimatiques. Cet ouvrage, issu d'une thèse présentée en 1951 à l'Université McGill à Montréal¹, synthétise non seulement les travaux évoqués précédemment de Geiger, Landsberg et Fitch, mais également tout un ensemble de travaux plus spécifiques, réalisés dans différentes

1 J. E. Aronin, *Climate and Architecture: with Special Reference to Montreal and Surroundings*, Thèse, Université McGill, Montréal, 1951, 528 p.

régions du monde. De par l'ampleur des connaissances qu'il présente, ainsi que l'abondance de sa bibliographie commentée, il peut être considéré comme la synthèse la plus complète sur les rapports entre l'architecture et le climat de cette période.

L'idée directrice d'Aronin est que la prise en compte du climat et surtout du microclimat en architecture amène le développement d'une « nouvelle science » appliquée qu'il nomme « *airchitecture*¹ ». Cette nouveauté est selon lui toute relative, puisqu'il affirme que la « conception et l'orientation des bâtiments par rapport au climat sont un art ancien² », bien que ce soit « en même temps un art perdu que l'homme moderne ne connaît pas³. » L'enjeu principal pour restaurer cet art de la conception à partir du climat consiste selon lui à importer les connaissances développées par les climatologues et les microclimatologues dans le champ de l'architecture, afin de pouvoir les enseigner et les transmettre aux étudiants comme aux praticiens expérimentés. C'est le but de l'ouvrage *Climate & Architecture* :

« L'objet de ce livre est donc de familiariser les architectes, les étudiants en architecture, les ingénieurs, les urbanistes, les constructeurs, les propriétaires actuels et potentiels, et d'autres — en particulier ceux d'Amérique du Nord — avec les exigences et les phénomènes climatiques à grande et petite échelle, connus respectivement sous le nom de macroclimat et de microclimat, et de leur expliquer comment appliquer ces connaissances à la conception et à l'orientation des bâtiments et des villes⁴. »

Le but d'Aronin est de mettre à disposition des connaissances relatives aux phénomènes climatiques à différentes échelles. Il évite volontairement les considérations relatives aux matériaux, afin de traiter le plus complètement possible des découvertes faites en climatologie et en microclimatologie qui intéressent directement les architectes.

La constitution de cette connaissance passe cependant par une reprise des savoirs et des méthodes développés par les climatologues et microclimatologues. On remarque dans la

1 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. IX.

2 *Ibid.*, p. IX.

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The designing and orienting of buildings with respect to climate is an old art; many years ago primitive peoples learned by trial and error the influences of weather in their dwelling designs. But it is at the same time a lost art that modern man does not know. »

4 *Ibid.*, p. X. Traduction personnelle, citation originale : « The object of this book, therefore, is to acquaint architects, architectural students, engineers, city planners, builders, present and prospective home owners, and others – especially those in North America – with the demands and phenomena of the large- and small-scale climate, known respectively as the macroclimate and the microclimate; and to inform them how to apply this knowledge to the design and orientation of buildings and towns. »

terminologie de l'extrait présenté précédemment qu'Aronin reprend la distinction opérée par Geiger entre « microclimat » et « macroclimat ». L'ensemble de l'ouvrage *Climate & Architecture* s'appuie très largement sur les travaux de Geiger et son traité sur les climats près du sol est abondamment cité et repris. Il est possible d'affirmer que l'ouvrage d'Aronin traduit directement dans le domaine de l'architecture les savoirs développés en microclimatologie. Par souci pédagogique, l'ouvrage *Climate & Architecture* est organisé selon un « ordre logique¹ » suivant des chapitres qui présentent séparément les facteurs climatiques, bien que l'auteur rappelle qu'ils n'existent jamais isolément puisqu'ils sont en constante interaction. Chaque chapitre correspond ainsi à un facteur climatique : le soleil, la température, le vent, les précipitations et un dernier qui regroupe les autres facteurs climatiques, comme l'humidité. Cette présentation des phénomènes climatiques sous forme de chapitres suit un ordre d'importance décroissant : le rayonnement solaire, qui est le facteur climatique principal à l'origine des différences de températures et du mouvement des masses d'air, est ainsi présenté en premier. L'ensemble de ces chapitres est précédé d'une abondante enquête historique, qui retrace avec érudition les rapports entre architecture et climat à partir des formes d'habitats les plus primitives². Il mentionne, entre autres, des études sur la construction des igloos³, l'intérêt souvent rappelé que Vitruve portait à la connaissance du climat⁴, ainsi que les recherches disparates menées durant la première moitié du XX^e siècle sur la prise en compte du climat en architecture⁵.

Le chapitre consacré à l'énergie solaire s'ouvre sur le diagramme de la distribution du rayonnement solaire à midi en été qui est issu de l'ouvrage de Geiger *The Climate Near the Ground* (figure 1, p. 40). Aronin le commente en ces termes :

« Nous voyons qu'une partie considérable de l'énergie du soleil est réfléchiée dans l'espace avant même qu'elle n'atteigne le sol. Cependant, environ un tiers de celle-ci atteint la surface de la Terre et est rapidement transformé en d'autres types d'énergie. L'évaporation, la convection, la conduction thermique, la pseudo-conduction radiative, la réflexion et le rayonnement se produisent⁶. »

1 *Ibid.*, p. X.

2 « Background », *ibid.*, p. 1-26.

3 *Ibid.*, p. 3-4.

4 *Ibid.*, p. 11-15.

5 *Ibid.*, p. 22-26

6 *Ibid.*, p. 28. Traduction personnelle, citation originale : « We see that a considerable portion of the sun's energy is reflected back into space before it even reaches the ground. However, about one-third of it hits the

Il poursuit en précisant que la quantité de rayonnement reçue par une surface dépend de nombreux facteurs, comme la position du soleil selon l'heure de la journée et la saison, la nébulosité, ainsi que l'angle et la direction de la pente. Il termine cette énumération en affirmant que « [cela] intéresse l'architecte, car l'architecte devrait comprendre les influences du soleil et comment elles peuvent profiter à son travail¹. »

Aronin passe ensuite en revue l'ensemble des méthodes graphiques et des diagrammes solaires développés par des architectes ou des entreprises pour modéliser la course du soleil disponible à l'époque². Ces diagrammes permettent de représenter la trajectoire du soleil, son altitude, ainsi que l'azimut en fonction des saisons. Ces outils graphiques permettent de déterminer l'angle d'incidence du rayonnement solaire, mais également la taille et la position des ombres sur une surface ou un vitrage. Dans la mesure où la course du soleil varie avec la latitude, chacun de ces diagrammes est conçu pour une latitude déterminée. Le but de l'ouvrage d'Aronin n'est pas de présenter leur utilisation, mais la diversité des diagrammes existants. En plus des outils graphiques, Aronin présente un ensemble de méthodes tridimensionnelles pour l'étude du rayonnement solaire, permettant d'utiliser des maquettes³, comme le *Solarscope* ou l'*Artificial Sky*, qui intègrent de sources lumineuses artificielles afin de simuler le rayonnement solaire. Dans le même principe, on trouve les *Heliodons*, inventés en 1928 en Angleterre à la Building Research Station⁴. Ces outils permettent de simuler la course du soleil sur une maquette pour toutes les saisons, à l'aide d'une source artificielle de lumière. La difficulté est qu'une source artificielle est ponctuelle et produit donc un rayonnement lumineux divergent, alors que le rayonnement solaire est considéré comme parallèle en tout point du globe.

Ces outils, souvent assez anciens et mis au point indépendamment, présentent des méthodes de résolutions essentiellement analogiques. L'usage de maquettes ou la mesure des angles d'incidence du rayonnement solaire à l'aide d'un diagramme, permettent de produire une image analogique de l'ensoleillement réel. L'usage de ces outils nécessite une compréhension minimale de la géométrie de la trajectoire du soleil à partir d'un référentiel géo-

earth's surface and is promptly transformed to other types of energy. Evaporation, convection, heat conduction, radiative pseudo-conduction, reflection and radiation occur. »

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « This is of interest to the architect; for the architect should understand the influences of the sun and how they can benefit his work. »

2 *Ibid.*, p. 31-38.

3 *Ibid.*, p. 39-45.

4 J.-H. Chang, *A Genealogy of Tropical Architecture. Colonial Networks, Nature and Technoscience*, Londres/New York : Routledge, 2016, p. 181.

centré. Il ne s'agit pas d'outils de simulation ni de modélisation, puisqu'ils ne donnent qu'une image approchée des phénomènes en jeu, nécessitant certaines corrections. La majorité de ces outils ont été produits pour des applications techniques particulières, certains diagrammes solaires sont ainsi fournis par des fabricants de vitrages, comme le *Sun Angle Calculator* de la Libbey-Owens-Ford Glass Company qui est régulièrement mentionné¹.

Une grande partie des outils graphiques (*Soldiagram*) et tridimensionnels (*Little Sundial*, *Artificial Sky*) mentionnés par Aronin ont été développés par l'architecte suédois Gunnar Pleijel, au sein du Royal Institute of Technology de Stockholm. Pleijel avait publié entre 1949 et 1951 de nombreuses études en suédois sur l'ensoleillement et la lumière naturelle², ce qui l'avait conduit à développer ces différents outils d'étude géométrique de l'ensoleillement. Ses études seront synthétisées dans son ouvrage de 1954 : *The Computation of Natural Radiation in Architecture and Town Planning*³. Aronin mentionne également les méthodes statistiques pour mesurer l'ensoleillement qui reprennent les facteurs présentés dans les diagrammes solaires, notamment la latitude du lieu, l'azimut et l'altitude du soleil, mais impliquent un calcul complexe pour établir le temps local à partir du temps solaire. C'est à l'occasion de considérations relatives à l'utilisation des durées d'ensoleillement, qui dépendent de la nébulosité du ciel, qu'Aronin mentionne explicitement, et pour la première fois, les travaux de Geiger à propos de l'exposition au rayonnement solaire des différentes façades d'une construction en fonction d'une saison⁴. Il croise les données rapportées par Geiger à celles collectées par Gunnar Pleijel, qui sont relatives à l'ensoleillement reçu par les façades nord et sud aux solstices et aux équinoxes⁵.

Parmi les facteurs qui rendent désirable l'utilisation du rayonnement solaire dans la construction, Aronin mentionne en premier lieu ses propriétés bactéricides et sanitaires, ensuite son rôle dans la ventilation des locaux, et son utilisation possible pour le chauffage des habitations, en terminant par les effets psychologiques bénéfiques de la lumière naturelle⁶. Il est remarquable qu'Aronin avance en premier lieu des raisons essentiellement hygiénistes, l'apport énergétique du rayonnement solaire n'étant que subsidiaire. Il note cependant que les

1 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 55.

2 *Ibid.*, p. 292.

3 G. Pleijel, *The Computation of Natural Radiation in Architecture and Town Planning*, Stockholm : Statens nämnd för byggnadsforskning, 1954, 155 p.

4 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 57.

5 *Ibid.*, p. 58

6 *Ibid.*, p. 61.

recherches sur les effets physiologiques du climat pourraient être développées dans le futur¹. Il semblerait qu'Aronin n'ait pas eu connaissance des travaux de F. C. Houghton et C. P. Yaglou, sur la température effective et la détermination du confort thermique, qui datent du milieu des années 1920². Son approche essentiellement hygiéniste du climat traduit la prégnance des études physiologiques et médicales sur les effets du climat sur l'homme de la fin du XIX^e siècle³. Ces études ont influencé les architectes du mouvement moderne dans la première partie du XX^e siècle⁴, au nom de ce que l'on peut nommer la « climatothérapie⁵ », représentée en France par les travaux de l'ingénieur André Missenard⁶. Le Corbusier sera notamment amené à correspondre et à collaborer sur ces sujets avec Missenard, avec qui il met au point sa « Grille climatique⁷ » dès 1951 sur une idée de Iannis Xenakis pour l'aménagement de Chandigarh. Cet outil, conçu pour faciliter la prise en compte des facteurs climatiques selon une perspective essentiellement hygiéniste et sanitaire, n'a eu qu'un usage très limité et sera rapidement abandonné⁸.

Outre cet intérêt hygiéniste pour l'ensoleillement, Aronin fait aussi référence au mouvement moderne et aux éléments qu'elle a contribué à diffuser comme le brise-soleil, inventé par Stamo Papadaki en 1921, qui a été ensuite repris et développé par Le Corbusier⁹. Certaines réalisations de Richard Neutra sont également évoquées¹⁰. La plupart des réalisations qu'il mentionne sont des constructions reprenant le style et les techniques de construction de l'architecture moderne, tout en utilisant un certain nombre de protections solaires (brise-soleil, persiennes, auvents, jalousies, balcons...) souvent massives. En plus de ces références, Aronin présente de nombreuses réalisations des maisons dites « solaires », conçues pour capter et accumuler le rayonnement solaire en vue de subvenir aux besoins de chauffage. Parmi les réalisations qu'il mentionne, on trouve la *Dover Sun House* de Mária Telkes et les réalisations

1 *Ibid.*, p. 280.

2 V. Olgyay, *Design with Climate, op. cit.*, p. 187.

3 D. Siret, « Rayonnement solaire et environnement urbain : de l'héliotropisme au désenchantement, histoire et enjeux d'une relation complexe », [en ligne], *Développement durable et territoires*, vol. 4, n°2, « Santé et environnement », juillet 2013, p. 4-7.

4 *Ibid.*, p. 7.

5 E. Duhot, *Les Climats et l'organisme humain*, PUF : Paris, (coll. Que sais-je ?), 1945, p. 87-97.

6 A. Missenard, *L'Homme et le climat*, Paris : Plon, 1937, 270 p.

7 D. Siret. « 1950 - Grille climatique (Chandigarh) », *Le Corbusier Plans*, Fondation Le Corbusier, DVD n°11, février 2006 ; I. Requena-Ruiz, « Building Artificial Climates. Thermal control and comfort in Modern Architecture (1930-1960) », [en ligne], *Ambiances*, 2, « Ambiance et histoire de l'architecture : l'expérience et l'imaginaire sensibles de l'environnement construit », 2016, p. 9-10.

8 *Ibid.*, p. 11.

9 J. E. Aronin, *Climate & Architecture, op. cit.*, p. 83

10 *Ibid.*, p. 89.

de George O. G. Löf¹. Ces maisons solaires, dont Anthony Denzer² et Daniel Barber ont récemment retracé l'histoire³, auront une influence sur l'évolution des systèmes de captage solaire que nous évoquerons dans la partie suivante.

I.2.2.2. Interpréter la microclimatologie du point de vue de l'architecture

L'ouvrage d'Aronin croise donc ces nombreuses références. Mais l'originalité de son projet d'une « airchitecture » est qu'il subsume ces références architecturales à l'application des connaissances relatives aux microclimats. Ainsi, il place dans la continuité de l'étude des réalisations modernes, utilisant de nombreuses protections solaires solides et immobiles, une longue étude sur les protections solaires naturelles, notamment les choix judicieux de plantes décidues (plantes grimpantes, arbres, arbustes à feuilles caduques), dont la chute et la croissance des feuilles suivent les besoins saisonniers en rayonnement solaire⁴. Ainsi les feuilles protègent les constructions en été, alors qu'en hiver leur chute permet de laisser passer le rayonnement solaire. L'étude présentée par Aronin, appuyée sur l'expertise de botanistes, consiste à passer en revue de nombreuses espèces de plantes grimpantes et d'arbres pour en énumérer les qualités⁵. L'usage de la végétation à feuilles caduques est intégré dans la continuité des moyens architecturaux de protection contre le rayonnement solaire, d'autant que leurs effets sur la température, les mouvements d'air et les précipitations sont notables⁶. L'étude des protections végétales est l'occasion pour Aronin de mentionner les propos de Geiger sur la forme et le profil des feuilles de certaines plantes, dont la couleur et la position varient en fonction de l'ensoleillement recherché, jusqu'au cactus où la structure en touffes d'épines minimise l'impact du rayonnement solaire direct⁷. De ces considérations du climatologue sur le phototropisme des feuilles, Aronin en déduit des enseignements pour l'architecte : il affirme par exemple que « [l'architecte] peut en conséquence logiquement doter ces surfaces qui

1 *Ibid.*, p. 74-75.

2 A. Denzer, *The Solar House: Pioneering Sustainable Design*, *op. cit.*

3 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, *op. cit.*

4 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 94-100.

5 *Ibid.*, p. 94.

6 *Ibid.*, p. 100.

7 *Ibid.*, p. 104.

reçoivent un maximum de rayonnement avec des surfaces ondulées [...] s'il souhaite réduire les effets de ce rayonnement¹. »

Cet effort qui consiste à déduire des prescriptions pour l'architecte à partir de la connaissance des phénomènes microclimatiques, issues le plus souvent de l'ouvrage de Geiger, est caractéristique de la démarche d'Aronin. Dans le chapitre consacré aux températures, il évoque les travaux de Geiger relatifs au rayonnement dans l'infrarouge lointain d'une surface en fonction de la portion de la voûte céleste « vue » par la surface qui rayonne. Il cite tout d'abord les propos de Geiger :

« [Nous] apprenons de R. Geiger que : "Le rayonnement est le plus fort vers le zénith, car l'atmosphère est de moindre épaisseur dans cette direction. Plus l'appareil enregistreur de rayonnement est incliné vers l'horizon, plus le rayonnement réfléchi est effectif. Directement vers l'horizon, le rayonnement sortant est nul²." »

De la mesure du rayonnement infrarouge en fonction de l'orientation vers la voûte céleste évoquée par Geiger, Aronin en déduit directement des considérations architecturales sur la forme du plan et des toitures :

« Ces données suggèrent, ou nous amèneraient à penser, que là où nous voulons minimiser les pertes de chaleur, nous devrions concevoir des bâtiments avec une surface horizontale minimale. La valeur des formes traditionnelles devient apparente. Les bâtiments rectangulaires subissent moins de pertes de chaleur par rayonnement que ceux de forme irrégulière et qui s'étalent à la manière d'un "ranch" sur une grande parcelle de terrain³. »

On voit à travers ce passage s'opérer une déduction à partir de la prise de conscience d'un phénomène microclimatique, qui aboutit à des considérations qui possèdent une signification

1 *Ibid.*, p. 104-105. Traduction personnelle, citation originale : « The architect may in consequence logically provide those surfaces which receive a maximum of radiation with corrugated surfaces [...] if he desires to cut down on the effects of this radiation. »

2 *Ibid.*, p. 138. Traduction personnelle, citation originale : « we learn from R. Geiger that: "Radiation is strongest toward the zenith, because the atmosphere is of least thickness in that direction. The more the radiation recorder is inclined to the horizon, the more effective is the counter-radiation. Directly toward the horizon the outgoing radiation is zero." »

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « This data suggests, or would lead us to think, that where we want to minimize heat loss we should design buildings with a minimum horizontal surface area. The value of traditional forms becomes apparent. Rectangular buildings suffer lower heat loss through radiation than those of irregular shape and which sprawl in "ranch-type" fashion over a large piece of land. »

en architecture. La microclimatologie fournit des critères de conception à l'architecte. À partir des données mentionnées par Geiger, Aronin peut avancer une critique de la typologie des toitures-terrasses, un des cinq points de l'architecture nouvelle selon Le Corbusier¹, et caractéristique du style moderne en architecture. Corrélativement, ces données suggèrent une valorisation des formes traditionnelles, notamment des toitures à double ou multiples pans. On ne lit aucun déterminisme dans l'argumentation d'Aronin, les considérations complexes sur la mesure du rayonnement infrarouge n'ont aucunement pu influencer de manière directe la forme des toitures traditionnelles : pour lui, ce n'est qu'*a posteriori* et rétrospectivement qu'on découvre la cohérence des typologies de toitures traditionnelles.

On doit à Aronin, et à son projet d'une « airchitecture », cette interprétation directe en architecture des phénomènes microclimatiques mis en évidence par Geiger, mais aussi par d'autres microclimatologues. Sa démarche déborde cependant la simple application des travaux de microclimatologie, puisqu'il a réalisé avec ses propres moyens de nombreuses mesures microclimatiques. Il consacre notamment le début du chapitre sur la température à détailler les thermomètres et appareils enregistreurs qu'il utilise, ainsi que les précautions à prendre pour réaliser l'étalonnage et la mesure la plus fiable possible des températures d'une localité². Il a notamment réalisé à l'aide d'un thermomètre à mercure une mesure des températures du microclimat de Montréal, le thermomètre étant fixé en hauteur sur le capot d'une voiture, celle-ci étant arrêtée pendant cinq minutes à intervalles réguliers afin de réaliser et de noter la mesure³. Aronin précise que l'emplacement du thermomètre, pourtant protégé de la chaleur dégagée par le moteur, a pu fausser certaines valeurs. Il admet avoir réalisé une autre série de mesures où celui-ci était placé à l'écart du véhicule⁴. Ce protocole de mesure en véhicule utilisé par Aronin était proposé par Geiger, qui suggérait également d'utiliser une bicyclette⁵ ; c'est ce même protocole de mesure mobile qui a été utilisé pour déterminer les températures de Toronto par Middleton et Millar en 1936. Ce souci de reprendre non seulement les données, mais aussi les méthodes des microclimatologues, et notamment leurs protocoles de mesure, témoigne d'une volonté d'assimiler le plus complètement possible ce domaine scientifique à l'architecture. Pour

1 Le Corbusier, P. Jeanneret, « Les 5 points d'une architecture nouvelle », *Œuvres complètes 1910-1929*, vol. 1, Erlenbach/Zurich : Les Éditions d'Architecture, 1948, p. 128. La justification de la forme du toit-terrasse est incohérente du point de vue physique, au regard des mesures fournis par Geiger, puisqu'on trouve écrit : « Vérité irrécusable : les climats froids imposent la suppression de comble incliné ».

2 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 116-117.

3 *Ibid.*, p. 156

4 *Ibid.*

5 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, *op. cit.*, p. 379.

Aronin, l'architecte doit avant tout être un climatologue, avant d'être un spécialiste d'autres disciplines qu'il considère comme étant de moindre importance, comme les sciences de l'ingénieur¹. L'appropriation des méthodes des microclimatologues s'inscrit dans cette perspective.

I.2.2.3. L'importance des mouvements de l'air et de la ventilation

Aronin se différencie cependant des travaux précédents en microclimatologie par l'importance qu'il accorde aux mouvements de l'air, notamment au vent, ainsi qu'aux précipitations. Cela tient au fait que sa thèse présentée en 1951 se concentrait essentiellement sur les climats à dominante froide, comme celui de Montréal², où les précipitations neigeuses sont importantes et mobilisent des moyens spécifiques comme les clôtures à neige³. La synthèse qu'il propose des connaissances sur les mouvements et les écoulements de l'air à l'échelle microclimatique s'étend au-delà de l'architecture et prend en compte l'aménagement extérieur. L'intérêt des brise-vent pour la protection des cultures était déjà évoqué dans les travaux précédents en microclimatologie, mais leur rôle sur la réduction des besoins de chauffage des habitations exposées au vent est également notable et a fait l'objet d'études expérimentales depuis les travaux de Geiger. Aronin s'appuie sur les expérimentations menées par l'ingénieur forestier Raphael Zon, qui a effectué des mesures sur des prototypes de maisons différemment abritées⁴. Zon relate cette expérimentation en 1941 dans le colossal ouvrage *Climate and Man*, somme de plus de mille deux cents pages qui regroupe l'ensemble des connaissances en climatologie et microclimatologie appliquée à l'agriculture de l'époque⁵. Aronin cite directement les résultats de Zon :

« En hiver, en réduisant la vitesse du vent de cinquante pour cent, et en réduisant par conséquent les pertes de chaleur par rayonnement [*sic*] et infiltration, les brise-vent peuvent réduire la consommation de combustible dans les fermes jusqu'à trente pour cent. De tels résultats ont été

1 J. E. Aronin, *Climate & Architecture, op. cit.*, p. IX.

2 *Ibid.*, p. 225-270.

3 *Ibid.*, p. 241-246.

4 *Idid.*, p. 192.

5 R. Zon, « Climate and the Nation's Forests », in : G. Hambidge (éd.), *Climate and Man. Yearbook of Agriculture 1941*, Washington : United States Department of Agriculture, 1941, p. 477-498.

obtenus avec des maisons-tests, dont certaines étaient protégées par des brise-vent et d'autres exposées au vent, la température intérieure étant maintenue à environ 70 °F [≈ 21 °C]¹. »

Ce type d'expérimentation à grande échelle, et la possibilité d'appareiller des constructions pour en mesurer la consommation en fonction de l'exposition aux vents possède un intérêt certain : il permet de produire des résultats probants basés sur la comparaison avec des constructions témoins. En pratique ce type de mesure est réalisé de la manière suivante : les maisons sont constamment chauffées à 21 °C, si elles sont toutes identiques, construites avec les mêmes matériaux et qu'on néglige leurs petites différences, leurs pertes de chaleur sont directement fonction de leur exposition au vent. Pour mesurer la différence de leur consommation, on enregistre la quantité de combustible nécessaire pour maintenir les constructions à 21 °C. Les maisons les moins bien exposées sont en théorie celles où la consommation de combustible est la plus importante. Le principe de ce type de mesure se retrouve dans les anémomètres à fil chaud, qui permettent de mesurer la vitesse du vent : le fil de l'appareil est chauffé à une température de référence via l'effet Joule, en mesurant la tension du courant nécessaire pour maintenir sa température on déduit la vitesse de l'air au voisinage du fil et, par extension, la vitesse du vent au lieu où est effectué la mesure.

En ce qui concerne plus spécifiquement les problèmes du vent et de la ventilation en architecture, Aronin s'appuie sur des travaux concernant la modélisation des mouvements aérauliques qui n'étaient vraisemblablement pas connus de Geiger, Landsberg ou Siple. Il reprend en particulier les recherches menées au Texas Engineering Experiment Station de l'Université A&M du Texas commencées en septembre 1949 sur la modélisation des mouvements aérauliques en soufflerie à faible vitesse. Cet organisme avait auparavant travaillé sur l'étude des propriétés thermiques des matériaux intérieurs et extérieurs en régime variable² (parfois nommé régime transitoire). Le programme de recherche sur les phénomènes aérauliques, développé en collaboration avec le département d'ingénierie aéronautique, était mené sous la direction de l'architecte William W. Caudill³. Comme l'expliquent William W.

1 R. Zon, « Climate and the Nation's Forests », *op. cit.*, p. 485. Cité par J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 192. Traduction personnelle, citation originale : « In winter, by reducing wind velocity 50 percent and consequently reducing heat losses by radiation and infiltration, shelterbelts may reduce fuel consumption in farmhouses as much as 30 percent. Such results were obtained with test houses, some of which were protected by shelterbelts and other exposed to the wind, the indoor temperature being maintained at approximately 70°F. »

2 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, Basel : Birkhäuser, 2014, p. 105-106.

3 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 201.

Caudill et Gordon McCutchan, le projet général de ce programme de recherche était de ne pas séparer l'étude des différents éléments techniques de contrôle de l'environnement :

« [Dans] l'architecture d'aujourd'hui, un bon éclairage est souvent obtenu au détriment de la ventilation, une ventilation adéquate est souvent réalisée en sacrifiant le conditionnement du son, etc. Dans le programme du Texas Engineering Experiment Station, l'approche est expérimentale, et appelle à la mise en place de relations entre les bâtiments grandeur nature et les maquettes, afin de prédéterminer les performances d'éclairage naturel, les performances de ventilation naturelle et les conditionnements sonores¹. »

Cette recherche d'une simulation de phénomènes climatiques et microclimatiques complexes en interaction caractérise les travaux de cet organisme de recherche. Les recherches du Texas Engineering Experiment Station sur la ventilation naturelle ont été internationalement diffusées, ce qui met en lumière le partage et la diffusion des connaissances autour de ces problématiques architecturales très spécifiques.

Aronin reprend principalement les résultats de Caudill et de ses collaborateurs sur l'écoulement de l'air à l'extérieur des constructions et sur la ventilation naturelle intérieure. Il reproduit notamment les photographies réalisées sur des maquettes en soufflerie² (*figure 11*), à l'aide de fumigènes qui permettent de visualiser les écoulements³. Un « ciel artificiel » composé d'une source d'éclairage ponctuelle permet de reproduire l'ensoleillement sur les maquettes. L'usage de maquettes en soufflerie a posé de nombreux problèmes aux ingénieurs du Texas Engineering Experiment Station. La caractéristique de l'écoulement aéraulique, qui dépend du nombre de Reynolds⁴ et impose que la vitesse de l'écoulement varie en proportion inverse de la taille de la maquette utilisée, nécessiterait de travailler soit avec des maquettes les plus grandes possibles pour des vitesses réalistes, ou à défaut avec des vitesses de l'air très élevées

-
- 1 G. McCutchan, W. W. Caudill, *An Experiment in Architectural Education through Research*, College Station : Texas Engineering Experiment Station, Texas A. & M. College System, 1951. Cité par K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 201. Traduction personnelle, citation originale : « in today's architecture good lighting is often obtained at the expense of ventilation, adequate ventilation is often achieved by sacrificing sound conditioning and so on. In the Texas Engineering Experiment Station's program, the approach is experimental, and calls for the establishment of relationships between full-scale buildings and models for the purpose of predetermining natural lighting performance, natural ventilation performance, and sound conditionings. »
 - 2 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 201-204.
 - 3 W. W. Caudill, J. M. Rowlett, W. E. Scott, et al., « Architecture in the Wind Tunnel », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 94(5), New York : Time, mai 1951, p. 170-171.
 - 4 Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser un régime d'écoulement (turbulent, laminaire...).

pour de petits modèles¹. Ces alternatives étant difficilement réalisables en pratique, les effets du nombre de Reynolds ont été négligés par Caudill et ses collaborateurs pour les faibles vitesses en jeu. Des recherches ultérieures ont confirmé que la négligence du nombre de Reynolds était sans incidence sur la modélisation du flux d'air dans les bâtiments, même pour des variations importantes de la vitesse de l'air². Les conclusions des études réalisées en soufflerie ne doivent pas être interprétées comme l'illustration des mouvements et de la vitesse réels de l'air, mais comme la mise en évidence des zones de pression et de dépression en fonction de l'orientation du flux d'air³. Il résulte des visuels repris par Aronin que les zones de pression et de dépression sont clairement visibles à travers les lignes figurées par les fumigènes.

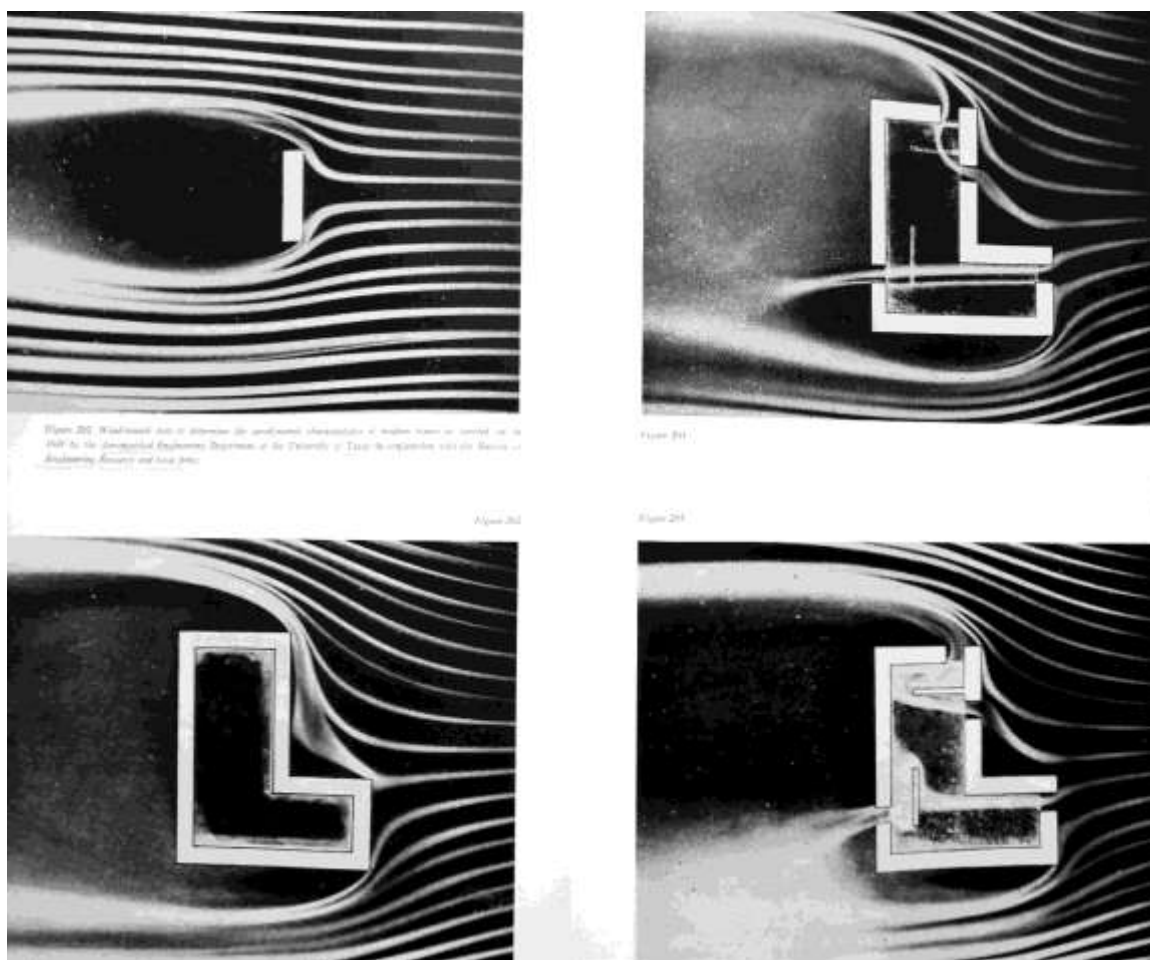


Figure 11 : Tests en soufflerie pour déterminer les caractéristiques aérodynamiques des maisons modernes, d'après W. W. Caudill, J. M. Rowlett, W. E. Scott, et al.

(J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, New York : Reinhold Publishing Corporation, (coll. Progressive Architecture Book), 1953, p. 202-203)

1 *Ibid.*, p. 174.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 290.

3 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 201.

Les observations sur la ventilation naturelle et sur le rôle des différences de pression dans le mouvement de l'air ont permis d'établir et de visualiser les *patterns* de l'écoulement de l'air à l'intérieur et au voisinage d'une structure construite. En plus de son intérêt scientifique, l'étude du Texas Engineering Experiment Station a également permis de corriger certains choix architecturaux. Aronin évoque à ce titre les propos de Caudill qui raconte son expérience lors de la construction d'une école élémentaire dans l'Oklahoma, zone au climat froid, mais aux étés particulièrement chauds¹. Caudill avait choisi de disposer un large auvent en béton au-dessus des baies vitrées orientées au sud, pensant ainsi forcer les brises à pénétrer à l'intérieur des salles de classe pour ventiler naturellement. Peu après la construction de l'école, et soucieux de l'efficacité de son système, Caudill décida d'effectuer un test direct en utilisant la fumée d'une bougie pour suivre l'écoulement de l'air : il s'aperçut qu'aucune brise ne pénétrait à l'intérieur des salles de classe. À l'aide d'une maquette en soufflerie, il détermina que la différence de pression entre le dessus et le dessous de l'auvent était telle que l'air stagnait sous celui-ci, et qu'une simple fente dans l'épaisseur de l'auvent aurait permis d'égaliser ces pressions et de ventiler les salles de classe comme il l'avait anticipé². L'expérience de Caudill relatée par Aronin permet d'insister sur l'importance des informations fournies par ce type de recherche expérimentale, basée sur un aller-retour entre des tests à échelle réduite et des observations grandeur nature. Ces études sont particulièrement importantes pour la compréhension des phénomènes aérauliques à l'échelle microclimatique, les mouvements de l'air étant très perturbés par la présence de surfaces et d'obstacles verticaux ou près du sol. En France, des études analogues seront menées entre les années 1970 et 1980, entre autres par Jacques Gandemer et Alain Guyot, parfois en collaboration avec des architectes associés à la conception bioclimatique.

Étant donné l'ampleur de l'information qu'il regroupe, l'ouvrage *Climate & Architecture* d'Aronin marque un moment important de synthèse des travaux internationaux sur la conception à partir du climat, cette synthèse étant à la base du projet d'une « airchitecture », pensée comme « une nouvelle science appliquée³ ». Sa publication en 1953 sera remarquée par

1 W. W. Caudill, « Round Table Discussion », p. 101 in : *Weather and the Building Industry: A Research Correlation Conference on Climatological Cesearch and its Impact on Building Design, Construction, Materials and Equipment*, Washington : Building Research Advisory Board, Division of Engineering and Industrial Research, National Research Council, 1950.

2 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 200-201.

3 *Ibid.*, p. 280.

Landsberg, qui le présente comme « un texte extrêmement bien illustré¹ » en 1954. Malgré l'ampleur de l'information qu'il synthétise, l'ouvrage d'Aronin est cependant incomplet, dans la mesure où les problèmes thermiques et les choix constructifs sont délibérément ignorés². Les méthodes de résolution à partir de la prise en compte du climat, et plus généralement les problèmes posés par la conception, ne sont qu'esquissés. Son projet d'une « airchitecture » est donc partiellement réalisé, dans la mesure où l'exhaustivité d'une analyse climatique et microclimatique devrait engager des résolutions architecturales et techniques étayées par une expertise des phénomènes thermiques qu'Aronin a délibérément choisi de ne pas présenter. À ce titre, les documents fournis durant le *House Beautiful Climate Control Project* sont plus aboutis puisqu'on y trouve des préconisations, censées orienter concrètement certaines résolutions techniques. Mais ni ce projet ni celui d'une « airchitecture » initié par Anonin, ne proposent véritablement de méthodes de conception à partir du climat. Durant le milieu et la fin des années 1950, le développement de méthodes de cette nature est cependant l'objet de recherches isolées qui concernent des climats essentiellement tropicaux, subtropicaux ou arides. Nous regrouperons l'ensemble de ces recherches sous le terme d'architecture tropicale. Ce sont bien les travaux en architecture tropicale qui sont à l'origine des premières méthodes de conception à partir du climat en architecture.

I.2.3. La construction en milieu tropical : influences des recherches locales sur la protection climatique

I.2.3.1. Concevoir à partir du climat en milieu tropical

Le *Climate Control Project* et « l'airchitecture » imaginée par Aronin concernaient essentiellement les climats tempérés ou froids et ont connu des développements pratiques très limités. L'histoire des expérimentations menées par les architectes en milieu dit tropical a récemment permis de découvrir l'apport de ces recherches pour l'émergence d'une « conception climatique³ » en architecture. On doit à l'historien de l'architecture Jiat-Hwee Chang, et dans une moindre mesure à ceux de Kiel Moe et Barber, quelques travaux historiques

-
- 1 H. E. Landsberg, « Bioclimatology of housing », *op. cit.*, p. 98. Traduction personnelle, citation originale : « exceedingly well illustrated introductory text »
 - 2 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. X.
 - 3 J.-H. Chang, *A Genealogy of Tropical Architecture. Colonial Networks, Nature and Technoscience*, *op. cit.*, p. 185.

sur le sujet. Chang a notamment mis en évidence que les ingénieurs et architectes ayant travaillé dans les zones tropicales formaient un réseau organisé d'acteurs partageant un savoir commun au milieu du XX^e siècle¹. En ce qui concerne la France, Jean-Pierre Traisnel a montré l'importance de la construction en zones tropicales au XIX^e siècle pour la compréhension du comportement thermique des structures légères en matériaux industrialisés (bois, métal, tôle d'acier) et pour le développement de la ventilation naturelle². Ces recherches et les suivantes forment ce qu'il nomme « la leçon des tropiques³ » dont il décèle l'influence sur le langage architectural dès le milieu du XX^e siècle. Bien que souvent centrées sur des problèmes climatiques bien déterminés, surtout relatifs à la ventilation naturelle, mais aussi à la protection contre l'ensoleillement et aux phénomènes thermiques en surface ou dans la masse des matériaux, les recherches sur l'architecture tropicale ont considérablement nourri la conception bioclimatique par la suite⁴. Nous souhaitons particulièrement insister dans ce chapitre sur les éléments caractéristiques des climats tropicaux et subtropicaux, sur les problèmes architecturaux spécifiques qu'ils posent et les réponses architecturales apportées à cette période.

Du point de vue géographique, les climats tropicaux sont situés dans la zone intertropicale, et les climats dits subtropicaux, dont l'appellation prête à confusion, désignent les climats situés au voisinage des tropiques, généralement au nord du tropique du Cancer et au sud du tropique du Capricorne. L'angle d'incidence du rayonnement solaire se réduisant à mesure que l'on se rapproche de l'Équateur, la zone tropicale est caractérisée par une forte influence des faits d'ordre cosmique en raison de la quantité importante de rayonnement solaire qui atteint ces latitudes⁵. Mais cette définition géographique n'indique qu'imparfaitement ce qui est désigné sous le terme « d'architecture tropicale ». Le terme « tropical » désigne plus généralement les zones « où l'homme est amené à se protéger contre la chaleur et tout à fait exceptionnellement contre le froid, ce qui justifie que le mot tropical soit souvent pris comme synonyme de chaud⁶ » comme l'explique l'ingénieur français Jacques Dreyfus. La construction en régions montagneuses, même situées dans des zones géographiques subtropicales, ne relève

1 *Ibid.*, p. 165-202.

2 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, Thèse NR Urbanisme, Université Paris 8 – Saint-Denis, Institut Français d'Urbanisme, 1997, p. 235-251. Dir. A. Guillerme.

3 *Ibid.*, p. 397-406 ; H. Calsat, « Problèmes d'habitats européens dans les pays intertropicaux », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », n° 7-8, juillet-août 1943, p. 217-220.

4 D. Watson, « Bioclimatic Design Research », *op. cit.*, p. 405.

5 Ch. P. Péguy, *Précis de climatologie*, *op. cit.*, p. 67-68.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical. La Protection des constructions contre la chaleur. Problèmes de ventilation*, Paris : Eyrolles, 1960, p. 14.

pas directement de l'architecture tropicale, mais les zones climatiques présentant un temps chaud une majeure partie de l'année, qu'elles soient à dominante sèche ou humide, sont concernées.

L'architecture tropicale est une catégorie qui regroupe l'ensemble des constructions situées dans des zones climatiques où la protection contre les effets de chaleur prévaut sur la protection contre les effets du froid. On peut alors distinguer deux types de climats tropicaux, à savoir les climats tropicaux humides et les climats tropicaux secs, comme le précise Jacques Dreyfus :

« Pratiquement, deux types climatiques, correspondant respectivement à ce que l'on appellera *zone tropicale humide* et *zone tropicale sèche* ont une importance particulière. La plupart des problèmes que le technicien du bâtiment aura à résoudre pour adapter les constructions à tel ou tel type climatique, pourront se ramener à ceux que l'on aura rencontrés, soit en zone tropicale humide, soit en zone tropicale sèche¹. »

Les problèmes évoqués dans ce passage résultent des caractéristiques de ces deux types de climats tropicaux, qui nécessitent des dispositions architecturales antagonistes : alors qu'en zone tropicale humide « on devra chercher des conditions de ventilation optima de façon, notamment, à profiter de l'influence d'une vitesse d'air élevée sur le confort² », en zone tropicale sèche « les constructions seront fermées pendant les heures chaudes de la journée et devront avoir une *inertie thermique* leur permettant d'amortir les pointes de chaleur extérieures³. » Les choix architecturaux antagonistes qui résultent de ces deux types de climats, et la difficulté pour maintenir un confort thermique acceptable dans de nombreux climats tropicaux, sont à l'origine des principaux problèmes rencontrés par les ingénieurs et les architectes en milieu tropical et expliquent les tentatives pour mettre au point des méthodes de conception à partir du climat adaptées à ces climats.

Ces recherches sur l'architecture tropicale ont été menées dans différentes zones géographiques : en Australie, au Commonwealth Experimental Building Station notamment par J. W. Drysdale⁴, dans ce qui était l'Afrique Occidentale Française et plus précisément au

1 *Ibid.*, p. 44-45.

2 *Ibid.*, p. 45.

3 *Ibid.*

4 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 105.

Sénégal par Jacques Dreyfus¹, en Afrique du Sud notamment par A. J. Roux et Jacob F. Van Straaten, en Israël au Technion (Institut de technologie d'Israël) à Haïfa au département de « climatologie des constructions » où travaille Baruch Givoni², et dans différentes colonies anglaises par George Atkinson³, sous la direction du Building Research Station situé au Royaume-Uni. Bien que souvent établis avant la Seconde Guerre mondiale⁴, certains de ces centres de recherche ont particulièrement diffusé leurs résultats sous forme de publications entre le milieu des années 1940 et la fin des années 1960, parfois jusqu'au début des années 1970. Les enjeux politiques de ces recherches menées le plus souvent dans des territoires coloniaux par des pays occidentaux ont été étudiés récemment, dans la lignée des travaux de Chang et d'autres⁵. Sans ignorer leur dimension politique, nous souhaitons néanmoins concentrer nos analyses sur une dimension plus neutre, qui concerne l'apport de ces recherches à la constitution d'une démarche de conception à partir du climat, forme primitive de la conception bioclimatique.

Indépendamment des recherches menées par les centres officiels mentionnés précédemment, et dont l'essentiel de l'activité concernait la publication d'études, l'architecture tropicale s'est développée au XIX^e siècle et surtout au XX^e siècle à travers la mise au point d'un langage architectural identifié (brise-soleil, jalousies...). Le Brésil a été un lieu privilégié d'une recherche plus informelle menée par les architectes modernes sur les protections solaires et leur géométrie, à partir du milieu des années 1930⁶. La collecte de données météorologiques, ainsi que des études du climat local et des microclimats de Rio de Janeiro ont été faites à partir de 1936, afin de déterminer les sites d'implantation les plus favorables et l'orientation optimale des nouvelles constructions⁷. De nombreux architectes ont contribué à l'étude pratique des problèmes de construction dans les zones tropicales par leurs réalisations. On peut mentionner les noms d'Edwin Maxwell Fry et de Jane Drew⁸, d'Otto Koenigsberger qui a notamment

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 15.

2 J.-H. Chang, *A Genealogy of Tropical Architecture. Colonial Networks, Nature and Technoscience*, op. cit., p. 185-195.

3 O. Aleksandrowicz, « The Other Side of Climate: The Unscientific Nature of Climatic Architectural Design in Israel », p. 282 in : I. Ben-Asher Gitler, A. Geva (éds.), *Israel as a Modern Architectural Experimental Lab*, Bristol/Chicago : Intellect Books, 2019.

4 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 105.

5 F. Demissie (éd.), *Colonial Architecture and Urbanism in Africa. Intertwined and Contested Histories*, [1ère éd. 2012], Londres/New York : Routledge, 2017, 438 p ; W. Anderson, « Decolonizing the Foundation of Tropical Architecture », [en ligne], *ABE Journal*, n°18, 2021, n. p.

6 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 64-101.

7 I. Carone, « Qual a localidade mais salubre do Rio », *Arquitetura e Urbanismo*, mai-juin 1936, p. 60-64. Voir : D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 86-88.

8 M. E. Fry, J. Drew, *Tropical Architecture in the Humid Zone*, New York : Reinhold, 1956, 320 p.

travaillé en Inde à partir de 1940¹, de Richard Neutra qui a travaillé à Porto Rico entre 1943 et 1945², de Carl Mahoney, de José-Luís Sert, d'Hassan Fathy³ et d'autres, dont l'ingénieur Jean Prouvé, à l'origine d'importantes études sur les maisons tropicales.

À titre d'exemple, on peut citer certaines réalisations expérimentales de Jean Prouvé, dont les prototypes de maisons tropicales réalisés pour les régions de Dakar et Niamey à partir de 1947, qui reprennent l'essentiel des principes préconisés dans les zones tropicales humides⁴. On y trouve le principe de la ventilation transversale, la protection des façades par des persiennes et un renouvellement de l'air intérieur par effet de cheminée⁵. L'usage de l'aluminium est également justifié dans les climats tropicaux⁶. Prouvé avait également envisagé des évolutions pour les climats tropicaux chauds et secs, en s'inspirant des « Bordges » qui sont des constructions traditionnelles en terre crue⁷. Dans le même registre, les travaux de Edwin Maxwell Fry et Jane Drew méritent d'être particulièrement mentionnés. On leur doit de nombreuses réalisations, notamment à Chandigarh⁸, ainsi que la publication d'un ouvrage important en 1956 intitulé *Tropical Architecture in the Humid Zone*. Cet ouvrage, revu et réédité pour y inclure les problèmes de construction en milieu tropical sec, connaîtra un important succès⁹.

Outre ces recherches, les premiers travaux conséquents en architecture tropicale ont vraisemblablement été réalisés en Australie, au Commonwealth Experimental Building Station, notamment par J. W. Drysdale. Dès 1947, cet organisme publie de nombreuses brochures et publications toutes signées du nom de Drysdale qui seront systématiquement citées par la suite. En plus de celles consacrées à la ventilation naturelle¹⁰, on trouve un ensemble de publications

-
- 1 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, Londres : Longman, 1974, p. XIII.
 - 2 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 116-126.
 - 3 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Egypte : Gourni*, Paris : Sindbad - La Bibliothèque arabe (coll. Hommes et sociétés), trad. de l'anglais par Yana Kornel, 1985, p. 21-48.
 - 4 A. Pacquement, O. Cinqualbre (éd.), *Jean Prouvé. La Maison tropicale*, Paris : Centre Pompidou, 2009, p. 31-33.
 - 5 J.-F. Archieri, J.-P. Levasseur (éds.) *Prouvé. Cours du CNAM 1957-1970 : Essai de reconstitution du cours à partir des archives Jean Prouvé*, Bruxelles : Mardaga, 1990, p. 146.
 - 6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 131.
 - 7 J.-F. Archieri, J.-P. Levasseur (éds.) *Prouvé. Cours du CNAM 1957-1970*, op. cit., p. 148.
 - 8 I. Jackson, J. Holland, *The Architecture of Edwin Maxwell Fry and Jane Drew: Twentieth Century Architecture, Pioneer Modernism and the Tropics*, Farnham (Surrey) : Ashgate, (coll. Studies in Architecture), 2014, p. 215-276.
 - 9 E. M. Fry, J. Drew, *Tropical Architecture in the Dry and Humid Zones*, [1ère éd. 1964], Huntington Robert E. Krieger Publishing Company, 1982, 249 p.
 - 10 J. W. Drysdale, *Natural Ventilation, Ceiling Height and Room Size: Notes Regarding Minimum Provision in Dwellings with Respect to Australian Conditions*, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1947, 28 p.

relatives à la conception des habitations à partir des données climatiques australiennes et de l'étude du confort physiologique¹. Ces publications circuleront largement, jusqu'aux États-Unis². Elles sont synthétisées en 1952 dans un document intitulé *Designing Houses for Australian Climates*³. Cette brève publication de Drysdale se concentre essentiellement sur des préconisations relatives aux choix des matériaux, à la protection et au dimensionnement des vitrages, ainsi qu'à la ventilation par l'orientation des façades perpendiculairement aux brises favorables. On y trouve de nombreuses considérations sur le métabolisme et la physiologie : les températures sèches optimales au regard du confort physiologique sont fixées aux alentours de 18,5 °C en hiver, et de 24,5 °C en été, la limite supérieure de l'inconfort étant située à 29,5 °C⁴. Drysdale présente également la classification des climats australiens, ainsi que les différents facteurs climatiques qu'il estime nécessaires à la conception : la température sèche, l'humidité relative, les vents dominants, la quantité d'ensoleillement, la quantité de précipitations et d'autres facteurs mineurs mais importants, comme les insectes⁵.

À partir de ces considérations, Drysdale analyse les résultats d'expérimentations réalisées sur le comportement thermique de différents prototypes construits en matériaux lourds (brique) ou légers (bois et isolant), ventilés ou non, sur la réduction des températures intérieures⁶. Il observe :

« [La] caractéristique de la construction lourde, qui fournit des conditions fraîches à l'intérieur pendant les journées chaudes continue d'agir de nuit, et entraîne des températures défavorablement élevées à l'intérieur lorsqu'il peut faire doux ou frais à l'extérieur. La construction à ossature, en revanche, chauffe rapidement et reste chaude pendant la journée, mais elle se refroidit relativement rapidement la nuit et offre ainsi de meilleures conditions de nuit que la construction lourde. En hiver, la réponse rapide au chauffage de la construction à ossature fonctionne favorablement, et pendant les jours ensoleillés, la construction à ossature est plus chaude que la construction lourde⁷ ».

1 J. W. Drysdale, *Climate and House Design; Physiological Considerations*, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1948, 15 p. et J. W. Drysdale, *Climate and Design of Buildings; Physiological Study*, n°2, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1950, 21 p.

2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 186.

3 J. W. Drysdale, *Designing Houses for Australian Climates*, Bulletin n°6, [1ère éd. 1952], Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1959, 51 p.

4 J. W. Drysdale, *Designing Houses for Australian Climates*, op. cit., p. 32.

5 *Ibid.*, p. 6-7.

6 *Ibid.*, p. 9.

7 *Ibid.*, p. 10. Traduction personnelle, citation originale : « the characteristic of heavyweight construction which provides cool conditions indoors during hot days still operates at night, and results in unfavourably

On remarque dans ce passage l'attention au comportement thermique des constructions lourdes et légères, qui est un trait caractéristique des recherches menées sur la construction en milieu tropical. L'expression de « réponse rapide » (*rapid response*) traduit la faible inertie thermique de la construction à ossature, qui permet à l'air intérieur de monter rapidement en température à cause des propriétés thermiques de l'isolant qui s'échauffe rapidement sur sa surface intérieure, mais transmet très mal la chaleur à travers son épaisseur, si bien qu'on peut considérer que sa surface intérieure est à tout moment à la même température que l'air à son voisinage. Plus généralement, *Designing Houses for Australian Climates* est un document typique des travaux sur l'architecture tropicale publiés par la suite : des données physiologiques sont mises en correspondance avec les mesures du comportement thermique de différentes constructions issues d'expérimentations, afin d'en déduire des recommandations en fonction des facteurs climatiques dominants ou des périodes critiques (saisons sèches, humides...). Physiologie et climatologie constituent les deux domaines de connaissances synthétisés dans ces travaux¹. En plus des recherches de Drysdale, le Commonwealth Building Research Station a développé des études sur les matériaux, notamment sur les techniques de construction en terre crue (pisé et adobe) sous la direction de Georges Middleton², ainsi que des expérimentations sur la détérioration des matériaux³.

Un autre organisme de recherche se distingue par ses travaux sur l'architecture tropicale : il s'agit du Building Research Station situé en Angleterre. Les principaux travaux de recherche sur la conception à partir du climat au sein de cet organisme sont l'œuvre de George Atkinson, qui travaillait au département de construction tropicale. Les principaux travaux d'Atkinson sont essentiellement théoriques : on lui doit une classification des différents climats tropicaux en 1950 à partir de données physiologiques sur le confort, ainsi que des recommandations architecturales pour les zones chaudes arides, humides et pour les zones tropicales plus fraîches

high temperatures indoors when it might be mild or cool outdoors. Frame construction, by contrast, heats rapidly and is hot during the day, but it cools relatively rapidly at night and thereby provides better night-time conditions than heavyweight construction. In winter, the rapid response of frame construction to heating operates favourably, and during sunny days frame construction is warmer than heavyweight construction »

- 1 J.-H. Chang, *A Genealogy of Tropical Architecture. Colonial Networks, Nature and Technoscience*, op. cit., p. 185.
- 2 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 105.
- 3 Division of Building Research, « Behaviour of Building Materials in Tropical Regions », *Notes on the Science of Building*, 8B30, juin 1954 in : J. W. Drysdale, *Designing Houses for Australian Climates*, Bulletin n°6, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1959.

de plateau¹. Atkinson a été amené à affiner ses recommandations par la suite : il suggère par exemple en 1953 de concevoir les habitations dans les zones tropicales humides comme des abris météorologiques Stevenson, dont la caractéristique est d'être parfaitement ventilés sur toutes ses surfaces, pour permettre à l'abri d'être en phase avec la variation des températures extérieures². Un autre apport d'Atkinson concerne la mise en place de relevés météorologiques plus rigoureux au sein des différents territoires coloniaux du Royaume-Uni : il rédige une note à ce sujet en 1954 intitulée « Le Rôle de la météorologie et de la climatologie dans la construction et l'habitat tropical » qui circulera largement³. Le but de cette note est d'inciter les administrations locales à relever des données météorologiques journalières à heure fixe pour en déterminer la fréquence, plutôt que des données moyennes, qui correspondent à des séries plus ou moins longues. Dans cette note, il prend pour exemple les relevés proposés par le *House Beautiful Climate Control Project* où la fréquence des événements météorologiques est utilisée, plutôt que leur moyenne⁴. L'intérêt pour l'architecture tropicale s'est propagé en dehors de ces centres de recherche. Entre 1952 et 1957, de nombreuses conférences internationales sur l'architecture tropicale sont organisées, à Londres, New Delhi ou Durban⁵.

I.2.3.2. Des problèmes de conception propres aux climats tropicaux

Le développement des recherches sur l'architecture tropicale, bien que motivé par des enjeux souvent assez diversifiés et propres à chaque centre de recherche, ont néanmoins convergé vers une problématique principale : celui de l'adaptation des constructions aux caractéristiques des climats tropicaux et subtropicaux, qu'ils soient humides ou secs. Ces recherches peuvent être partagées selon deux directions : celle relative à la protection contre le soleil et les effets de la chaleur, impliquant des expérimentations sur le comportement thermique des matériaux en climat tropical, et celle concernant le rafraîchissement des structures construites par ventilation naturelle ou par des systèmes de climatisation naturelle. En pratique, ces deux axes ne faisaient pas l'objet de recherches séparées, mais ont été constamment croisés. L'ouvrage de l'ingénieur français Jacques Dreyfus (1920-2004) intitulé *Le Confort dans*

1 J.-H. Chang, *A Genealogy of Tropical Architecture. Colonial Networks, Nature and Technoscience*, op. cit., p. 187.

2 *Ibid.*, p. 188.

3 *Ibid.*, p. 185-186. Le titre original est : « The Role of Meteorology and Climatology in Tropical Building and Housing: A Preliminary Note ».

4 *Ibid.*, p. 186.

5 *Ibid.*, p. 169.

l'habitat en pays tropical, et sous-titré « La Protection des constructions contre la chaleur » et « Problèmes de ventilation », montre bien la prégnance de ces deux problématiques nécessairement liées¹. Cet important ouvrage publié en 1960 regroupe l'essentiel des connaissances internationales de l'époque sur l'architecture tropicale² et synthétise plus de dix années de recherche menées au Sénégal par l'auteur³. Dreyfus y a notamment conduit de nombreuses expérimentations sur la construction en terre stabilisée, appelée « béton de terre⁴ » et sur la durabilité de ce matériau. Il a également dirigé des chantiers de construction à Dakar, avant d'intégrer le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en 1958⁵. Comme Drysdale, Dreyfus aborde la conception en zone tropicale à partir des problèmes de confort thermique spécifiques à ces climats. Il écrit à ce propos :

« Le confort de l'homme sous les tropiques dépend, dans une large mesure, des conditions qui lui sont offertes dans les bâtiments de toutes natures où il est amené à passer la plus grande partie de sa vie, qu'il s'agisse du logement où il vit avec sa famille ou du logement où il travaille. C'est dire toute l'importance qu'il faut attacher au problème de l'adaptation des constructions au climat. [...] Le désir de construire en dur conduit trop fréquemment à réaliser de véritables étuves en béton, seul terme qui convienne pour qualifier certaines constructions dites économiques⁶. »

Ce constat d'une inadaptation d'un système constructif et d'un matériau particulier au climat tropical, ici les maisons économiques en béton, peut être considéré comme le problème initial de l'architecture tropicale. C'est à partir du constat d'une multiplication des constructions inconfortables que les recherches en architecture tropicale vont s'orienter vers le développement de systèmes constructifs et d'éléments techniques en vue de résoudre cette problématique, soit par un choix de matériaux ou de protections mieux appropriés, soit par une amélioration de la ventilation.

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit.,

2 *Ibid.*, p. 16-17.

3 *Ibid.*, p. 15.

4 J.-P. Laurent, M. Rubeaud, D. N'Dong, « La durabilité des protections sur terre stabilisée : l'expérience des "murets Dreyfus" », *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, n°2022, livraison 262, sept. 1985, p. 1.

5 F. Rouxel, B. Robert, B. Écrement, D. Le Couédic, « Jacques Dreyfus (1920-2004) », *Urbanisme*, n°338, sept.-oct. 2004, p. 10.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 13.

On retrouve le même constat d'une inadaptation des techniques et des matériaux importés en milieu tropical chez d'autres acteurs de l'architecture tropicale. En 1960, dans un numéro spécial de la revue *Techniques & Architecture* consacré au « contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées¹ », l'ingénieur et architecte français Raymond Ayoub, ancien chargé de recherche au CNRS, fait le même constat que Dreyfus et regrette l'évolution vers des constructions visant à manifester un certain prestige social au détriment du contrôle thermique. Il observe que les murs ont tendance à s'épaissir avec l'élévation du niveau de vie, et que la diminution des ouvertures occasionnée par l'apparition de ces murs massifs empêche toute ventilation et transforme « l'ambiance intérieure en un four intolérable la nuit² ». Il en résulte qu'on « observe fréquemment la nuit des températures intérieures de 35° alors qu'il règne au-dehors une température de 25° et moins³. »

On pourrait multiplier les observations de cette nature faites à la même période : elles traduisent systématiquement l'inefficacité flagrante de certaines techniques de construction et des choix architecturaux effectués lors de la conception d'habitations pour les climats tropicaux humides ou secs. La problématique centrale de la conception en milieu tropical consiste alors à mieux prendre en compte les caractéristiques des climats tropicaux secs et humides, comme l'amplitude diurne des températures, afin de concevoir des habitations confortables par un « contrôle thermique naturel⁴ » minimisant le recours aux systèmes mécaniques de conditionnement d'air souvent coûteux. Pour ce faire, les travaux sur l'architecture tropicale ont prolongé de manière expérimentale les recherches menées par certains ingénieurs dans la première partie du XX^e siècle sur le comportement thermique des matériaux en régime périodique (ou variable), c'est-à-dire soumis à des amplitudes de températures importantes, afin de mieux prendre en compte des phénomènes déterminants comme l'inertie thermique. L'approche expérimentale des phénomènes thermiques en régime périodique, sur laquelle nous reviendrons en détail, s'opposait à l'étude du comportement thermique des constructions en

-
- 1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *Techniques & Architecture*, 20ème série, n°2, février 1960, p. 68-140. La recherche du contrôle thermique naturelle a vraisemblablement été initiée en France par l'ingénieur René Dupuy. Voir : J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 130-131.
 - 2 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *Techniques & Architecture*, 20ème série, n°2, février 1960, p. 79.
 - 3 *Ibid.*
 - 4 *Ibid.*, p. 117.

régime permanent, où le flux de chaleur à travers une paroi est considéré comme constant puisque les températures de part et d'autre de celle-ci sont définies comme stables dans le temps¹. Les ingénieurs américains Charles Osborn Mackey et Lawrence T. Wright Jr. ont contribué à la mise au point des méthodes de calcul thermique en régime permanent, mais ils sont surtout à l'origine des formules permettant de calculer la « température fictive au soleil² » des surfaces (aussi nommée « température air-soleil³ » ou « *sol-air temperature* » en anglais), qui ont été abondamment reprises dans les travaux sur l'architecture tropicale. Les calculs de la « température fictive au soleil » développés par Mackey et Wright Jr. permettaient de « prévoir l'ensemble des phénomènes d'échange de chaleur intervenant sur les faces extérieures d'une construction⁴. »

Croisée avec le calcul de la « température fictive au soleil », l'étude du flux de chaleur en régime périodique permet d'intégrer la variation de la température de la surface extérieure d'une construction en zone tropicale, due notamment au rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi. Elle permet d'étudier l'inertie thermique d'un matériau de construction, qui est une propriété essentielle qui sert à « amortir les pointes de chaleur extérieures⁵ » et à déphaser les pics de température. Les calculs thermiques en régime périodique servent à prendre en compte d'une part l'amplitude des températures de l'air et des surfaces extérieures, et d'autre part l'action des matériaux sur la transmission du flux de chaleur, en relation avec la variabilité de l'énergie incidente. Si l'on observe l'évolution du gradient thermique dans un élément massif de construction telle que la présente Dreyfus, on constate que celui-ci n'est pas stable au cours du temps et s'atténue en fin de journée, dans la mesure où la température de la face extérieure exposée s'abaisse graduellement⁶ (*figure 12*). Des diagrammes analogues présentés par Ayoub montrent que ces gradients dépendent de la température extérieure et de l'exposition des éléments construits⁷.

Les recherches dans le champ de l'architecture tropicale ont mis en évidence que le rôle de l'inertie thermique est fondamental dans les zones tropicales sèches, et plus généralement dans les climats où l'amplitude diurne des températures est importante. Comme l'explique

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 16.

2 *Ibid.*, p. 131-134.

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 230-232.

4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 132.

5 *Ibid.*, p. 44-45.

6 *Ibid.*, p. 78.

7 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 87.

Dreyfus, il est alors nécessaire d'amortir « l'effet des maxima diurnes à l'intérieur des constructions en donnant à celles-ci une forte inertie thermique¹ », ce qui justifie qu'on affirme « couramment qu'en zone tropicale sèche les constructions doivent être *lourdes*² ». À ce titre, Dreyfus rappelle que la toiture est particulièrement sollicitée puisqu'elle « reçoit deux à trois fois plus de rayonnement solaire qu'un plan vertical³ » au niveau des latitudes tropicales. Si l'inertie thermique permet de retarder la transmission de la chaleur en journée, il sera cependant nécessaire d'éliminer la chaleur transmise de nuit, où l'on « cherchera alors à refroidir la construction par une ventilation intérieure aussi énergique que possible⁴ ». Il y a en effet un antagonisme partiel entre le confort produit par une construction lourde en journée, et l'inconfort éventuellement causé par le déphasage thermique de nuit au moment où les murs rayonnent la chaleur diurne accumulée en journée. Cet inconfort éventuel des constructions à forte inertie dans les zones tropicales sèches peut expliquer la pratique traditionnelle qui consiste à dormir à l'extérieur des constructions dans ces régions⁵.

Cependant, l'inertie thermique est présentée comme une propriété favorable seulement dans certaines zones climatiques déterminées et caractérisées par une faible humidité de l'air et une importante amplitude diurne des températures. Dans les zones tropicales humides, l'inertie thermique doit au contraire être minimum puisque le but est de « réaliser à tout instant des conditions de ventilation optima⁶ ». À l'inverse des constructions lourdes conçues pour les zones sèches, Dreyfus affirme que les constructions en zones tropicales humides doivent être réalisées avec « la totalité des parois intérieures en matériaux légers isolants : le bois ou panneaux de fibres de bois, de telle sorte qu'à tout instant, les conditions existant à l'intérieur, soient aussi favorables – la nuit notamment – que celles existant à l'extérieur⁷. » La structure d'une maison tropicale humide doit permettre une « réponse rapide », pour reprendre l'expression de Drysdale. L'enjeu principal n'est plus la protection contre la chaleur, mais la maximisation de la ventilation nocturne et diurne par une orientation favorable, tout en

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 222.

2 *Ibid.*

3 J. Dreyfus, « La Protection thermique des constructions en pays tropical. Principes généraux, notion d'inertie thermique », in : S. W. (éd.) *Biometeorology: Proceedings of The Second International Bioclimatological Congress held at The Royal Society of Medicine, London, 4-10 Sept. 1960*, Oxford : Pergamon Press, (coll. Symposium Publications Division), 1962, p. 218.

4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 92.

5 *Ibid.*, p. 256-257.

6 *Ibid.*, p. 147.

7 *Ibid.*

prémunissant la construction des effets du rayonnement solaire direct et réfléchi par les alentours.

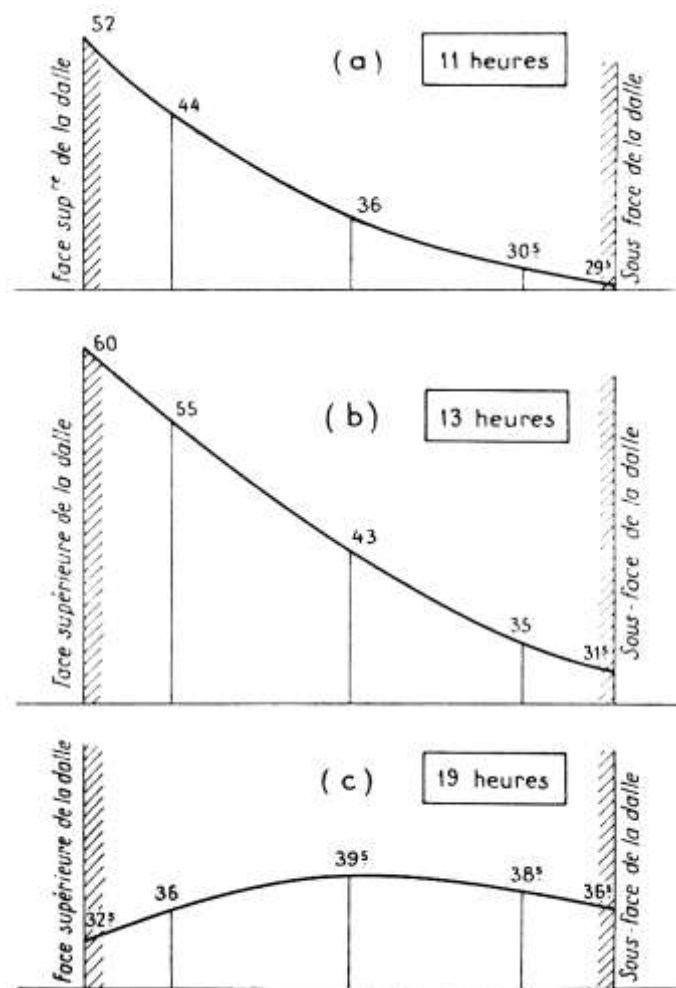


Figure 12 : Distribution des températures dans une toiture terrasse en hourdis creux de 19 cm à 11 h, 13 h et 19 h et visualisation de la transmission d'une onde de chaleur.
(J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical. La Protection des constructions contre la chaleur. Problèmes de ventilation*, Paris : Eyrolles, 1960, p. 78)

Dans le but de clarifier les phénomènes de ventilation naturelle indispensables à la conception en zone tropicale humide, Dreyfus synthétise en 1960 un ensemble de travaux expérimentaux sur ce sujet, et notamment les recherches menées en soufflerie au Texas Engineering Experiment Station que nous avons évoquées précédemment et qui ont été abondamment diffusées en dehors des États-Unis¹. Il en déduit des règles pour l'aménagement intérieur, par exemple la nécessité de « prévoir des ouvertures appropriées dans les cloisons de

¹ *Ibid.*, p. 157.

séparation¹ » entre les pièces, afin de favoriser la ventilation transversale. Les observations faites au Texas Engineering Experiment Station étaient aussi connues de Raymond Ayoub, qui en déduit des règles concernant le positionnement des ouvertures². Les recherches en architecture tropicale ont donc largement bénéficié de la diffusion des résultats obtenus en soufflerie pour la compréhension des phénomènes de ventilation naturelle.

La mise en évidence expérimentale de deux types de comportements thermiques antagonistes, répondant aux caractéristiques différentes des climats tropicaux secs et humides, et la recherche d'une meilleure approximation des phénomènes thermiques à l'œuvre en régime variable, constituent un apport fondamental et définitif des travaux en architecture tropicale. Les publications sur l'architecture tropicale insistent particulièrement sur l'importance de la notion d'inertie thermique³. Cependant, certaines règles mises au point pour la conception en milieu tropical s'appliquent indifféremment aux zones sèches et humides, notamment celles qui recommandent de limiter la largeur de la construction à une pièce d'épaisseur pour en faciliter la ventilation transversale⁴, et de rechercher une orientation favorable par rapport aux brises ou aux vents⁵. L'attention aux phénomènes microclimatiques dus à l'intensité du rayonnement solaire réfléchi, à l'albédo du sol et des constructions voisines s'applique à l'ensemble des climats tropicaux. Dreyfus insiste sur l'importance de ces phénomènes souvent négligés :

« [Pour] une construction isolée et non clôturée, située sur un terrain horizontal non planté d'arbres, la nature du sol jusqu'à une distance de la construction égale à sa hauteur intervient pour 50 % environ dans les échanges par rayonnement entre les murs de la construction et l'environnement, ciel non compris⁶. »

Il suggère ainsi de privilégier des sols gazonnés aux alentours des constructions. Ces considérations relèvent de l'étude des microclimats, le terme de microclimat désignant selon Dreyfus le fait « que les données climatiques peuvent être assez différentes en deux points

1 *Ibid.*

2 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 135.

3 J. Dreyfus, « La Protection thermique des constructions en pays tropical. Principes généraux, notion d'inertie thermique », *op. cit.*

4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 26.

5 J. Dreyfus, « La Protection thermique des constructions en pays tropical. Principes généraux, notion d'inertie thermique », *op. cit.*, p. 221.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 146.

relativement voisins l'un de l'autre¹. » À ce titre, les microclimats et climats locaux des latitudes tropicales sont particulièrement affectés par la nature du sol et il observe que « [la] proximité d'un plateau latéritique modifiera fréquemment le régime de températures². » Dans le même registre, l'étude des protections solaires (brise-soleil, persiennes, auvents, jalousies, balcons...), des matériaux et de leur surface s'applique indifféremment aux climats tropicaux secs et humides. Des méthodes géométriques plus ou moins complexes, pour déterminer la forme et la position de ces protections en fonction de la saisonnalité et de la latitude, sont également présentées dans ces publications sur l'architecture tropicale³.

I.2.3.3. L'importance de la physiologie pour la détermination de la zone de confort

Nous avons évoqué l'importance de la physiologie pour l'architecture tropicale : la majorité de ces travaux s'appuient en effet sur des données physiologiques pour déterminer la zone de confort dans les climats tropicaux. Ces données sont généralement issues d'une source unique qui est le *Guide de la Société Américaine des Ingénieurs du Chauffage et de la Ventilation* édité par l'ASHVE. Ce guide, destiné aux professionnels américains du chauffage et du conditionnement d'air, est mis à jour annuellement et regroupe l'ensemble des travaux de recherche en physiologie sur la détermination des zones de confort thermique. Les outils et les données de ce guide sont repris par Atkinson et Koenigsberger au Royaume-Uni⁴, ainsi que par Dreyfus. Ces auteurs reprennent notamment l'utilisation du « diagramme psychrométrique⁵ » développé par l'ASHVE. Il permet de repérer sur un graphique la température mesurée par un thermomètre sec (température sèche), reportée en abscisse, et un thermomètre mouillé (température humide), repérée en ordonnée, la différence entre les deux mesures donnant une estimation de l'humidité relative de l'air et de sa saturation en vapeur d'eau. La première version de ce diagramme figure dans le *Guide* de l'ASHVE de 1932 (*figure 13*), mais il sera complété et adapté par la suite. Ce diagramme permet de reporter les différentes températures moyennes mensuelles d'une localité, et de repérer la variation des températures propre à cette

1 *Ibid.*, p. 313.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 341-345. Voir également : R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 94-103.

4 J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », *The Journal of Architecture*, vol. 21, n°8, Londres : Royal Institute of British Architects (RIBA), 2016, p. 1174.

5 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 31.

localité et son décalage par rapport à une zone de confort établie conventionnellement et également repérée sur le diagramme. Des diagrammes analogues nommés « climogrammes¹ » étaient utilisés par les climatologues pour caractériser le climat d'une zone, en y reportant les totaux mensuels de précipitation en ordonnée plutôt que la température humide.

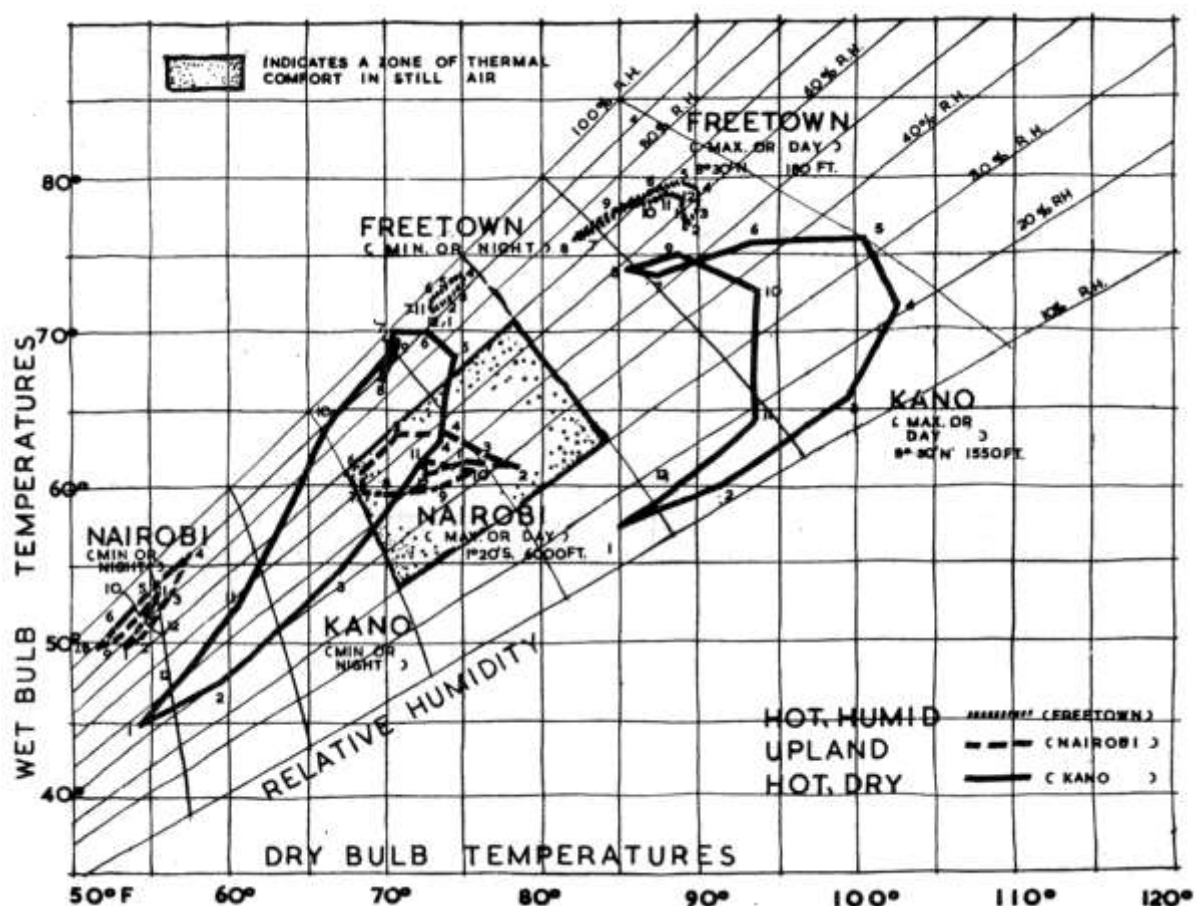


Figure 13 : Diagramme psychrométrique publié par l'ASHRAE en 1932.

(J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », *The Journal of Architecture*, vol. 21, n°8, Londres : Royal Institute of British Architects (RIBA), 2016, p. 1175)

L'utilisation des diagrammes psychrométriques n'aurait eu qu'un rôle indicatif en architecture tropicale, sa fonction étant essentiellement de caractériser le climat moyen d'une localité et d'apprécier l'écart des variations de température de cette localité par rapport à une zone de confort établie *a priori*. L'usage de cet outil repose sur une approximation considérable : le climat d'un lieu est caractérisé à partir des seules températures moyennes mensuelles sèches

1 Ch. P. Pégué, *Précis de climatologie*, op. cit., p. 288-289.

et humides. Bien que les architectes et ingénieurs aient été conscients de la faiblesse de ce choix, ce n'est qu'au prix de cette simplification que le repérage de la zone de confort pouvait être effectué. Une fois repérées les températures sèches et humides d'un lieu, le but de l'architecte ou de l'ingénieur utilisant cette représentation graphique consiste à en déduire des moyens architecturaux ou techniques pour limiter la variation des températures, afin que celles-ci soient contenues à l'intérieur d'une construction dans les limites de la zone de confort. Nous verrons par la suite que les diagrammes psychrométriques ont été développés et sont caractéristiques des premiers travaux théoriques en architecture bioclimatique.

Outre le problème de la disponibilité des relevés météorologiques en zone tropicale, l'utilisation de ce type de diagrammes dans les climats tropicaux pose un problème important : qu'est-ce que la zone de confort et comment la caractériser ? Ce problème est particulièrement délicat à traiter, et dépasse le cadre de notre travail, bien que l'histoire de la notion de confort ait déjà fait l'objet de travaux¹. Dans le cas de l'architecture tropicale, les architectes et ingénieurs se sont basés essentiellement sur les données du *Guide* de l'ASVHE, où les zones de confort pour l'été et l'hiver ont été établies sur la base d'études expérimentales faites aux États-Unis dans des « chambres psychrométriques² », qui font intervenir l'activité physique et l'habillement, ces études étant basées sur celles menées par Constantin P. Yaglou. Cette transposition des données physiologiques indifférentes aux pratiques culturelles, et aux phénomènes d'acclimatation propres aux milieux tropicaux, a été contestée par certains architectes de l'époque. C'est le cas de l'architecte Albert Mayer, qui a travaillé avec Landsberg sur le plan de Chandigarh, qui affirme en 1952 que les « conditions et exigences de confort ne sont pas entièrement basées sur des mesures physiques³ », ce qui tient au fait que la « culture occidentale met beaucoup plus l'accent sur le confort purement physique et matériel que d'autres⁴. » Bien qu'il reprenne très largement les travaux de l'ASHVE, Dreyfus note

-
- 1 J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », *op. cit.* En français, on peut se référer à l'ouvrage de J. Dreyfus, *La Société du confort, quel enjeu, quelles illusions ?*, *op. cit.*
 - 2 J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », *op. cit.*, p. 1181.
 - 3 A. Mayer, « Introduction to the Subject of Architectural Design for Hot Climates », in : Building Research Advisory Board (éd.), *Research Conference Report n°5: Housing and Building in Hot-Humid and Hot-Dry Climates, November 18 and 19, 1952*, Washington : National Academy of Sciences, 1953, p. 32. Cité par J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », *op. cit.*, p. 1181.
 - 4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Comfort conditions and requirements are not wholly based on physical measurements. Physical comfort is by no means the only measure of working and living efficiency. [...] Our own western culture places far greater emphasis on purely physical and material comforts than others. »

l'importance de l'adaptation au climat des individus résidant dans une zone climatique depuis cinq à sept ans¹, ainsi que l'imprécision de la notion de confort². La validité des mesures effectuées en laboratoire dans des chambres psychrométriques a également été critiquée par certains géographes, comme Sorre, qui affirme le caractère artificiel et peu significatif de ces résultats³. Les historiens contemporains remettent en question le panel des sujets étudiés pour déterminer la zone de confort, dans la mesure où ce sont majoritairement des étudiants qui ont participé à ces expérimentations, au détriment des personnes plus âgées ou fragiles⁴.

Les recherches sur le confort en architecture tropicale se sont également réapproprié la notion de « température résultante » développée simultanément par les chercheurs de l'ASVHE, notamment par C. P. Yaglou, par Thomas Bedford en Angleterre et par André Missenard en France⁵. La température résultante, nommée « *effective temperature* » en anglais⁶, est lisible à travers un abaque qui met en correspondance la température radiante moyenne (mesurée avec un thermomètre globe), la température humide et la vitesse de l'air⁷. L'abaque permet ainsi de lire la température résultante censée traduire la sensation de confort en degrés Celsius, qui est fonction du mouvement de l'air et du rayonnement thermique émis par les objets environnants. L'utilisation de la température effective révèle l'importance des mouvements d'air, et donc des effets de la ventilation naturelle sur le confort dans les constructions. C'est pourquoi Dreyfus peut affirmer que « [lorsque] la vitesse de l'air augmente, les autres éléments du confort restant les mêmes, la température résultante tend à diminuer⁸ ». Pour des températures sèches et humides en dehors des limites supérieures de la zone de confort, l'effet de la vitesse de l'air peut éventuellement être bénéfique et limiter la sensation d'inconfort ; corrélativement, lorsque les températures se situent en dessous de la zone de confort, l'effet de la vitesse de l'air peut être source d'inconfort, entraînant une sensation de froid. De plus, en renouvelant l'air au voisinage de la peau, les mouvements de l'air favorisent la transpiration, donc le rafraîchissement superficiel de la peau, dans un climat chaud où l'air n'ait pas saturé en

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 44.

2 *Ibid.*, p. 27.

3 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, op. cit., p. 413.

4 J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », op. cit., p. 1177.

5 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 40.

6 J. H. Chang, « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », op. cit., p. 1174.

7 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 36-37.

8 *Ibid.*, p. 38

humidité¹. Plus précisément, au-delà d'une humidité relative de l'air supérieure à 80 %, le mouvement de l'air est indispensable pour limiter la sensation d'inconfort².

Nous aurons l'occasion de développer ces considérations physiologiques, dans la mesure où elles seront au centre des premiers travaux sur la conception bioclimatique. L'architecture tropicale a indirectement contribué au développement de la conception bioclimatique : des ouvrages comme *Le Confort dans l'habitat en pays tropical* de Dreyfus, qui marque une première « mise au point³ » des travaux internationaux sur le sujet, seront repris par la suite. Ces recherches se poursuivront jusqu'au milieu des années 1970, comme en témoigne la publication d'importants manuels consacrés à ce sujet en 1969⁴ par Baruch Givoni, et en 1974, par Otto Koenigsberger et d'autres architectes, qui reprend un cours sur l'architecture tropicale donné à partir de 1953 avec Maxwell Fry à l'Architectural Association à Londres⁵. Certains de ces manuels constitueront les sources principales de nombreux architectes lors du développement de la conception bioclimatique après 1973, dans la mesure où leur présentation des phénomènes climatiques, thermiques et physiologiques est souvent complète et d'une grande rigueur.

En ce qui concerne le développement des travaux en architecture tropicale, ils se caractérisent par l'intégration d'autres domaines de connaissances que les travaux précédents, comme la physiologie et la science des phénomènes thermiques, pour résoudre les problèmes de conception en architecture à partir du climat. La climatologie et la microclimatologie sont généralement utilisées pour caractériser les climats tropicaux afin d'orienter la conception vers la protection contre les effets de la chaleur et de l'humidité excessive, à l'exclusion de tous les problèmes de chauffage que posent majoritairement les climats tempérés et froids. On peut suivre, à travers les développements de l'architecture tropicale, l'émergence d'une méthode de conception située et adaptée à des contraintes climatiques spécifiques : ils constituent les premiers travaux en architecture sur la conception à partir du climat, qui synthétisent l'ensemble des connaissances disponibles à l'époque sur ce sujet.

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 82.

2 J. Dreyfus, « La Protection thermique des constructions en pays tropical. Principes généraux, notion d'inertie thermique », op. cit., p. 212.

3 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 16

4 B. Givoni, *Man, Climate and Architecture*, Amsterdam : Elsevier, (coll. Elsevier Architectural Sciences Series), 1969, 377 p. trad. *L'Homme, l'architecture et le climat*, Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par Jean-Louis Izard, 1978.

5 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., 320 p.

Cependant ces travaux sont limités, dans la mesure où ils ne s'appliquent qu'à des types de climats bien déterminés et restent concentrés sur les problèmes posés par les climats tropicaux. Si Dreyfus affirme que la méthode présentée dans *Le Confort dans l'habitat en pays tropical* possède « une portée générale¹ », celle-ci concerne exclusivement « les pays où se pose principalement un problème de protection contre la chaleur² ». D'autres travaux, comme ceux d'Ayoub, proposent d'appliquer le « contrôle thermique naturel³ » développé dans les climats tropicaux aux zones tempérées, mais ce contrôle concerne essentiellement les effets de la chaleur. De plus, ces travaux essentiellement théoriques sont adressés à des spécialistes : l'abondance de calculs thermiques complexes et la complexité des phénomènes physiques qu'ils présentent rendent les publications sur l'architecture tropicale difficilement communicables et compréhensibles sans une formation scientifique complète. Pour conclure, il manque à l'ensemble de ces recherches sur l'architecture tropicale la généralité qui caractérisera la conception bioclimatique par la suite, et qui était sous-jacente à l'ensemble des travaux évoqués précédemment en microclimatologie et en climatologie appliquée à l'architecture.

I.3. Concevoir avec le climat selon Victor et Aladár Olgyay

Le nom de Victor G. Olgyay (1910-1970) est associé à la naissance de la conception bioclimatique, définie comme une méthode théorique de conception à partir du climat ou « avec le climat », pour traduire le titre de son ouvrage le plus important, publié en 1963 et intitulé *Design with Climate*. Cette partie se concentre essentiellement sur les travaux théoriques développés par Victor Olgyay et par son frère jumeau Aladár Olgyay (1910-1963), avec qui il a collaboré. D'abord formés en Hongrie, où ils ont réalisé de nombreux projets avec une attention particulière aux protections solaires dans les années 1940⁴, Victor et Aladár Olgyay ont également étudié à l'Université de Columbia, et ont définitivement émigré aux États-Unis à la suite de la seconde guerre mondiale en 1947. Ils enseignent d'abord à l'Université Notre-Dame à Indiana, puis au MIT en 1950 où ils vont notamment collaborer avec le climatologue

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 15.

2 Ibid.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 74.

4 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 203-205.

Paul Siple¹. Mais c'est à l'Université de Princeton qu'ils vont mener l'essentiel de leurs travaux de recherche, aboutissant à la formalisation d'une méthode de conception bioclimatique en 1963. Les recherches de Victor et Aladár Olgyay ont été très largement diffusées aux États-Unis et dans le monde. Le rôle de ces architectes est central à double titre : ils ont, d'une part, tenté de fonder la conception bioclimatique comme une méthode, en synthétisant la majeure partie des travaux évoqués précédemment ; d'autre part, ils ont participé à la diffusion à l'échelle internationale de l'intérêt pour le sujet, notamment à travers la circulation de l'ouvrage *Design with Climate* publié en 1963, dont nous allons détailler le contenu et la nouveauté.

I.3.1. De la « maison tempérée » à une méthode « universelle »

I.3.1.1. Le défi théorique de tempérer une maison sans équipements mécaniques

La contribution décisive de Victor et Aladár Olgyay à une démarche prenant en compte le climat et l'environnement en architecture, ainsi que les problématiques énergétiques qui en découleraient, est unanimement reconnue par les auteurs contemporains. Barber y consacre de longs développements², tandis que Kiel Moe³ et John Reynolds⁴ donnent une grande importance historique aux travaux des frères Olgyay. Bien que leur intérêt pour le climat puisse remonter à leur formation à Columbia dans les années 1930⁵, on peut dater précisément les premiers travaux de Victor Olgyay explicitement consacrés à la prise en compte des facteurs climatiques dans la conception en architecture : ils sont publiés en mars 1951 dans la célèbre revue *The Architectural Forum*, la même revue où a été publié l'article « Microclimatology » de Landsberg en 1947. Il s'agit d'un article de quelques pages, abondamment illustré et intitulé « The Temperate House » (« La Maison tempérée »)⁶. On y trouve les premiers jalons de la méthode de conception à partir du climat que Victor Olgyay développera par la suite, avec l'aide

1 *Ibid.*, p. 207.

2 *Ibid.*, p. 198-245.

3 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, *op. cit.*, p. 203-204.

4 J. Reynolds, « The Roots of Bioclimatic Design », in : V. Olgyay *et. al.*, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. IX-XI.

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 203.

6 V. Olgyay, « The Temperate House », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 94(3), New York : Time, mars 1951, p. 179-194.

de son frère. Les noms de Landsberg, de Siple, de Markham ainsi que le *Climate Control Project* sont mentionnés dans les références.

Dès les premières lignes de cet article, Olgyay pose les bases de son approche de la conception : il affirme vouloir se passer de l'utilisation des systèmes mécaniques de conditionnement d'air. Il écrit :

« Bien que les concepteurs et les constructeurs de maisons aient eu depuis quelque temps une grande batterie de gadgets mécaniques pour surmonter les conditions météorologiques inconfortables, ils ont récemment mis au point une méthode encore meilleure [...] qui est aujourd'hui particulièrement importante car elle n'implique aucun produit rare autre que la connaissance¹. »

Dans cet extrait, il est remarquable qu'Olgyay mette en avant la connaissance nécessaire à la mise en œuvre de la méthode qu'il évoque et qui consiste à agir sur « la météo à l'intérieur de la maison² » et ce, « par des moyens naturels³ ».

La méthode qu'il envisage repose sur un rejet des techniques conventionnelles de conditionnement d'air, au profit d'une approche qui valoriserait la connaissance des phénomènes naturels, notamment climatiques et microclimatiques, et leur contrôle en vue de produire une ambiance confortable. Olgyay utilise les notions de « contrôle climatique » et de « contrôle environnemental », vraisemblablement issues de l'ouvrage de Markham et popularisées par le *Climate Control Project*. De par sa formation, il est également sensible aux évolutions imposées par l'architecture moderne et il côtoie des figures importantes du mouvement moderne en architecture, comme Marcel Breuer⁴. Il est cependant critique des formes de l'architecture moderne, à travers l'influence de Mies van der Rohe et l'usage de produits industrialisés, particulièrement des grandes surfaces vitrées. Il estime que ce type d'architecture moderne est « plus vulnérable que jamais au climat⁵ » et particulièrement « à la chaleur, au vent, à l'humidité, aux ouragans, aux tremblements de terre, aux précipitations et aux chutes de neiges, et surtout

1 V. Olgyay, « The Temperate House », *op. cit.*, p. 179. Traduction personnelle, citation originale : « Although house designers and builders have for sometime had a great battery of mechanical gadgets with which to overcome uncomfortable weather, they recently have had clarified even a better method, design, which today is particularly important because it involves no scarce commodity other than knowledge. »

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « do something about the weather inside houses—by natural means. »

4 V. W. Olgyay, « A Rational Regionalism », in : V. Olgyay *et. al.*, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. XVI.

5 V. Olgyay, « The Temperate House », *op. cit.*, p. 180.

au soleil, le plus important des facteurs climatiques contrôlables d'aujourd'hui¹. » À l'inverse, les constructions traditionnelles situées sur le sol américain exprimeraient toutes un certain régionalisme, issu d'une adaptation progressive des techniques constructives et des styles architecturaux importés aux États-Unis à la diversité des caractéristiques climatiques de ce territoire. Cette thématique du régionalisme traverse tous les travaux d'Olgyay et elle sera reprise en 1963 afin de justifier la légitimité de la conception bioclimatique.

Corrélativement, Olgyay insiste sur l'abondance de l'énergie solaire issue du climat. Pour donner une première idée de l'importance de cet apport énergétique, il affirme que « [l'énergie] solaire tombant sur une zone de la Terre de deux miles carrés [$\approx 3,2 \text{ km}^2$] a été estimée comme l'équivalent de cette terrible énergie libérée lors de l'explosion d'une bombe atomique² », et que si cette énergie reçue « sur une surface de 10×10 miles carrés [$\approx 16 \times 16 \text{ km}$] pouvait être convertie, elle fournirait l'énergie nécessaire pour alimenter les États-Unis³. » Ce genre d'estimation est sans signification tant que l'on ne fait pas intervenir le rendement théorique pour convertir cette énergie incidente. Néanmoins, ces valeurs permettent de donner une idée de l'importante quantité d'énergie issue du rayonnement solaire. Olgyay poursuit en affirmant que « [tout] ce rayonnement solaire non converti signifie une immense quantité d'énergie naturelle dont le concepteur doit se soucier⁴ », le problème de l'architecte étant, à partir de la prise en compte de ce phénomène, de « construire un abri qui s'adaptera à la variation saisonnière, quotidienne et horaire de l'intensité du rayonnement solaire⁵. »

Pour appuyer cet objectif, Olgyay présente une série de graphiques exprimant la quantité d'énergie solaire reçue par une façade en fonction de son orientation aux solstices et aux équinoxes, ainsi qu'un schéma représentant les proportions de ces quantités pour l'hiver et l'été (*figure 14*). Il présente l'interprétation suivante de ces visuels :

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « They [Mies' influence and large sheet of glass] both, however, make houses more vulnerable than ever to climate—to heat, wind, humidity, hurricanes, earthquakes, rainfall, and snowfall, and most of all to the sun, the most important of today's controllable climactic factors. »

2 *Ibid.*, p. 180.

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The sun energy falling on an area of the earth two square miles in size has been estimated to be the equivalent of that terrible energy released in the explosion of an atomic bomb. If sun energy which falls on an area 10×10 miles square could be converted, it would furnish the necessary energy to fuel the U. S. »

4 *Ibid.*, p. 180-181.

5 *Ibid.*

« De ces deux séries de diagrammes peuvent être tirées des conclusions importantes pour les constructeurs d'habitations : l'ouest est le plus dangereux en ce qui concerne la surchauffe, car s'il ne capte pas plus de chaleur que le mur est en été, elle est rayonnée au moment de la journée où la chaleur est maximale. Le mur sud est excellent car il capte beaucoup de chaleur en hiver, et moins en été, lorsque le soleil est haut dans le ciel. Le mur est est agréable en hiver et pas aussi gênant que le mur ouest en été. Le mur nord n'absorbe pas la chaleur du soleil en hiver, et relativement peu en été (tôt le matin et tard dans l'après-midi). Le toit est exposé à deux fois plus de chaleur solaire que n'importe quel mur en été¹. »

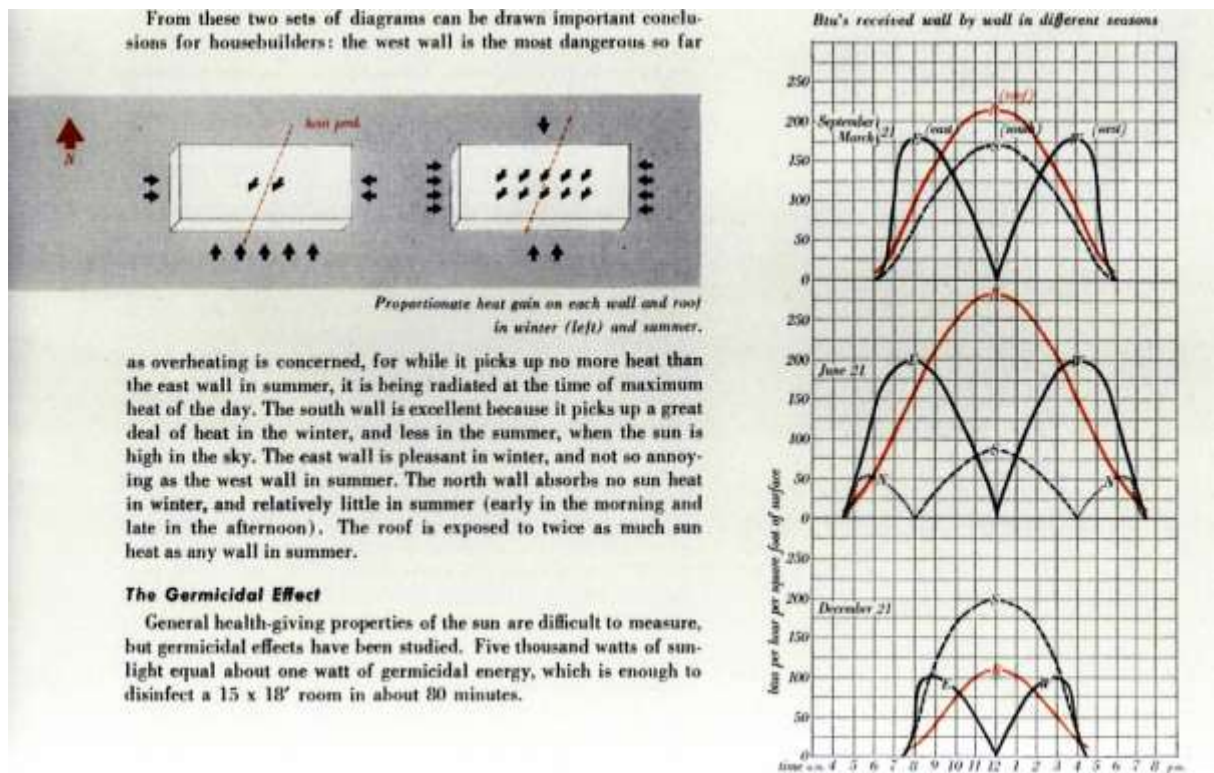


Figure 14 : Apports solaires pour différentes orientations et en toiture en été, en hiver (solstices) et aux équinoxes.

(V. Olgyay, « The Temperate House », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 94(3), New York : Time, mars 1951, p. 181)

1 *Ibid.*, p. 181. Traduction personnelle, citation originale : « From these two sets of diagrams can be drawn important conclusions for housebuilders: the west is the most dangerous so far as overheating is concerned, for while it picks up no more heat than the east wall in summer, it is being radiated at the time of maximum heat of the day. The south wall is excellent because it picks up a great deal of heat in the winter, and less in the summer, when the sun is high in the sky. The east wall is pleasant in winter, and not so annoying as the west wall in summer. The north wall absorbs no sun heat in winter, and relatively little in summer (early in the morning and late in the afternoon). The roof is exposed to twice as much sun heat as any wall in summer. »

Le principe de l'argumentation proposée par Olgyay consiste à s'appuyer en premier lieu sur ces données numériques, pour ensuite en déduire des prescriptions architecturales. À la différence des prescriptions émises dans les *Bulletins* de l'AIA du *House Beautiful Climate Control Project*, ce n'est pas un climatologue qui émet ces prescriptions, mais l'architecte lui-même qui les déduit des données climatiques dont il dispose. Comme dans les travaux d'Aronin et ceux sur l'architecture tropicale évoqués précédemment, on assiste ici à une simplification caractéristique des méthodes de conception à partir du climat : l'ensoleillement est pris en première approximation pour caractériser un climat au niveau local ou régional. Cette approximation se justifie dans la mesure où les surfaces extérieures d'une construction présentent différentes expositions au rayonnement solaire, d'où l'importance des graphiques présentés par Olgyay.

Olgyay imagine une progression dans les moyens de contrôle climatique selon une série de niveaux qui correspondent à des phénomènes d'ordre de grandeur différents¹. Chacun des niveaux de transformation d'un climat local doit permettre d'aplanir la courbe des variations journalière de la température, afin de la maintenir aux alentours de la zone de confort fixée à 70 °F (soit environ 21 °C), valeur qu'il reprend à des travaux en anthropologie qu'il évoque² (*figure 15*). Du climat local préexistant à la construction, un premier niveau de transformation est apporté par « le contrôle environnemental » faisant intervenir la microclimatologie et l'usage de la végétation. À ce premier niveau se superpose un second niveau de transformation du climat local permis par « le contrôle climatique du bâtiment », utilisant les moyens de l'architecture. Enfin, si ces deux niveaux d'intervention ne sont pas suffisants, il existe un troisième niveau de transformation par « le chauffage et rafraîchissement mécanique », faisant appel à l'ingénierie.

L'ordre de ces différents niveaux de transformation est primordial : c'est d'abord par le microclimat, puis par l'architecture que le climat local doit être modulé, l'utilisation de systèmes mécaniques ne devant intervenir qu'en dernier recours, et pour supplanter l'insuffisance des deux niveaux d'intervention précédents. Chacun de ces niveaux modifie les phénomènes à un certain ordre de grandeur et correspond à un domaine de connaissance identifié : d'abord la climatologie, ensuite la microclimatologie puis l'architecture et enfin

1 *Ibid.*, p. 183.

2 *Ibid.*, p. 182.

l'ingénierie¹. L'architecte ayant des connaissances en microclimatologie et particulièrement en botanique est donc apte à produire un microclimat favorable par ces moyens, avant de faire appel à des techniques qui relèvent de l'architecture. La méthode d'Olgay permet de distinguer différents niveaux d'actions correspondant à différentes échelles, du plus éloigné au plus proche de la construction. La végétation et les éléments de l'architecture sont considérés sous l'angle de leur action sur le climat local, comme en témoigne le titre des différentes parties comme « qu'est-ce que la nature peut faire pour nous ? », consacrée aux usages de la végétation², ou « qu'est-ce qu'une saillie peut faire pour nous ? », qui est dédiée à l'étude des saillies et auvents pour la protection solaire des constructions³.

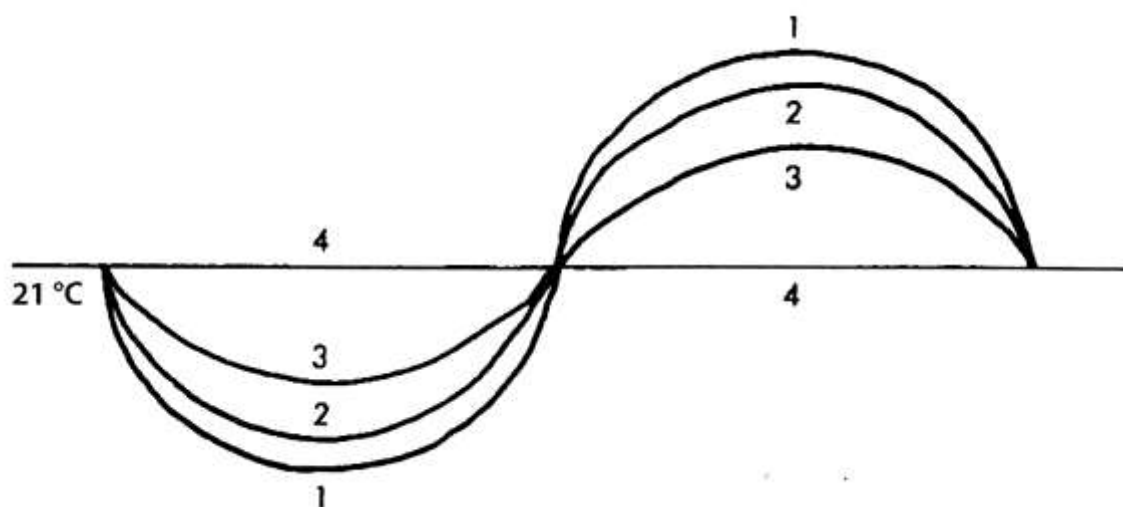


Figure 15 : Schéma représentant la réduction de la variation des températures (1) par la microclimatologie (2), le contrôle climatique par le bâtiment (3) et en dernier recours le chauffage et le rafraîchissement mécanique (4).
(traduit de : V. Olgay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 11)

La démarche présentée par Olgay converge vers une méthode de conception spécifique dont il donne quelques étapes. Elle vise à déterminer sur un diagramme la période durant laquelle la température du site où est envisagée la construction dépasse 70 °F. Olgay considère alors que cette période correspond à l'époque de l'année où la construction doit être protégée du rayonnement solaire afin d'en limiter la surchauffe, par un auvent ou une saillie en toiture,

1 *Ibid.*, p. 183.

2 *Ibid.*, p. 185.

3 *Ibid.*, p. 184.

ainsi que par le positionnement d'arbres¹. Cette méthode n'est cependant qu'une première approche et Olgyay propose une seconde méthode, plus complète, où la même procédure est répétée pour chaque façade sud, est et ouest, ces deux dernières étant particulièrement exposées au rayonnement solaire en été². Les périodes de surchauffe possible pour chaque façade sont représentées sur un calendrier et Olgyay donne des indications de l'ombre produite par différents éléments au cours de l'année pour chaque orientation, comme un arbre et un auvent fixe ou mobile³. En mettant en correspondance les moments de l'année où l'ombre est souhaitée et la nature des ombres produites par ces éléments, il en déduit l'emplacement et la nature des protections solaires pour une maison située à New York (41° nord). Il donne également une estimation de la quantité d'énergie interceptée par ces protections en BTU⁴ et vérifie ses hypothèses sur les ombres produites à l'aide d'une série de photographies d'une maquette présentant la course du soleil et les masques créés par les arbres placés à l'est et à l'ouest (*figure 16*). Bien que ce test soit relativement rudimentaire, Victor Olgyay et son frère Aladár sont connus pour avoir très largement développé par la suite l'usage des maquettes afin de vérifier la performance des protections solaires⁵.

La formalisation d'une méthode qui s'appuie sur des données météorologiques d'une part, et l'action des éléments environnementaux et architecturaux sur le microclimat d'autre part pour en déterminer un agencement favorable, est caractéristique des travaux théoriques de Victor et Aladár Olgyay. Leurs travaux ultérieurs développeront cette approche déductive de la conception, centrée sur la production d'un microclimat favorable, dont la variabilité doit être maintenue au plus proche de la zone de confort grâce à des choix techniques appropriés. Selon Victor Olgyay, une « [planification] logique devrait utiliser les brise-vent, les arbres portant ombrage et les surfaces présentant des réactions favorables au rayonnement⁶ ». Il retrouve ce type de planification dans certaines villes antiques, ainsi que dans l'exposition des parcelles agricoles, notamment la vigne⁷. Son article de 1951 plaide pour une utilisation des connaissances disponibles et l'application de la météorologie et de la microclimatologie afin d'améliorer le confort des habitations, ce qui le place dans la continuité directe des travaux

1 *Ibid.*, p. 187.

2 *Ibid.*, p. 188.

3 *Ibid.*, p. 189.

4 *Ibid.*, p. 190.

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 240-242.

6 V. Olgyay, « The Temperate House », *op. cit.*, p. 185. Traduction personnelle, citation originale : « Logical planning should give use to windbrakes, shade trees, and surfaces with favorable reactions to radiation »

7 *Ibid.*, p. 192.

présentés précédemment¹. Il conclut cet article en donnant des estimations largement optimistes sur les gains de chauffage et de rafraîchissement possibles sans équipements mécaniques. Il écrit qu'en été il est possible de « faire baisser la température intérieure normale maximale jusqu'à 16° [$\approx 9\text{ }^{\circ}\text{C}$] sans équipement mécanique² », alors qu'en hiver il paraît concevable d'augmenter « la température basse normale jusqu'à 18° [$\approx 10\text{ }^{\circ}\text{C}$] sans équipement de chauffage mécanique supplémentaire³ ». Olgyay ne détaille pas les calculs qui étayent ces prévisions.

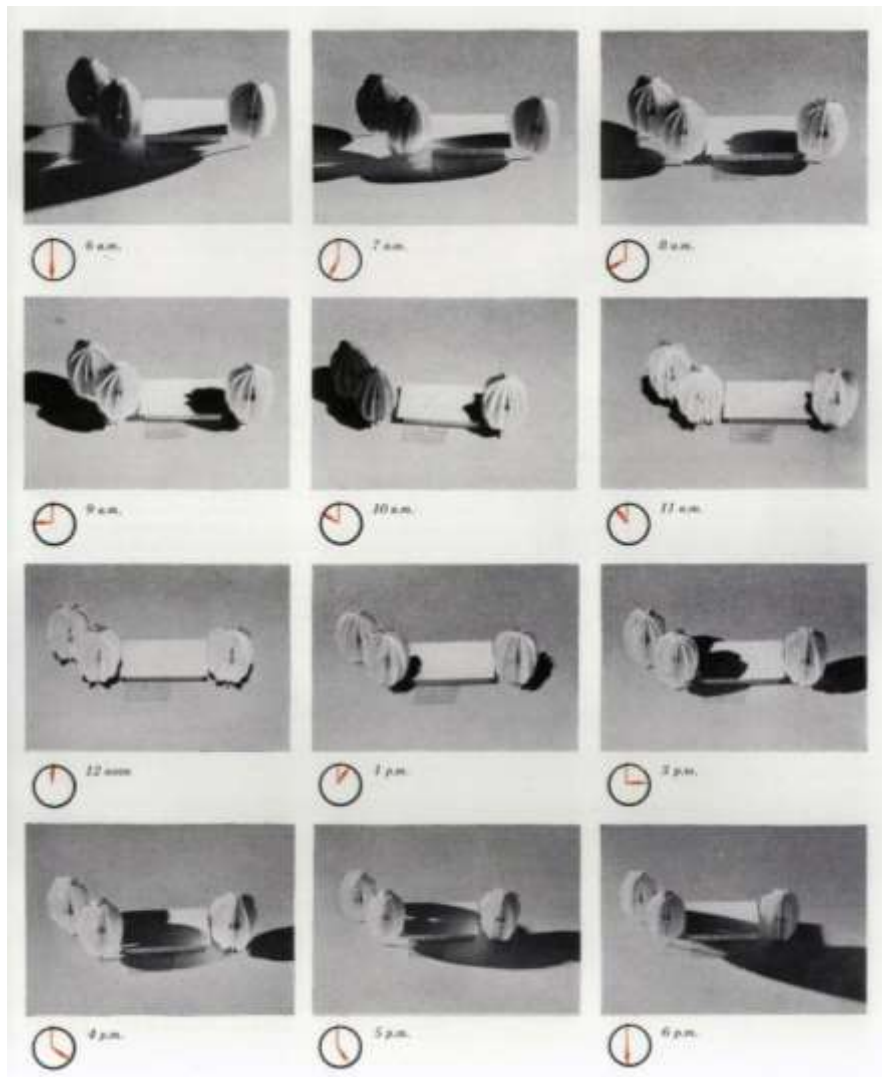


Figure 16 : Photographies des ombres portées par des arbres plantés à l'est et à l'ouest d'une construction pour différentes heures de la journée.

(V. Olgyay, « The Temperate House », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 94(3), New York : Time, mars 1951, p. 191)

1 *Ibid.*, p. 194.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « In summer we can bring down the top normal indoor temperature as much as 16° without mechanical equipment. In winter we can increase the normal low temperature as much as 18° without additional mechanical heating equipment. »

I.3.1.2. La recherche d'une méthode de conception

Ce premier article de 1951 fut remarqué par Aronin qui le mentionne en 1953, mais regrette la difficulté pour interpréter les graphiques qui y sont présentés¹. Il constitue la première tentative d'une série de travaux menés par Victor et Aladár Olgyay sur l'intégration du climat et des données météorologiques à la conception. En 1952, ils obtiennent une bourse de recherche du MIT pour mener une étude sur l'application des données climatiques et microclimatiques à la conception des habitations et publient un rapport complet deux années plus tard intitulé *Application of Climate Data to House Design*² (*Application des données climatiques à la conception des maisons*). Les résultats de ces travaux se heurtent au scepticisme de la part d'autres chercheurs, qui soulignent la complexité de leur sujet de recherche ainsi que le manque de lisibilité de leurs diagrammes³. Le physiologiste australien Douglas H. K. Lee remet en cause la clarté de leur méthode, bien qu'il souligne la qualité de leurs diagrammes, et il doute qu'ils puissent être effectivement utilisés par d'autres architectes⁴. La même année, Victor et Aladár Olgyay sont engagés comme professeurs et chercheurs à l'Université de Princeton pour mener une étude sur l'effet des murs-rideaux sur le comportement thermique des constructions⁵. C'est vraisemblablement à l'occasion de cette étude qu'ils développent un intérêt pour la géométrie et le dimensionnement des protections solaires (brise-soleil, persiennes, auvents, jalousies, balcons...).

L'année 1952 est également marquée par la participation des frères Olgyay à un colloque organisé par le Building Research Advisory Board (BRAB) et intitulé *Housing and Building in Hot-Humid and Hot-Dry Climates* portant sur la construction dans les climats chauds secs et humides⁶. Victor Olgyay y présente une communication intitulée « A Bioclimatic Approach to Architecture » (« Une approche bioclimatique de l'architecture »), tandis que celle présentée par son frère Aladár s'intitule « Solar Control and Orientation to Meet Bioclimatic Needs⁷ » (« Contrôle et orientation solaires pour répondre aux besoins bioclimatiques »). Ces deux communications marquent la première occurrence du terme « bioclimatique » appliqué à

1 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 291.

2 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 207.

3 *Ibid.*, p. 208-209.

4 *Ibid.*, p. 209.

5 *Ibid.*, p. 227.

6 *Ibid.*, p. 209.

7 Building Research Advisory Board (éd.), *Research Conference Report n°5: Housing and Building in Hot-Humid and Hot-Dry Climates*, op. cit. Voir D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 209.

l'architecture et posent les bases de leurs travaux ultérieurs sur les « diagrammes bioclimatiques » et la zone de confort¹ que nous étudierons en détail. Les différentes interventions à ce colloque sont l'occasion de nombreuses discussions sur les problèmes de physiologie posés dans les climats chauds, secs ou humides. Des physiologistes importants, notamment Constantin Yaglou et Douglas H. K. Lee y participent². Les discussions portent également sur la performance des systèmes mécaniques de conditionnement d'air, qui constituent le seul moyen de réduire l'humidité relative de l'air par dessiccation, tout en abaissant sa température. Yaglou souligne que les systèmes non mécanisés, comme les protections solaires ou les choix d'orientation pour favoriser la ventilation, envisagés entre autres par les frères Olgyay, échouent à réguler l'humidité de l'air³. Cette critique constitue un argument décisif en faveur des systèmes de climatisation à compression.

Parallèlement à ces travaux théoriques, Victor et Aladár Olgyay travaillent en tant que consultants sur quelques bâtiments afin d'en concevoir les protections solaires⁴. En 1954, alors professeurs à l'Université de Princeton, ils publient deux articles importants dans la revue *The Architectural Forum*. Le premier publié en mars et intitulé « The Theory of Sol-Air Orientation⁵ » (« la théorie de l'orientation air-soleil ») est dédié à une méthode permettant de déterminer l'orientation d'une construction par la prise en compte de la température extérieure et de l'intensité du rayonnement solaire reçu. Elle s'appuie sur les équations de Mackey et Wright Jr. évoquées précédemment. Cette méthode graphique, dont la présentation reste très lacunaire, propose d'orienter systématiquement les constructions au sud/sud-est, afin de limiter l'exposition au sud-ouest et à l'ouest, qui est plus préjudiciable en période de surchauffe⁶. La prise en compte des vents dominants pour la ventilation n'est pas encore considérée dans cette méthode, comme elle le sera par la suite. Le second article, publié en août 1954, est intitulé « Environment and Building Shape⁷ » (« Environnement et forme du bâtiment »). Il est consacré à une méthode permettant de déduire la forme générale d'une construction en fonction des facteurs climatiques dominants. Par rapport à l'article de mars 1954, les effets du

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 210-211.

3 *Ibid.*, p. 211-212.

4 *Ibid.*, p. 216.

5 A. Olgyay, V. Olgyay, « The Theory of Sol-Air Orientation », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 100(3), New York : Time, mars 1954, p. 133-137.

6 *Ibid.*, p. 136-137.

7 A. Olgyay, V. Olgyay, « Environment and Building Shape », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 101(2), New York : Time, août 1954, p. 105-108.

rayonnement solaire sur les toitures sont explicitement pris en compte, et on trouve une recherche de compromis entre les apports favorables en hiver, et ceux défavorables en été, pour chaque climat considéré¹.

Bien que décisifs pour l'invention de la conception bioclimatique, l'ensemble des articles et publications évoqués précédemment, entre 1951 et 1957, n'ont connu qu'une diffusion relativement limitée et réservée aux spécialistes nord-américains intéressés par le sujet. En 1957, Victor et Aladár Olgyay publient leur premier ouvrage important intitulé *Solar Control & Shading Devices*². Cette publication, rééditée à de nombreuses reprises, connaîtra un succès international. On y trouve rapidement présenté des « Considérations bioclimatiques », ainsi que quelques diagrammes bioclimatiques³. L'ingénieur français Ayoub reprend une grande partie des méthodes graphiques et des illustrations de ce livre dans un dossier publié en langue française dans *Techniques & Architecture* en 1960. Il souligne qu'il s'agit d'un « ouvrage remarquable par la richesse et l'intérêt de sa documentation⁴ ». Indirectement, les travaux des frères Olgyay sur la protection solaire ont donc circulé en France dès cette date. L'ouvrage *Solar Control & Shading Devices* présente un ensemble de méthodes géométriques pour déterminer la forme et la position des protections solaires en fonction de la latitude. Toutes ces méthodes ne semblent pas avoir été mises au point par les frères Olgyay, et leur ouvrage constitue plus vraisemblablement un travail de synthèse et de développement de méthodes géométriques déjà existantes, qui sont regroupées dans la première partie de l'ouvrage. La seconde partie est consacrée à une présentation de différentes réalisations construites à partir des années 1930, souvent peu connues, et qui se singularisent par leur usage de protections solaires, et notamment de jalousies et de persiennes. Chaque réalisation est accompagnée d'un diagramme solaire qui reproduit approximativement les périodes de l'année durant lesquelles les protections solaires sont efficaces. Ce type de document, bien qu'approximatif, rend cette publication particulièrement originale⁵.

La même année, Aladár Olgyay publie un article intitulé « Thermal Economics of Curtain Walls » (« Économie thermique des murs-rideaux »), issu de ses recherches

1 *Ibid.*, p. 106.

2 A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control & Shading Devices*, Princeton : Princeton University Press, 1957, 201 p.

3 A. Olgyay, V. Olgyay, « Bioclimatic Considerations », *Solar Control & Shading Devices*, Princeton : Princeton University Press, 1957, p. 19-23.

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 102.

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 242-243.

personnelles sur les murs-rideaux ainsi qu'un rapport complet sur le sujet¹. Durant la période 1958-1963, Victor Olgyay réalise une vingtaine de constructions, en s'appuyant sur les méthodes développées avec son frère². Il conçoit également une maison pour le concours *Living with the Sun* en 1957³. Pendant cette période, certains architectes importants en viennent à critiquer leurs méthodes, qui auraient pour effet de considérablement limiter l'expression personnelle de l'architecte⁴. En septembre 1960, Victor Olgyay participe en compagnie de Dreyfus et de Landsberg au deuxième congrès international de bioclimatologie à Londres. Olgyay y présente une communication intitulée « Bioclimatic evaluation method for architectural application ⁵ » (« Méthode d'évaluation bioclimatique pour application architecturale »), tandis que la communication de Dreyfus porte sur « La Protection thermique des constructions en pays tropical⁶ ». Dans ce même congrès l'architecte et médecin israélien Baruch Givoni, travaillant au Technion d'Haïfa et sur lequel nous aurons l'occasion de revenir, présente un exposé intitulé « The Effect of roof construction upon indoor temperatures⁷ » (« L'effet de la construction du toit sur les températures intérieures »). Bien qu'il n'y ait pas trace d'éventuels échanges entre ces trois chercheurs, on peut supposer qu'ils se soient rencontrés et aient échangé lors de cet événement, dans la mesure où leurs exposés relevaient du domaine de l'architecture, et se distinguaient des autres contributions relatives à la physiologie, à la médecine, à la botanique ou à la zoologie en milieu tropical. La participation d'Olgyay à cet événement permet néanmoins d'affirmer qu'il connaissait les travaux en architecture tropicale évoqués précédemment, et représentés dans ce congrès par Dreyfus et Givoni, ainsi que par d'autres contributions sur la physiologie en climat tropical.

1 *Ibid.*, p. 214.

2 V. W. Olgyay, « A Rational Regionalism », in : V. Olgyay *et. al.*, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. XVIII.

3 *Ibid.*, p. XVI. Voir : D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, *op. cit.*, p. 231-232.

4 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 238.

5 V. Olgyay, « Bioclimatic evaluation method for architectural application », in : S. W. (éd.) *Biometeorology: Proceedings of The Second International Bioclimatological Congress held at The Royal Society of Medicine, London, 4-10 Sept. 1960*, Oxford : Pergamon Press, (coll. Symposium Publications Division), 1962, p. 246-261.

6 J. Dreyfus, « La Protection thermique des constructions en pays tropical. Principes généraux, notion d'inertie thermique », in : S. W. (éd.) *Biometeorology*, *op. cit.*, p. 209-236.

7 B. Givoni, « The Effect of roof construction upon indoor temperatures », in : S. W. (éd.) *Biometeorology*, *op. cit.*, p. 237-245.

I.3.1.3. La publication de *Design with Climate* en 1963

En 1963, Aladár décède des suites d'une crise cardiaque¹. La même année, Victor Olgyay publie leur second ouvrage majeur intitulé *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, qu'il signe cependant de son nom, tout en mentionnant le fait que certains chapitres ont été écrits en collaboration avec son frère, malgré le fait que leurs intérêts aient divergé au début des années 1960². *Design with Climate* est véritablement le premier ouvrage théorique explicitement consacré à la conception bioclimatique et on y trouve les bases de l'ensemble des développements ultérieurs sur cette méthode de conception. Cet ouvrage synthétise et complète l'ensemble de leurs articles publiés dès 1951 et vise à présenter une méthode cohérente de « conception avec le climat », à travers ce que Victor Olgyay nomme « l'approche bioclimatique ». Olgyay présente l'ambition de l'approche bioclimatique comme une « méthode universellement applicable pour le contrôle climatique architectural³ » qui « doit reposer sur des fondations plus larges que celles utilisées jusqu'à présent [...] accompagnées d'une analyse plus minutieuse d'une zone spécifique⁴. » L'étude des microclimats est ainsi primordiale dans la méthode de conception mise au point par Olgyay, qui consacre un chapitre spécifique dédié à la « sélection du site⁵ » largement inspiré des recherches de Geiger. Olgyay envisage sa méthode comme une « procédure⁶ » qui permet de concevoir une construction suivant les « potentialités⁷ » du monde naturel.

Cette méthode de conception avec le climat est motivée par des objectifs très concrets, notamment l'économie des coûts engendrés par le chauffage et le conditionnement mécanique de l'air. Olgyay estime que c'est « la tâche de l'architecte de faire usage au maximum des moyens naturels disponibles afin de produire une maison plus saine et vivable, et de réaliser une économie de coûts en limitant au minimum l'utilisation des aides mécaniques pour le

1 V. W. Olgyay, « A Rational Regionalism », in : V. Olgyay et. al., *Design with Climate, op. cit.*, p. XVIII.

2 V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. V.

3 *Ibid.*, p. 10.

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « A universally applicable method for architectural climate control must be based on broader foundations than have been used heretofore, and they must be accompanied by more careful analysis of a specific area. »

5 *Ibid.*, p. 44-52.

6 *Ibid.*, p. 10.

7 *Ibid.*

contrôle climatique¹. » Il n'envisage pas l'approche bioclimatique comme une spécialité, ni une école ou un mouvement en architecture, mais bien comme une méthode permettant de prendre en compte le climat, utilisable par les architectes afin de concevoir des constructions confortables et limitant le recours au conditionnement mécanique de l'air. Néanmoins, l'approche bioclimatique nécessite d'intégrer des critères de conception précis, qui reposent essentiellement sur une prise en compte des phénomènes thermiques en relation avec certains facteurs climatiques dominants et par rapport à une zone de confort. Olgyay affirme que l'objectif de sa méthode de conception « est d'établir un environnement intérieur qui se rapproche le plus des conditions de confort dans un environnement climatique donné² » et ce, en utilisant « les possibilités naturelles pour améliorer les conditions sans l'aide d'un appareil mécanique³. »

Bien qu'il s'agisse avant tout d'une méthode de conception, l'approche bioclimatique se caractérise principalement par la généralité et l'universalité de son projet. Le but assumé par Olgyay est à la fois de comprendre les facteurs climatiques à l'origine de la répartition géographique des constructions traditionnelles, et de fournir une méthode pour concevoir les constructions en fonction des facteurs climatiques et des données météorologiques disponibles pour une localité. Il souhaite ainsi retrouver un régionalisme dans les formes de l'architecture, par la prise en compte du climat régional dans la méthode de conception. Le caractère général de ce projet se manifeste dans l'abondance des références que mobilise Olgyay, qui s'appuie par exemple sur des travaux de géographie humaine en langue française⁴, notamment l'étude du géographe et cartographe Jean Dollfus dédiée à un recensement mondial de l'habitat populaire publiée en 1954⁵. Il reprend des travaux de Dollfus l'idée que la répartition de chaque style traditionnel de construction ne suit pas les frontières culturelles ou politiques, mais dépend de zones climatiques qui caractérisent des formes régionales d'architecture. Aux basses latitudes la toiture est l'élément essentiel de la construction, alors qu'aux latitudes tropicales et

1 *Ibid.*, p. 23. Traduction personnelle, citation originale : « It is the task of the architect to make utmost use of the natural means available in order to produce a more healthful and livable house, and to achieve a saving in cost by keeping to a minimum the use of mechanical aids for climate control. »

2 *Ibid.*, p. 126.

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The aim in designing a structure thermally is to establish an indoor environment which most nearly approaches comfort conditions in a given climatic setting. In architectural terms this means that the planning and structure of a building should utilize natural possibilities to improve conditions without the aid of mechanical apparatus. »

4 *Ibid.*, p. 188-189.

5 J. Dollfus, *Les Aspects de l'architecture populaire dans le monde*, Paris : Albert Morancé, 1954, 134 p.

tempérées chaudes les murs ont aussi une fonction indispensable de régulation thermique¹. Mis à part Dollfus, Olgyay fait un usage abondant des recherches de J. W. Drysdale, de Geiger, de Landsberg et de Yaglou, que nous avons évoquées précédemment et dont il synthétise les résultats les plus importants.

La publication de *Design with Climate* en 1963 peut être considérée comme un événement crucial pour la naissance de la conception bioclimatique en architecture : cet ouvrage synthétise une grande partie des travaux antérieurs en architecture comme en microclimatologie ainsi qu'en physiologie, et il pose les bases des développements ultérieurs sur le sujet, ce qui justifie que nous lui consacrons une analyse spécifique afin d'en présenter toute la nouveauté. Il est cependant impossible de présenter l'approche bioclimatique dans tous ces détails, dans la mesure où les procédures et les diagrammes présentés dans *Design with Climate* sont complexes et parfois lacunaires. Néanmoins, l'originalité de la méthode de conception bioclimatique présentée en 1963 peut se caractériser par deux axes : l'utilisation des « diagrammes bioclimatiques » et de procédures d'intégration des données climatiques et météorologiques d'une part, et la recherche d'une compréhension et d'une visualisation précise des variations thermiques et climatiques d'autre part. Nous évoquerons dans un dernier temps les difficultés et les limites de la méthode mise au point par Olgyay.

1.3.2. La conception bioclimatique comme méthode

1.3.2.1. Une méthode de conception essentiellement analytique

L'approche bioclimatique telle qu'elle est présentée par Victor Olgyay en 1963 est essentiellement une « approche analytique² » plus que créative de l'architecture, bien qu'il affirme que ces deux dimensions soient à parts égales. Il estime que, jusqu'à cette date, l'architecture est restée « à un stade subjectif d'essai et d'erreur³ », et qu'il est à présent nécessaire d'adopter « les techniques du raisonnement analytiques⁴ » afin de concevoir différemment et à partir du climat. L'historien de l'architecture Barber qualifie les méthodes développées par Victor et Aladár Olgyay de « protos computationnelles⁵ », dans le sens où elles

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 6-7.

2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. V.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « architecture so far has been in a subjective trial-and-error stage; it must adopt the techniques of analytical reasoning to mature properly. »

5 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 198.

maximisent le recours à des données numériques et l'usage de procédures suivant une séquence définie, afin de séparer les étapes identifiées de la méthode de conception. On pourrait effectivement considérer leur méthode comme une forme de « programmation analogique¹ » comme la présente Barber, tout en insistant sur le fait que les procédures mises au point par Olgyay n'ont rien d'un programme, dans la mesure où toutes les opérations ne sont pas détaillées et font systématiquement intervenir des choix qualitatifs opérés par un sujet conscient. Néanmoins, on distingue nettement dans *Design with Climate* un effort analytique qui consiste à présenter les données utilisées, les résultats quantitatifs et qualitatifs obtenus, ainsi que les choix définitifs qui sont effectués et leurs justifications, selon une démarche essentiellement démonstrative.

Cette volonté de produire une méthode analytique et démonstrative nécessite la convergence de nombreuses sciences. De la même manière que Geiger avait identifié la microclimatologie comme une « science limite² », Victor Olgyay estime que la méthode nécessaire pour produire une construction « climatiquement équilibrée » existe « entre les limites de plusieurs domaines de connaissances. » Il écrit :

« Une approche systématique des conditions climatiques équilibrées pose un problème complexe puisque la procédure elle-même existe entre les limites de plusieurs domaines de connaissances. On peut facilement identifier deux de ces domaines : la climatologie et l'architecture, qui contiennent le début et la fin du problème. En combinant ces deux champs, des considérations pour la conception de bâtiments peuvent être déduites³. »

En réalité, Victor Olgyay mobilise plus que deux champs : la biologie et la physiologie sont notamment utilisées, en plus de la climatologie et de la microclimatologie. Ces champs déterminent des étapes préliminaires à la conception. Ainsi, la méthode de conception d'une maison « climatiquement équilibrée » peut être divisée en quatre étapes que sont « l'étude des variables du climat, de la biologie et de la technologie⁴ », la dernière étape étant celle de

1 *Ibid.*

2 R. Geiger, « Microclimatologie », in : *La Météorologie*, op. cit., p. 86.

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 10. Traduction personnelle, citation originale : « A systematic approach to climate-balanced conditions poses an intricate problem since the procedure itself exists between the borderlines of several fields of knowledge. One can readily identify two of these fields: climatology and architecture, which contain the beginning and the end of the problem. By combining these two fields, considerations for building design can be deduced. »

4 *Ibid.*, p. 11.

« l'expression architecturale¹. » En reléguant l'expression architecturale en dernier lieu, Olgyay souhaite mettre en avant le caractère objectif de la méthode qu'il propose, qui permet de décomposer le problème de la conception à partir du climat en différentes étapes. On remarque que le programme, l'étude des usages ou l'économie générale du projet, qui sont des éléments primordiaux d'un projet en architecture et qui focalisent l'essentiel des problèmes de conception, ne sont pas évoqués. Bien qu'en théorie la méthode envisagée par Olgyay puisse s'appliquer à tout type de projet, dans *Design with Climate* celle-ci se focalise essentiellement sur la conception de maisons individuelles neuves, et vraisemblablement en milieu urbain peu dense, cette configuration permettant d'éliminer de nombreux problèmes (accès, voisinage, réglementation...).

Des quatre étapes envisagées par Olgyay, les deux premières sont essentiellement analytiques. La première étape « est une étude des éléments climatiques à un endroit donné² », ce qui présuppose la disponibilité de données météorologiques telles que la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire et les effets du vent pour une station suffisamment proche du site envisagé. La seconde étape « consiste à évaluer chaque impact climatique en termes physiologiques³ », ce qui revient à interpréter les données précédentes par rapport à leurs effets sur une zone de confort établie *a priori*. La troisième étape consiste à interpréter ce diagnostic climatique et physiologique, afin d'en déduire des solutions techniques pour maintenir les variations climatiques dans les limites ou aux abords de la zone de confort, par des moyens graduels qui vont de l'aménagement du site en vue de produire des effets microclimatiques favorables jusqu'à l'utilisation éventuelle, et en dernier recours, des systèmes mécaniques de conditionnement d'air selon le schéma déjà présenté en 1951 (*figure 15*, p. 128). Ces solutions techniques interviennent dès le choix du site et de l'orientation, mais également par le choix de la morphologie générale de la construction et l'utilisation des brises favorables, ainsi que par le calcul des protections solaires et la régulation thermique permise par les choix judicieux de matériaux⁴. La dernière étape consiste à combiner ces techniques et à les intégrer

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The process of building a climate-balanced house can be divided into four steps, of which the last is architectural expression. Architectural expression must be preceded by study of the variables in climate, biology, and technology. »

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The first step toward environmental adjustment is a survey of climatic elements at a given location »

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « the second step is to evaluate each climate impact in physiological terms. »

4 *Ibid.*, p. 12.

dans une « unité¹ » suivant une expression architecturale. Cette dernière étape est la plus subjective, quoique cette subjectivité soit contenue par la nécessité d'y intégrer les décisions prises durant les étapes précédentes. Olgyay interprète cette séquence de conception dans le sens « Climat → Biologie → Technologie → Architecture². »

1.3.2.2. Les diagrammes bioclimatiques, un outil parmi d'autres

Afin de synthétiser les deux premières étapes, Olgyay propose d'utiliser un outil graphique, le « diagramme bioclimatique³ » (*figure 17*) qu'il a présenté en 1952, et qui est dérivé des diagrammes psychrométriques évoqués précédemment et utilisés par l'ASHVE. Ce diagramme présente l'humidité relative en abscisse et la température sèche en ordonnée. L'utilisation de ces valeurs pour qualifier un climat est justifiée par le fait que la température et l'humidité relative sont les deux paramètres les plus importants pour déterminer le confort thermique. La zone de confort est également repérée dans le diagramme (*confort zone*). Victor Olgyay développe de longues considérations sur la physiologie et s'appuie sur les travaux de l'anglais Thomas Bedford, de Markham et du climatologue C. E. P. Brooks afin de fixer les limites des températures sèches et de l'humidité relative pour la zone de confort⁴. Il reprend également les travaux de C. P. Yaglou sur la température effective, menés en collaboration avec F. C. Houghton dans les années 1920, qui font intervenir la vitesse de l'air, en plus de l'activité et de l'habillement⁵. Il prend également en compte les évolutions du calcul de la température effective, issues des critiques venues d'études de terrain qui affirmaient que ce calcul surestimait les effets de l'humidité relative, mais sous-estimait ceux des températures élevées⁶.

À partir de ces différents travaux, la zone de confort est conventionnellement fixée entre 30 % et 65 % d'humidité relative de l'air, pouvant s'étendre jusqu'à 20 % et 78 %, mais se réduisant graduellement au-delà de 50 %. En ce qui concerne les températures, la limite inférieure est fixée à 70 °F, soit environ 21 °C en été et à 69 °F, soit environ 20,5 °C en hiver. La limite supérieure est fixée à 82 °F, soit environ 28 °C en été, à condition de ne pas être au-delà de 50 % d'humidité relative, et à 76 °F, soit environ 24,5 °C en hiver. Cependant, Victor

1 *Ibid.*, p. 11.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 22.

4 *Ibid.*, p. 17.

5 *Ibid.*, p. 18.

6 *Ibid.*

Olgyay affirme qu'étant donné l'hétérogénéité des résultats des travaux qu'il a évoqués, il n'existe aucun critère précis pour déterminer la zone de confort, les limites de celle-ci étant « arbitraires¹ » selon son expression. Il donne une définition essentiellement négative du confort qui désignerait « la situation où aucune sensation d'inconfort ne se produit². » Cette définition sera abondamment reprise par la suite dans la littérature traitant de la conception bioclimatique³. Olgyay précise également que la sensation d'inconfort dépend de très nombreux paramètres tels que l'âge, le sexe, l'habillement ou l'acclimatation. Dès lors, il estime que la zone de confort permet de repérer les valeurs de température sèche et d'humidité relative pour lesquelles une « personne moyenne⁴ » n'a pas de sensation d'inconfort. De plus, il donne des indications pour déplacer la zone de confort sur le graphique afin de la repérer pour des latitudes plus basses que le 40^e parallèle, faisant ainsi intervenir l'acclimatation, tout en fixant la limite supérieure absolue de la zone de confort à 85 °F (29,5 °C⁵).

À partir de ce diagramme, on peut repérer les relevés météorologiques horaires d'une station pour chaque mois, ce qui donne une image bien plus précise du climat local que des valeurs moyennes. Olgyay reprend les données fournies dans les *Bulletins* de l'AIA lors du *Climate Control Project*, dont il souligne les « excellentes analyses régionales⁶ » tout en précisant qu'elles relèvent du « macroclimat⁷ », ce qui est une référence directe aux travaux de Geiger. Les données météorologiques horaires sont manuellement repérées sur un diagramme bioclimatique, ce qui est un travail particulièrement laborieux (*figure 18*). Les points sont ensuite reliés pour chaque mois. Olgyay représente ces données pour les zones de New York illustrant un climat tempéré, de Minneapolis illustrant un climat froid (*figure 19*), Phoenix illustrant un climat chaud et sec (*figure 20*) et Miami illustrant un climat chaud et humide (*figure 21*). La longueur des zones repérées pour chaque mois traduit l'amplitude mensuelle des variations de température : plus une zone est ramassée et moins l'amplitude est grande. Toutes ces opérations de repérage de données météorologiques font partie de l'utilisation des diagrammes psychrométriques, employés par les ingénieurs dès le milieu des années 1930, bien que les données utilisées ici soient considérablement plus précises. Dans les diagrammes

1 *Ibid.*, p. 18.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « where no feeling of discomfort occurs. »

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 70.

4 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 18.

5 *Ibid.*, p. 19.

6 *Ibid.*, p. 24.

7 *Ibid.*, p. 26.

psychrométriques que Dreyfus présente en 1960, seules les moyennes mensuelles sont repérées¹, ce qui donne une image particulièrement grossière du climat considéré, d'autant plus pour les zones intertropicales où l'amplitude diurne des températures est souvent supérieure à l'amplitude annuelle².

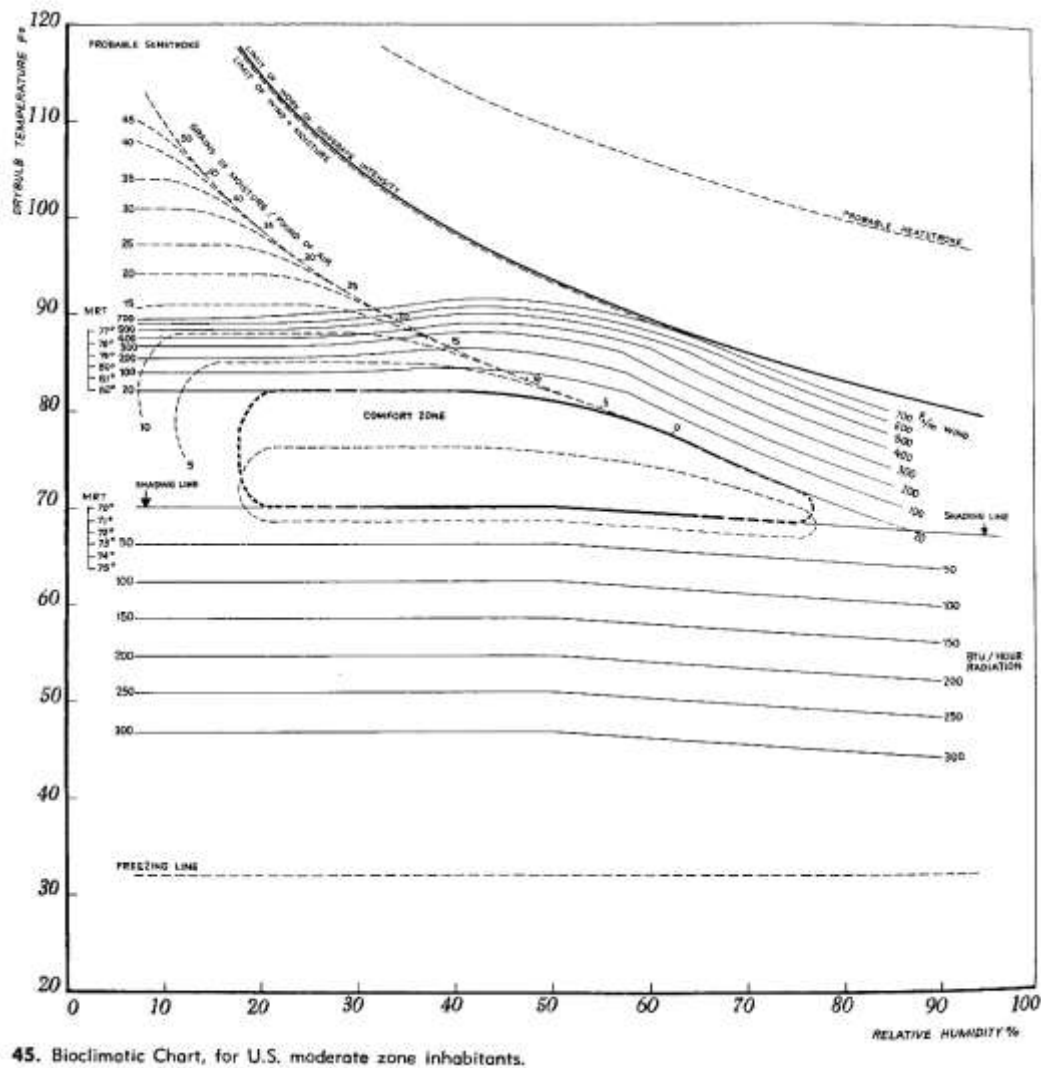


Figure 17 : Diagramme bioclimatique d'Olgyay.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 22)

- 1 J. Dreyfus, « La Protection thermique des constructions en pays tropical. Principes généraux, notion d'inertie thermique », in : S. W. (éd.) *Biometeorology*, *op. cit.*, p. 213-215.
- 2 « Le fait thermique essentiel concernant le domaine intertropical a été mis en valeur par Troll : dans ces régions, l'amplitude diurne de température – différence moyenne entre les minima et les maxima relevés chaque jour – est supérieure à l'amplitude annuelle – différence entre les températures moyennes du mois le plus chaud et du mois le plus froid. » Voir : Ch. Péguy, *Précis de climatologie*, *op. cit.*, p. 131.

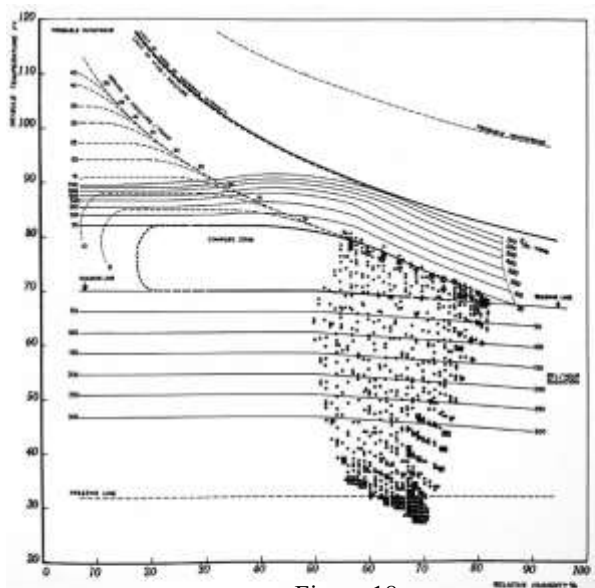


Figure 18

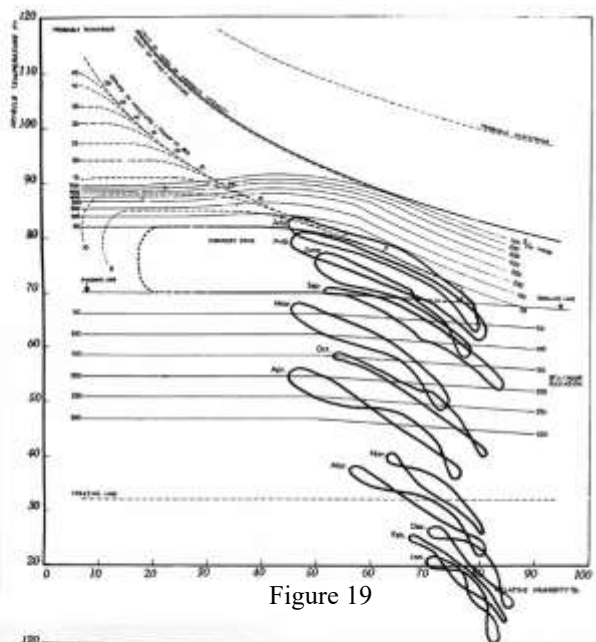


Figure 19

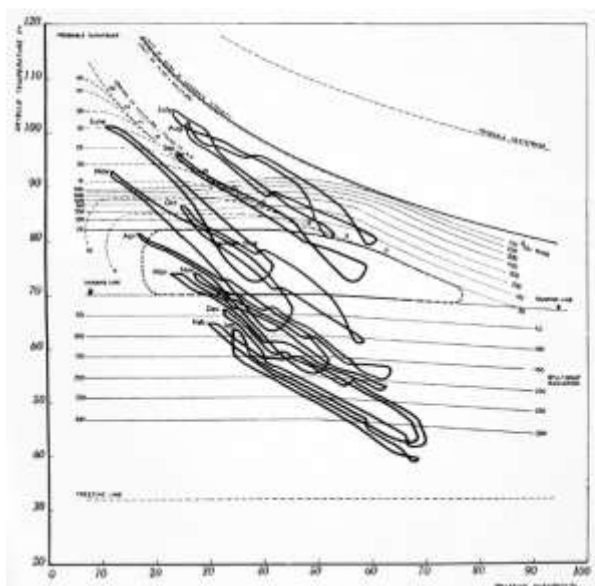


Figure 20

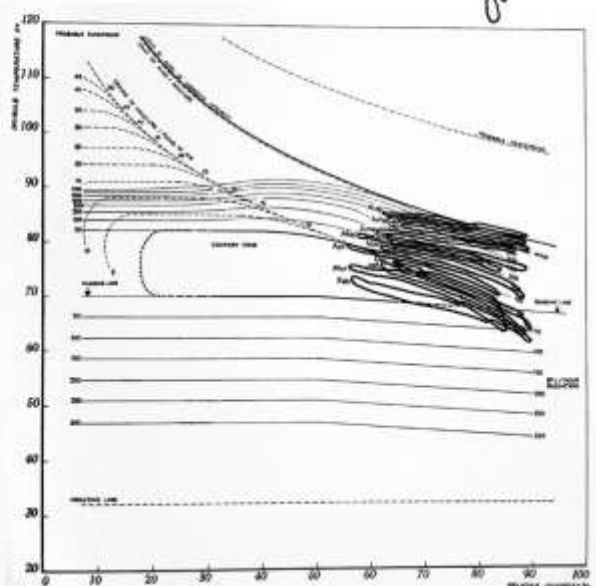


Figure 21

Figures 18 à 21 : Données météorologiques horaires pour la zone de New York (fig. 18) repérées sur un diagramme bioclimatique d'Olgay et reliées pour chaque mois pour la zone de Minneapolis (fig. 19), de Phoenix (fig. 20) et de Miami (fig. 21).
(V. Olgay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 27-30)

Mis à part l'utilisation de données météorologiques horaires, l'originalité principale des diagrammes bioclimatiques d'Olgay est qu'ils représentent les moyens par lesquels des températures et une humidité au-delà de la zone de confort peuvent être ramenées dans cette zone. On trouve ainsi sur le diagramme bioclimatique des lignes indiquant la quantité de

rayonnement solaire (en BTU/heure) dans la partie inférieure et des lignes repérant différentes vitesses de l'air (en pied/minute) ainsi que des niveaux d'humidité absolue (en grain/livre) dans la partie supérieure (*figure 17*). Il faut interpréter ces lignes comme des illustrations de phénomènes physiques offrant des « mesures correctives¹ » par lesquelles « on peut restaurer la sensation de confort pour certains points en dehors de la zone de confort². » Par exemple, pour une température extérieure de 51 °F (environ 10,5 °C), qui indique une sensation de froid, le rayonnement solaire d'une intensité d'environ 250 BTU/heure (environ 75 W) permettrait de pallier cette sensation. À l'inverse, pour une température extérieure de 90 °F (environ 32 °C) à 50 % d'humidité relative, qui indique une sensation de chaleur, une vitesse de l'air de 700 pieds/minute (environ 3,5 m/s), ce qui représente une vitesse de l'air très élevée, rétablirait la sensation de confort en favorisant la transpiration. Pour la même température à 20 % d'humidité relative, l'évaporation d'une certaine quantité d'eau serait nécessaire, afin de réduire la température de l'air et de retrouver une humidité acceptable. Ces valeurs numériques n'ont pas une signification immédiate sans appareils pour les mesurer, d'autant plus qu'elles ne sont pas rapportées à une surface dans le cas du rayonnement solaire, mais elles sont seulement données à titre indicatif.

On peut interpréter les diagrammes bioclimatiques comme des outils permettant de synthétiser les trois premières opérations de la méthode proposée par Olgyay : ils permettent de donner une image précise du climat local ou régional, ainsi qu'un aperçu de ses caractéristiques par rapport à la zone de confort, et enfin d'en déduire partiellement des choix techniques. Ils sont considérés comme l'invention la plus importante d'Olgyay, et ils seront très largement commentés par la suite, entre autres par Baruch Givoni en Israël, Jean-Louis Iazard³ en France ou plus récemment par Steven Szokolay⁴. Baruch Givoni, qui possède la double formation de médecin et d'architecte, a notamment mis en évidence les limites des diagrammes bioclimatiques d'Olgyay en 1969 dans l'ouvrage *Man, Climate and Architecture*. Givoni reconnaît l'importance d'Olgyay qui « a été le premier à proposer une procédure systématique pour l'adaptation de la conception des bâtiments aux exigences humaines et aux conditions

1 *Ibid.*, p. 22.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « the corrective measures necessary to restore the feeling of comfort at any point outside the comfort zone. »

3 J.-L. Iazard, A. Guyot, *Archi bio, op. cit.*, p. 46-47.

4 A. Auliciems, S. V. Szokolay, *Thermal Comfort. Design Tools and Techniques. PLEA Notes n°3*, Brisbane : PLEA/University of Queensland, 1997, 63 p. Cette publication constitue une présentation très complète de l'évolution des diagrammes psychrométriques vers les diagrammes bioclimatiques.

climatiques¹ ». L'essentiel de cette procédure repose sur les diagrammes bioclimatiques. Cependant, il reproche aux diagrammes bioclimatiques développés par Olgyay de ne pas prendre en compte l'ensemble des techniques architecturales susceptibles d'établir des conditions intérieures confortables, et de ne représenter que les effets possibles de la ventilation naturelle. Cette critique a été partagée par d'autres architectes par la suite². Pour Givoni, « les analyses des exigences physiologiques sont basées sur le climat extérieur et non sur celui qui est attendu à l'intérieur du bâtiment qui est en cause³ », ce qui rend l'utilisation du diagramme légitime pour des climats où la température et l'humidité extérieures sont peu différentes de celles intérieures, comme les climats tropicaux humides, mais le rend inutilisable dans les climats chauds et secs, où les différences entre la température intérieure et extérieure peuvent être plus importantes. Il prend l'exemple suivant :

« [Considérons] une région subtropicale de l'intérieur où les températures diurnes avoisinent 32 à 35 °C, le minimum étant à peu près de 17 °C et l'humidité relative de 40 %. Selon le diagramme bioclimatique, le confort n'est accessible pendant la journée que si les vitesses d'air intérieures sont très élevées ou si l'on fournit un refroidissement par évaporation. En fait, le confort peut être facilement obtenu en gardant la température intérieure au-dessous de 28 °C, par l'utilisation de matériaux de construction adaptés recouverts à l'extérieur d'une couleur blanche et par une protection efficace de fenêtres⁴. »

Pour Givoni, une limite importante des diagrammes bioclimatiques est qu'ils ne prennent pas en compte le rôle de la structure construite et de son effet correctif sur les températures et l'humidité extérieures. Cette objection est tout à fait justifiée, mais elle néglige l'ensemble des autres outils développés par Olgyay et consacrés à l'étude des fonctions de la structure construite. Les diagrammes bioclimatiques n'en sont qu'une petite partie. Ils ne permettent pas de déduire des solutions techniques et restent très approximatifs : ils servent tout au plus à établir un diagnostic climatique et ont un rôle essentiellement « indicatif⁵ ». De plus, il est

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 323.

2 E. Areas, P. F. McNall, R. Gonzales, et al., « A New Bioclimatic Chart for Passive Solar Design », pp. 1203 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980: Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, October 19-26, 1980, Amherst, Massachusetts*, 2 vol., Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1981. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 324.

4 *Ibid.*, p. 325.

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 46.

difficile de déterminer l'utilisation effective des diagrammes bioclimatiques par la suite. Bien que certains auteurs affirment qu'ils ont été « largement utilisés¹ », il ressort de l'étude des travaux postérieurs à 1963 que leur utilisation est restée minoritaire, à quelques exceptions près².

I.3.2.3. La démonstration d'une « planification héliothermique »

Les diagrammes bioclimatiques ne constituent qu'un des outils proposés par Victor Olgyay dans *Design with Climate*. Outre la reprise de la méthode « d'orientation air-soleil » pour déterminer l'orientation, et de celle consacrée à l'étude de la morphologie des constructions, inventées en 1954 et complétées par la prise en compte des vents dominants³, Olgyay reproduit la méthode graphique développée avec son frère en 1957 pour calculer la taille et la position des protections solaires. Toutes ces méthodes convergent dans le chapitre intitulé « planification héliothermique⁴ », qui regroupe la présentation de quatre projets de maisons hypothétiquement situées en climat froid, tempéré, chaud et sec, ainsi que chaud et humide⁵. Le principe de cette méthode repose sur la détermination des périodes durant lesquelles certains apports climatiques sont favorables (hiver) et celles durant lesquelles ils sont défavorables (été). Comme il l'explique : « toute énergie thermique captée en périodes de sous-chauffage (*underheated period*) réduira les coûts de chauffage ; toute quantité de chaleur empêchée d'atteindre l'intérieur aux moments de surchauffe (*overheated times*) réduira les dépenses de refroidissement⁶. » Le but consiste donc à séparer les périodes durant lesquelles les besoins énergétiques peuvent être satisfaits par le climat, et celles durant lesquelles cette énergie supplémentaire issue du climat est disponible, mais indésirable. Cette méthode inclut celles évoquées précédemment et repose sur une quantification des effets du rayonnement solaire sur les façades et la toiture, ainsi que sur le calcul de la quantité de chaleur transmise à l'intérieur de la construction, grâce à une série d'équations présentées en appendice de

1 E. Areas, P. F. McNall, R. Gonzales, *et al.*, « A New Bioclimatic Chart for Passive Solar Design », pp. 1203 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 D. Bolton Fisk, The Center for Maximum Potential Building Systems, « Teaching Regional Passive Climatic Design », pp. 773-777 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.*

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 95-97.

4 *Ibid.*, p. 126-152

5 *Ibid.*, p. 126-152

6 *Ibid.*, p. 126. Traduction personnelle, citation originale : « any heat energy captured in underheated periods will reduce heating costs; any quantity of heat kept from reaching the interior in overheated times will lessen the expenditure for cooling. »

l'ouvrage¹. Ces équations sont celles utilisées par les ingénieurs pour déterminer la charge de chauffage ou de refroidissement et sont issues du *Guide* de l'ASHVE publié en 1951².

Le protocole suivi par Olgyay consiste à considérer une construction virtuelle ayant un plan carré, de construction légère (structure bois et isolation), avec une surface totale de vitrage qui représente 20 % de la surface habitable répartie équitablement sur les quatre façades, ainsi qu'une toiture plate³. Le coefficient de transfert thermique est connu pour chacun des éléments⁴. Cette construction appelée « maison orthodoxe⁵ » (« *orthodox house* ») est considérée comme neutre du point de vue climatique et doit être hypothétiquement située dans un climat dont on possède les données de température pour chaque heure. En étudiant le comportement thermique de cette « maison orthodoxe » pour un climat local déterminé, il sera possible dans un second temps d'envisager des modifications afin d'en équilibrer le bilan thermique.

Afin de simplifier le calcul, Olgyay fait l'hypothèse que les températures du 21 janvier sont représentatives de la période où le chauffage est nécessaire, et celles du 21 juillet de la période de surchauffe. Olgyay considère également que ces deux journées bénéficient d'un ensoleillement direct et que la « maison orthodoxe » est habitée par une ou trois personnes qui produisent de la chaleur et qui utilisent des équipements ménagers qui constituent des apports internes⁶. Pour ces deux journées, Olgyay calcule la quantité de chaleur perdue par la construction un 21 janvier, en supposant fixe la température intérieure, pour en déduire les besoins de chauffage, et la quantité de chaleur transmise à l'intérieur un 21 juillet, afin d'estimer la surchauffe occasionnée durant cette période. Afin de préciser le comportement thermique de cette structure, il ne réalise pas ce calcul pour l'ensemble de la construction, mais pour chacun des éléments de celle-ci : les quatre façades, leurs quatre vitrages et la toiture, pour chaque heure de la journée. L'infiltration et le renouvellement de l'air intérieur sont également pris en compte pour chaque heure. Ce type de calcul est particulièrement laborieux étant donné « les vastes changements cycliques des conditions extérieures, qui sont généralement déphasés les uns par rapport aux autres et varient constamment en ampleur, ainsi que par l'état instable des

1 *Ibid.*, p. 178-179.

2 *Ibid.*, p. 126.

3 *Ibid.*, p. 127.

4 *Ibid.*, p. 132.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 127.

niveaux de température intérieure¹. » En plus de négliger certains effets de l'inertie thermique sur le flux de chaleur incident, ces calculs impliquent de nombreuses simplifications : la vitesse du vent est par exemple considérée comme égale sur tous les éléments extérieurs et ramenée à un coefficient unique de convection de l'air extérieur². Un coefficient différent, ou variable dans le temps pour chacun des éléments, ajouterait un niveau de complexité supplémentaire au calcul.

À partir de cette première série de calculs, Olgyay obtient un bilan du comportement thermique d'une « maison orthodoxe » pour l'ensemble d'une journée d'hiver et d'été, pour les éléments opaques et les vitrages de chacune des façades ainsi que pour la toiture. En combinant ces résultats avec des données obtenues par le calcul de la quantité de chaleur transmise par une façade en fonction de son orientation, de sa couleur extérieure et de son matériau (bois ou pierre), ainsi que la différence entre simple et double vitrage pour chaque orientation, Olgyay en déduit des modifications à appliquer à la « maison orthodoxe » afin d'établir un comportement thermique plus favorable, selon la règle qu'il faut maximiser l'apport de chaleur en hiver et le minimiser en été³. Sa méthode consiste à déduire des données sur le comportement thermique de chacun des éléments des modifications de matériaux, de répartition des vitrages, de couleur et de taille pour chacune des façades, ainsi que pour la toiture. Ensuite, les mêmes calculs réalisés pour la « maison orthodoxe » sont réalisés pour cette « maison équilibrée⁴ » (« *balanced house* ») afin d'en vérifier le comportement thermique et les améliorations apportées par rapport à la « maison orthodoxe ». Il s'agit donc d'une méthode récursive : à partir des résultats obtenus pour chacun des éléments d'une maison ordinaire située dans un certain climat, Olgyay en déduit les modifications à apporter afin de produire un comportement thermique plus favorable, et calcule suivant la même méthode les résultats obtenus pour cette construction. Cette méthode qui décompose une construction en éléments permet, selon ses termes, « une connaissance de l'importance relative des parties par rapport à l'ensemble⁵. » Elle favorise l'analyse de la fonction thermique de chacun des éléments.

Cette procédure est utilisée dans quatre climats : froid, tempéré, chaud et sec et chaud et humide. En ce qui concerne la région de New York qui représente un climat tempéré, le détail

1 *Ibid.*, p. 126. Traduction personnelle, citation originale : « by the wide cyclical changes of outdoor conditions, which are usually out of phase with each other and constantly varying in magnitude, and also by the unsteady state of indoor temperature levels. »

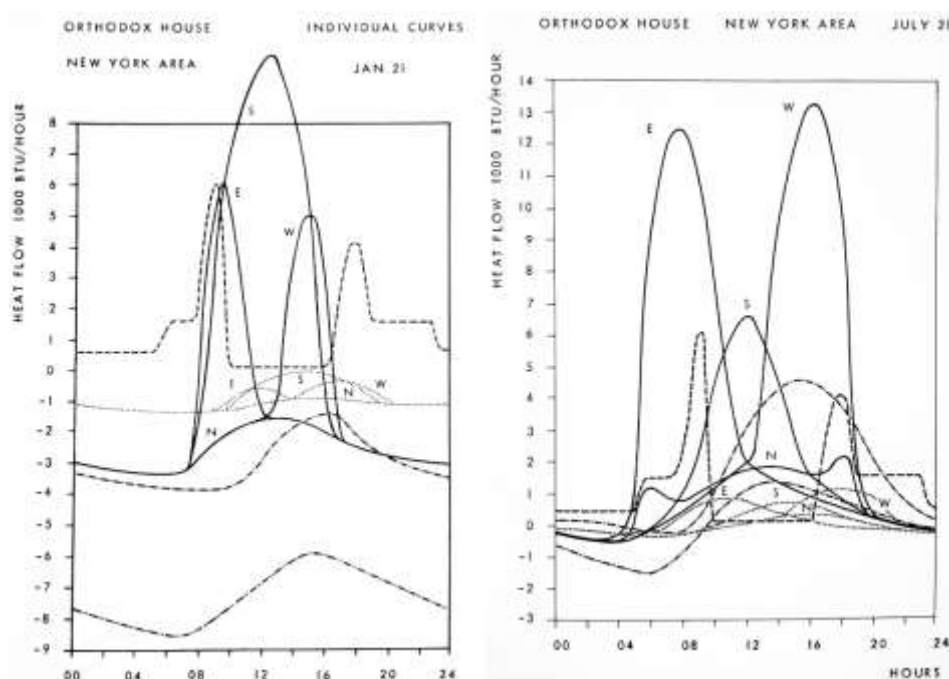
2 *Ibid.*, p. 127.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 126. Traduction personnelle, citation originale : « a knowledge of the relative importance of the parts as related to the whole. »

du comportement thermique est présenté pour chacun des éléments sur des graphiques exprimant l'évolution du flux de chaleur en fonction du temps. Le bilan du comportement thermique d'une « maison orthodoxe » située dans ce climat est donné pour la journée d'hiver du 21 janvier et une journée d'été du 21 juillet sous la forme d'un graphique (*figures 22 et 23*). Pour la « maison orthodoxe », Olgyay remarque qu'en hiver 13 % des pertes de chaleur proviennent du simple vitrage orienté au nord, alors que celui orienté au sud représente un bilan positif de 2 % de chaleur récupérée. En été, ses calculs font ressortir que les fenêtres est et ouest contribuent chacune à 24 % de la chaleur accumulée par la construction et que 14 % de cette chaleur est transmise à travers la toiture¹.



Figures 22 et 23 : Flux de chaleur transmis à l'intérieur d'une « maison orthodoxe » un 21 janvier (fig. 22) et un 21 juin (fig. 23) pour différentes orientations.

(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 132-133)

À partir de ces premiers résultats, Olgyay présente les modifications qu'il propose d'apporter à cette « maison orthodoxe » pour le climat de New York, afin que son comportement thermique soit celui d'une « maison équilibrée » selon son expression. Elle possède la même surface au sol que la « maison orthodoxe », mais son plan est légèrement plus allongé sur l'axe

1 *Ibid.*, p. 133.

est/ouest. L'orientation de la façade principale est déviée vers le sud-est, conformément à la méthode « d'orientation air-soleil », qui définit l'orientation optimale comme celle qui favorise « un rayonnement maximal pendant la période de sous-chauffage tout en réduisant simultanément l'ensoleillement au minimum pendant la période de surchauffe¹. » Les dispositions suivantes sont adoptées par Olgyay : les joints sont améliorés, l'essentiel des fenêtres double vitrage est disposé sur la façade sud, un mur massif en pierre est employé pour la façade ouest afin de retarder la transmission du flux de chaleur en fin de journée en été, les façades est et ouest sont protégées par des arbres et la toiture est en matériaux clairs². Grâce aux arbres, Olgyay considère que seulement la moitié du rayonnement solaire atteint les façades est et ouest en été par rapport à la « maison orthodoxe ».

Les calculs du comportement thermique pour cette maison sont également présentés pour l'hiver et pour l'été, et des plans masses de la « maison orthodoxe » et de la « maison équilibrée » sont donnés à titre indicatif (*figure 24*) : on y trouve représenté l'évolution du flux de chaleur transmis en fonction du temps pour chaque façade. Dans cette nouvelle configuration, les pertes par les vitrages et l'infiltration en hiver sont considérablement réduites et la grande surface de double vitrage au sud permet un apport de chaleur calculé à 28 %. La réduction des pertes totales de chaleur est estimée à 49 %³. En été, les murs est et ouest ne contribuent à l'échauffement de la construction qu'à hauteur de 2 et 5 %, les apports principaux provenant de la toiture (29 %) ainsi que des habitants et équipements intérieurs (26 %)⁴. La réduction de la surchauffe par rapport à la « maison orthodoxe » est estimée à 71 %⁵. Victor Olgyay applique la même méthode pour les climats froids, chaud et sec, ainsi que chaud et humide. Il propose notamment une maquette d'une maison située en climat tropical humide conçue suivant la méthode présentée précédemment (*figure 25*). On remarque que ses façades sont protégées par des auvents, qu'elle bénéficie d'une toiture ventilée et que son plan est allongé selon l'axe est/ouest afin de favoriser la ventilation transversale.

1 *Ibid.*, p. 55. Traduction personnelle, citation originale : « An optimum orientation for a given site would give maximum radiation for the underheated period while simultaneously reducing insolation to a minimum in the overheated period. »

2 *Ibid.*, p. 134-135.

3 *Ibid.*, p. 137.

4 *Ibid.*, p. 135.

5 *Ibid.*, p. 137.

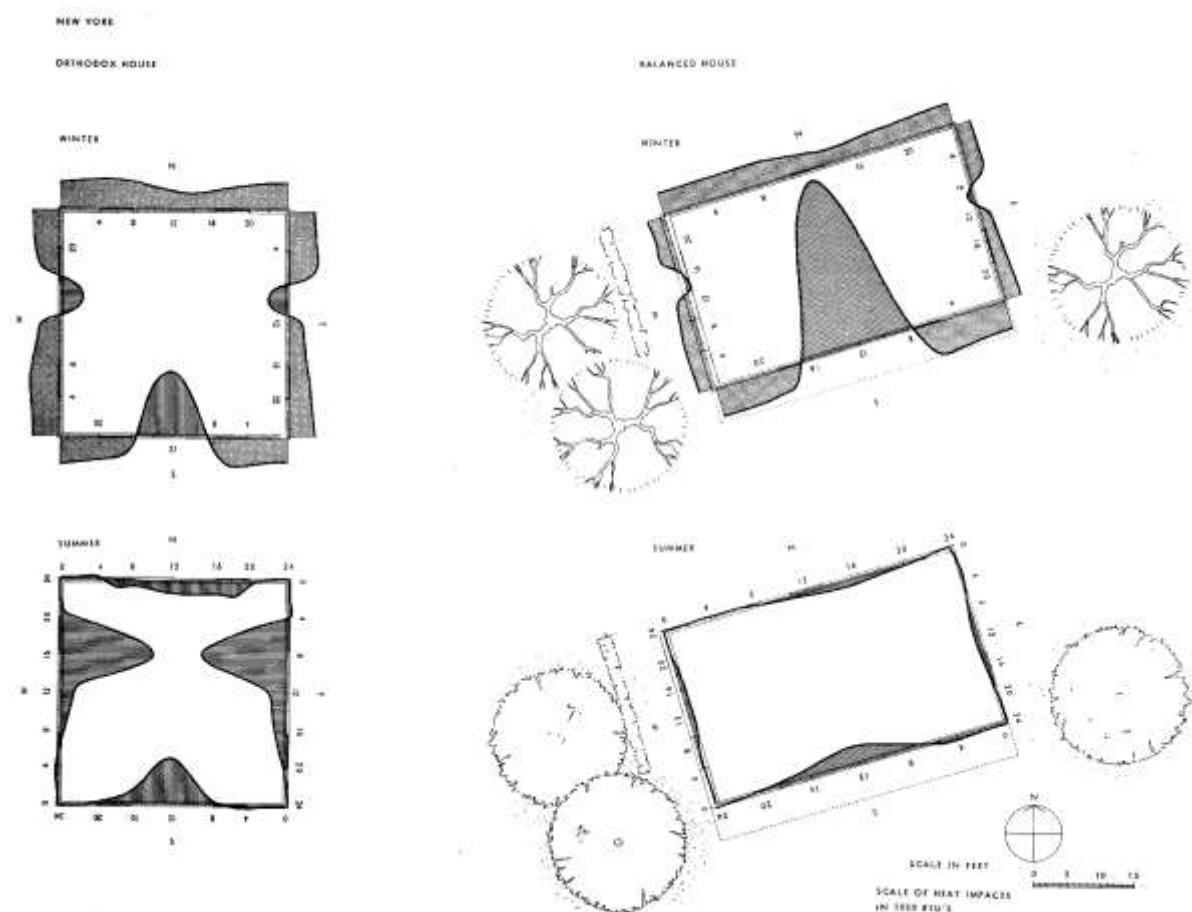


Figure 24 : Comparaison du comportement thermique d'une « maison orthodoxe » (gauche) et d'une « maison équilibrée » (droite) en hiver (haut) et en été (bas) dans le climat de New York. Les apports et les déperditions thermiques pour chaque façade sont représentés en fonction du temps par une courbe vers l'intérieur (apports) ou vers l'extérieur (déperditions).

(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 136)

Cette méthode est critiquable et repose sur de très nombreuses simplifications, à commencer par les données météorologiques initiales des deux jours choisis, censées être représentatives de la période d'hiver et d'été. Une autre critique que l'on peut adresser à la démonstration d'Olgyay est son manque de clarté et de pédagogie, malgré le fait qu'il détaille l'ensemble des étapes. En effet, si les calculs thermiques sont rapidement évoqués en annexe de *Design with Climate*, ils ne sont pas pour autant expliqués ni introduits. Aucun exemple de calcul n'est détaillé, et les données météorologiques de base qui ont servi aux calculs thermiques ne sont pas fournies. Si la démonstration de la méthode d'Olgyay paraît claire et solide, elle n'est cependant pas reproductible, dans la mesure où sa présentation reste très lacunaire et se contente de présenter des résultats, plutôt qu'un véritable protocole réutilisable.

Cette critique d'un manque de clarté et de lisibilité est régulièrement revenue chez les contemporains des travaux de Victor et Aladár Olgyay, et ce dès 1951. Afin d'expliquer cette lacune, on peut émettre l'hypothèse que leur but était essentiellement de présenter leurs résultats et que la pédagogie de leur méthode était un problème secondaire et qui est resté irrésolu, même en 1963 dans *Design with Climate*. Ce problème pédagogique d'une mise à disposition des outils et des méthodes de la conception bioclimatique sera un enjeu central des ouvrages et manuels qui y seront consacrés par la suite. Le détail des calculs thermiques sera une caractéristique constante de ces ouvrages, dans un souci de faciliter la compréhension et l'assimilation des méthodes qui y sont présentées. En 1963, cette préoccupation semble secondaire et n'est pas traitée.

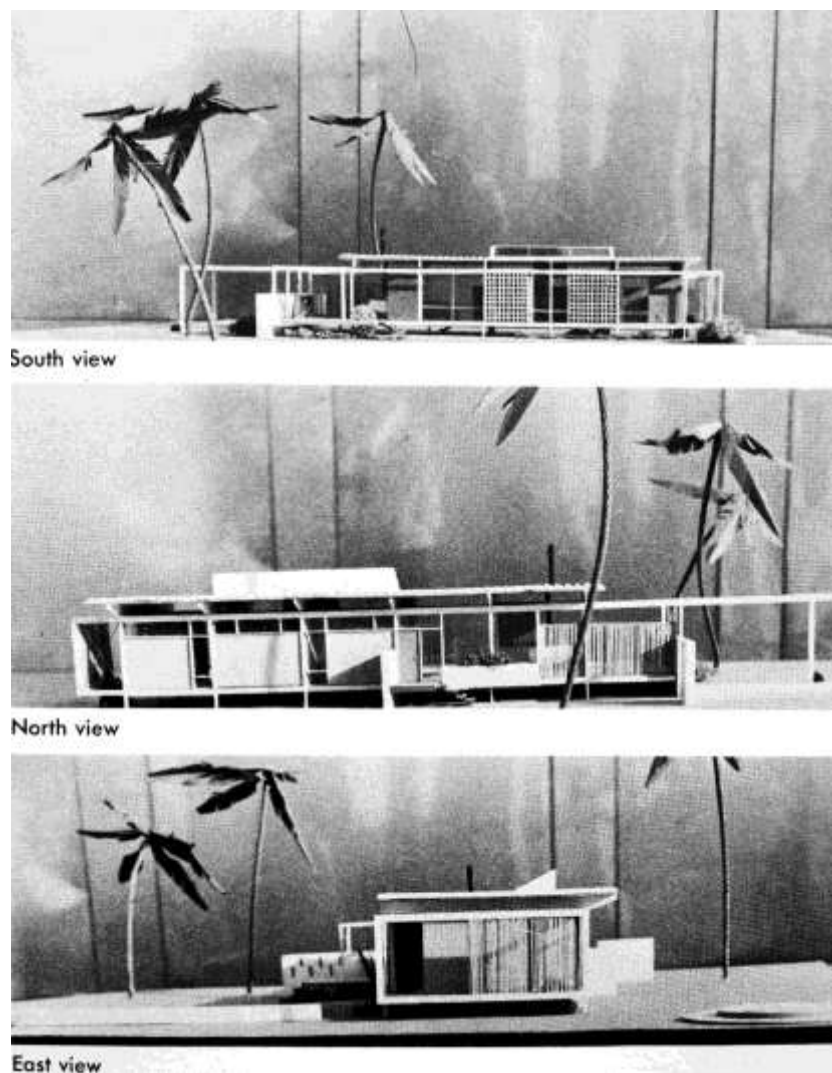


Figure 25 : Maquette d'une « maison équilibrée » conçue suivant la méthode d'Olgyay pour le climat de Miami. (V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 151)

Malgré ces lacunes, la méthode proposée dans le chapitre « planification héliothermique » constitue la première tentative systématique de conception à partir du climat, suivant « l'approche bioclimatique » défendue par Olgyay. Cette méthode a été reprise par la suite, sans doute sans être totalement comprise, et des recherches récentes ont tenté de l'appliquer à l'aide de logiciels de simulation thermique¹. Les historiens de l'architecture comme Barber associent l'apport des frères Olgyay à l'invention des diagrammes bioclimatiques qui ont, en pratique, un intérêt très limité. C'est véritablement dans le chapitre consacré à la « planification héliothermique » et à travers le protocole que nous avons évoqué qu'Olgyay propose une méthode de conception partant de données météorologiques pour aboutir à des propositions architecturales concrètes et vérifiées par des calculs. Elle peut être considérée comme la première méthode systématique de conception bioclimatique.

L'originalité de la méthode présentée par Olgyay pour l'étude du comportement thermique d'une construction est qu'elle intègre les calculs thermiques bien en amont dans la phase de conception : ce sont les calculs qui expriment le comportement thermique de chacun des éléments d'une construction située dans un climat donné qui guident la conception et les choix techniques effectués. Alors que les équations utilisées par Olgyay servent habituellement aux ingénieurs thermiciens pour calculer les charges de chauffage et de rafraîchissement, donc le dimensionnement des systèmes de conditionnement mécanique de l'air pour un projet déjà achevé ou fixé dans ses grandes lignes par l'architecte, ici, ils servent à générer ce plan et à fixer les éléments de la future construction. Par récurrence, ils servent également à vérifier la pertinence des choix effectués. Ainsi, on peut caractériser la conception bioclimatique comme une méthode qui interprète les phénomènes thermiques à l'origine du projet, comme les effets d'un climat donné, et non *a posteriori*, afin de dimensionner les systèmes de chauffage ou de climatisation. Cette caractéristique fondamentale de la conception bioclimatique est un invariant historique : l'architecte Frédéric Nicolas, figure importante de la conception bioclimatique en France depuis le milieu des années 1970, souligne encore aujourd'hui que la participation de l'ingénieur thermicien ou énergéticien est nécessaire dès les premières phases d'un projet bioclimatique².

1 K. Mansy, « Back to Olgyay, basic forms of houses revisited », p. 975-978, in : F. O. Pereira, R. Rüther, R. V. Souza et. al. *PLEA 2001: Renewable Energy for a Sustainable Development of the Built Environment. Proceedings of the PLEA 2001 Conference. 7 to 9th November 2001 – Florianópolis – Brazil*, Vol. 2, PLEA, 2001. (Archives personnelles de Jean Bouillot – Poiseul-La-Ville-Et-Laperrière)

2 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

De par les méthodes qui y sont présentées, l'ouvrage *Design with Climate* est une publication majeure et la première consacrée explicitement à la conception bioclimatique en architecture. De plus, il constitue une étape importante dans la synthèse sur les connaissances relatives à la microclimatologie et la physiologie. Si une grande partie de l'ouvrage expose des méthodes et des procédures, un certain nombre de chapitres ont pour but de fournir l'information nécessaire à la compréhension des effets du climat en architecture, mais également dans d'autres domaines comme la biologie ou la botanique. Tout en approfondissant la prise en compte des phénomènes climatiques en architecture à travers les méthodes que nous avons évoquées, Olgyay souhaite plus généralement expliquer l'influence et les effets du climat sur les organismes. Il envisage « l'approche bioclimatique » comme une manière de renouveler la compréhension d'un certain nombre de phénomènes à la lumière des connaissances en climatologie et surtout en microclimatologie.

I.3.3. La généralité de « l'approche bioclimatique » imaginée par Olgyay

I.3.3.1. Comprendre les phénomènes thermiques pour concevoir avec le climat

« L'approche bioclimatique » imaginée par Olgyay en 1963 est plus qu'une méthode de conception en architecture dans la mesure où elle invite à repenser un ensemble de phénomènes à partir du climat, et insiste particulièrement sur la compréhension des phénomènes thermiques. Une des caractéristiques des diagrammes et schémas employés dans *Design with Climate* est qu'ils permettent d'illustrer et de synthétiser des phénomènes complexes, notamment relatifs à la compréhension de la variabilité des phénomènes climatiques et thermiques. Si l'on examine les schémas présentant les plans de la « maison orthodoxe » et de la « maison équilibrée », qui illustrent visuellement les résultats de la méthode que nous avons évoquée précédemment, on remarque qu'ils synthétisent plusieurs informations (*figure 24*, p. 151). Ils sont d'abord une interprétation architecturale des choix effectués suivant des calculs thermiques. On trouve également, en superposition du plan, une courbe foncée qui traduit le flux de chaleur traversant chaque façade en fonction du temps. Les graduations 0 à 24 sur chacune des façades représentent les heures de la journée ; l'aire formée par la courbe à l'extérieur du plan traduit

une perte de chaleur, tandis que celle formée à l'intérieur du plan représente un apport de chaleur vers l'intérieur de la construction¹.

Ces courbes permettent de comparer visuellement les déperditions et les apports thermiques entre la « maison orthodoxe » et la « maison équilibrée ». En plus de permettre la comparaison entre le comportement thermique de différentes constructions dans le même climat, ainsi que la comparaison des déperditions et des apports thermiques de la même « maison orthodoxe » dans différents climats, ces diagrammes montrent qu'une construction peut à la fois perdre et gagner de la chaleur à différents moments de la journée, et différemment pour chacune des façades. Le choix fait par Olgyay de présenter une grande abondance de courbes et de graphiques exprimant les variations horaires des températures en fonction de l'exposition au rayonnement solaire, de la saison ou de la couleur des matériaux exposés, témoigne d'un souci de précision dans la compréhension et l'explication des phénomènes thermiques sous l'influence des facteurs climatiques.

L'approche « élément par élément² » des phénomènes thermiques permet d'isoler la fonction thermique des différentes parties d'une construction, dans la lignée des travaux en architecture tropicale. Elle fait l'objet d'un développement particulier dans *Design with climate*, dans le chapitre consacré aux « effets thermiques des matériaux³ ». Olgyay y analyse l'importance de la capacité thermique de certains matériaux (pierre, brique, béton) ainsi que le rôle des matériaux isolants, relativement au climat. La capacité thermique est une grandeur qui caractérise l'inertie thermique, une forte capacité thermique permettant d'amortir et de déphaser l'onde de chaleur⁴. Il y discute notamment les recommandations du français Robert Leroux relatives à la masse de matériau nécessaire pour amortir les variations thermiques en fonction de l'amplitude diurne des températures⁵. Leroux recommande une masse de matériau de 300 kg par m³ du volume de la construction quand l'amplitude diurne est située entre 6 et 8 °C, 600 à 700 kg par m³ pour une amplitude comprise entre 10 et 12 °C et 1200 kg ou plus par m³, quand l'amplitude diurne dépasse 20 °C⁶. Bien qu'il considère ces recommandations comme valides, Olgyay précise cependant que l'utilisation de la masse thermique réclame une étude plus

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 137.

2 *Ibid.*, p. 122.

3 *Ibid.*, p. 113-124.

4 *Ibid.*, p. 115.

5 R. Leroux, « La Climatologie de l'habitation », *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Centre d'études supérieures, Circulaires. ser. B, no. 7*, Paris : Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1946, p. 96-107.

6 *Ibid.*, p. 115.

détaillée, suivant l'ensoleillement différencié des façades et de la toiture au cours de la journée. En s'appuyant sur le calcul du déphasage thermique profitable pour le confort intérieur dans des climats chaud et sec, comme celui des villes de Phoenix ou de Bagdad, il estime que la façade est devrait produire un déphasage minimum, donc être construite sans masse thermique, afin de transmettre la chaleur en début de journée, quand la température intérieure est encore relativement faible¹. Mais si les façades est, sud et nord peuvent être construites sans masse thermique, la toiture et la façade ouest nécessiteraient cependant un déphasage de l'ordre d'une dizaine d'heures, afin de retarder la transmission de la chaleur progressivement durant la période nocturne².

Olgyay présente des diagrammes pour différents climats illustrant le déphasage thermique désiré, sous la forme de plans où le temps de déphasage à produire pour chacune des façades, ainsi que la toiture, est indiqué en heures. Les lignes épaisses représentent l'emplacement des murs ou cloisons massives (*figure 26*). On remarque dans ces diagrammes qu'aucune masse thermique n'est nécessaire pour la zone de Miami, dont le climat peut être qualifié de chaud et humide : celle-ci aurait en effet tendance à accumuler de la chaleur alors que la température et l'humidité élevée imposent une ventilation constante et régulière. Olgyay rejoint ici les conclusions des travaux sur l'architecture tropicale et affirme qu'il est nécessaire de minimiser la masse thermique dans les constructions en milieu tropical humide afin que la variation de la température intérieure suive le plus possible celle de la température extérieure. Si les conclusions d'Olgyay ne sont pas nouvelles, les diagrammes qu'il utilise illustrent une approche temporelle des phénomènes thermiques particulièrement originale. Suivant la méthode d'étude du comportement thermique élément par élément préconisée par Olgyay, le rôle d'une construction est de produire un déphasage sélectif dans la transmission de la chaleur, suivant les exigences de confort thermique.

Olgyay généralise cette approche temporelle des phénomènes thermiques à l'ensemble des climats, des climats équatoriaux jusqu'aux latitudes les plus élevées³. Il présente la répartition schématique de la masse thermique et de l'isolation d'une construction thermiquement équilibrée pour chacun de ces climats (*figure 27*). Ces schémas sont accompagnés de courbes représentant la valeur relative de l'isolation et de la masse de matériau. On remarque que dans les climats chauds et arides Olgyay envisage de dissocier l'habitation en

1 *Ibid.*, p. 118.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 123-124.

deux unités : une correspondant au confort de jour, construite avec des matériaux massifs afin de produire un déphasage thermique d'une douzaine d'heures et donc de bénéficier de températures intérieures plus faibles en journée ; et une autre correspondant au confort de nuit et de construction légère afin de suivre la baisse nocturne des températures. Par cette opération, il montre que le confort de jour et le confort de nuit nécessitent des constructions aux comportements thermiques antagonistes dans ce type de climat soumis à de grandes amplitudes diurnes de température. Cet antagonisme, qui peut être surmonté dans d'autres climats puisqu'une seule et même construction peut assurer le confort de jour et de nuit par une disposition judicieuse des éléments, est trop important dans les climats chauds et secs et nécessite de dissocier la construction selon Olgyay.

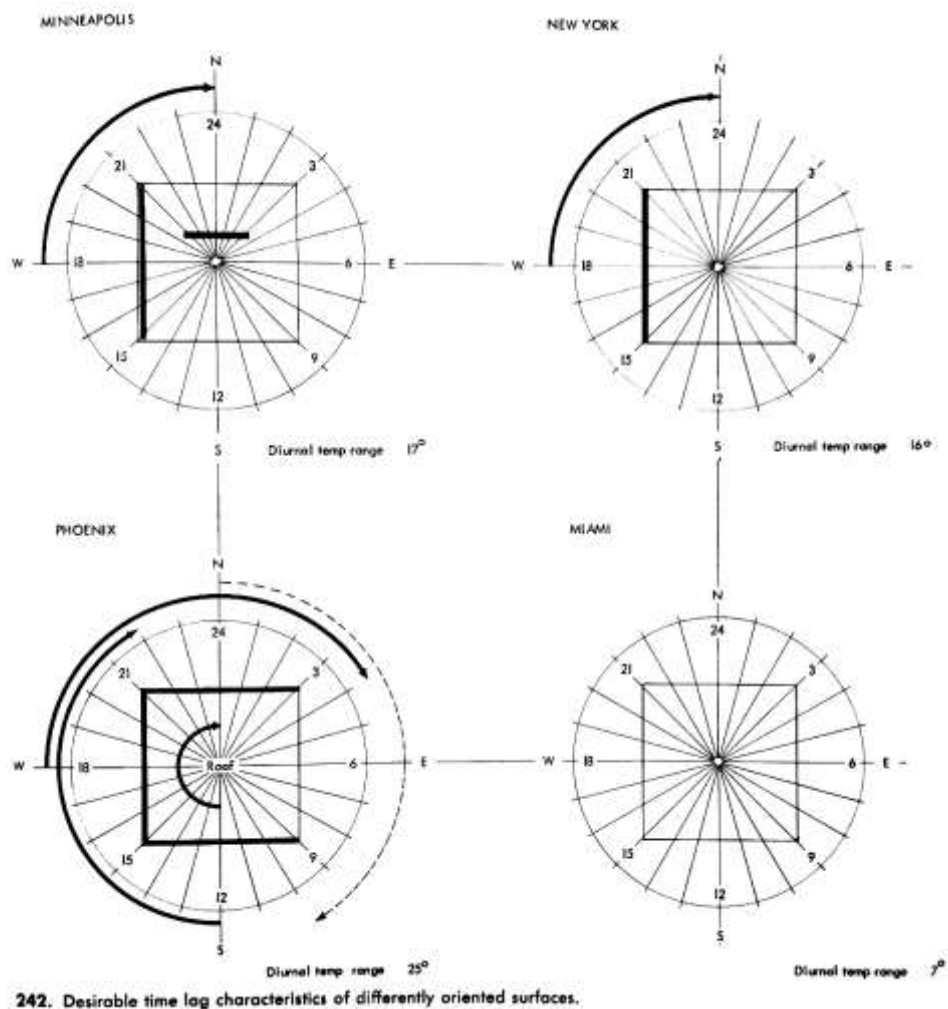


Figure 26 : Caractéristiques souhaitables de déphasage thermique pour chaque façade et la toiture dans les climats de Minneapolis, New York, Phoenix et Miami.

(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 123)

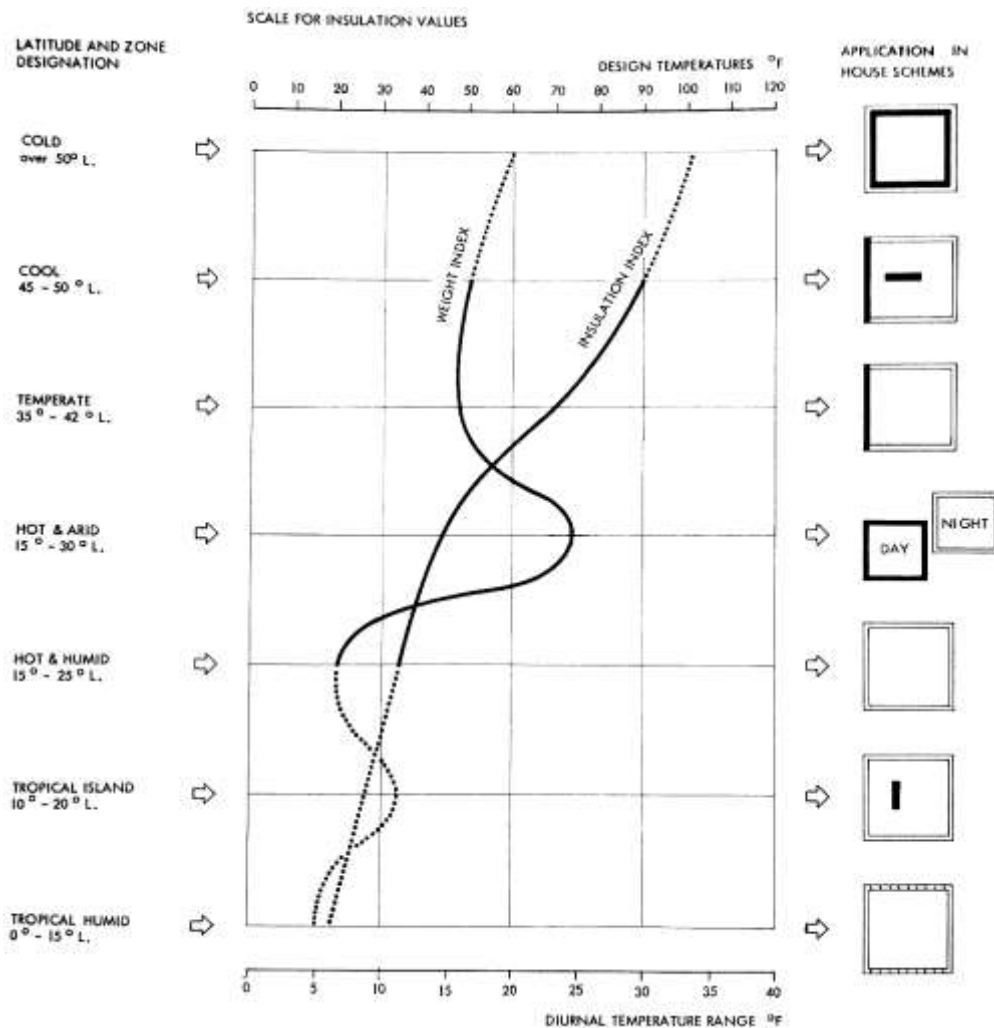


Figure 27 : Valeurs relatives de l'inertie et de l'isolation thermique en fonction des climats.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 124)

I.3.3.2. Une attention renouvelée aux phénomènes microclimatiques

Cette attention à la complexité des phénomènes thermiques à l'échelle de la construction préconisée par Olgyay est accompagnée d'une analyse approfondie des phénomènes climatiques et microclimatiques. Dans le document présentant leur « méthode d'interprétation climatique dans le logement¹ », diffusé lors de la conférence organisée par le BRAB en 1952 et intégralement reproduit dans *Design with Climate* en 1963, Victor et Aladár Olgyay distinguent trois niveaux dans l'étude climatique : les données climatiques régionales, le climat au niveau

1 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 200-201.

du vivant (« *on living level*¹ ») et le microclimat. Cette distinction correspond à celle que nous avons précédemment évoquée entre climat régional, climat local ou stationnel et microclimat. Le fait que ces trois ordres de grandeur soient clairement distingués et identifiés témoigne d'une connaissance robuste des notions de la climatologie et surtout de la spécificité des microclimats par rapport au climat local et régional. Victor et Aladár Olgyay ont eu l'occasion de collaborer au début des années 1950 avec le climatologue Siple², particulièrement impliqué dans le *House Beautiful Climate Control Project*, et ils auraient probablement rencontré Helmut Landsberg à de nombreuses reprises.

L'essentiel de l'information sur les phénomènes microclimatiques présenté par Olgyay dans *Design with Climate* en 1963 provient des travaux de Geiger, dont il reproduit certains schémas issus de *The Climate Near the Ground*³ et de Landsberg⁴. L'ouvrage *Design with Climate* ayant plus largement circulé que celui de Geiger dans le milieu des architectes préoccupés par la conception bioclimatique, le schéma « Échange de chaleur à midi pour une journée d'été » (*figure 1*, p. 40) a vraisemblablement été reproduit par la suite en France à partir de la publication d'Olgyay, et non de celle de Geiger. On peut donc considérer que *Design with Climate* a constitué la principale source indirecte d'accès aux travaux américains sur les microclimats que nous avons évoqués précédemment. Comme Aronin avant lui, une très grande partie des connaissances qui y sont présentées reposent sur *The Climate Near the Ground* de Geiger. Mais contrairement à l'ouvrage *Climate & Architecture* d'Aronin publié dix années plus tôt, Olgyay prend soin d'exposer synthétiquement les phénomènes climatiques, en détaillant succinctement les éléments et les différents facteurs qui interviennent dans la caractérisation des climats. Il reprend à ce titre les méthodes de la climatologie, axées sur l'étude des amplitudes de températures, et il utilise la classification des principaux climats issue des travaux du météorologue et climatologue russo-allemand Köppen⁵.

Cependant, et sous l'influence des travaux de Geiger qu'il cite à de nombreuses reprises, Olgyay détaille particulièrement les phénomènes d'échanges thermiques sous forme de rayonnement infrarouge, à partir d'autres données expérimentales qui valident celles de Geiger⁶. Il entrevoit notamment le potentiel de rafraîchissement des constructions permis par le

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 12-13.

2 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 207.

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 33, 45.

4 *Ibid.*, p. 44.

5 *Ibid.*, p. 6.

6 *Ibid.*, p. 34.

rayonnement de grande longueur d'onde des surfaces en période nocturne, notamment dans les régions chaudes et arides. Il écrit :

« Le rayonnement sortant peut constituer un canal important d'évacuation de la chaleur dans les logements, notamment dans les régions chaudes et arides. Cette possibilité n'est pas suffisamment reconnue ni utilisée de manière significative dans la pratique de la construction. Un calcul pratique du rayonnement sortant pour une utilisation architecturale pourrait être développé de manière similaire au calculateur solaire. Cependant, à l'heure actuelle, un manque de données coordonnées empêche un tel développement¹. »

Dans cet extrait, Olgyay fait référence à la relative abondance des outils graphiques et des données numériques disponibles afin de calculer la quantité d'énergie solaire reçue par une surface ou une construction, et déplore le manque d'outils analogues pour déterminer le rafraîchissement possible par rayonnement dans l'infrarouge lointain. Comme nous le verrons, des recherches plus tardives développeront cette intuition d'un potentiel de rafraîchissement permis par le rayonnement de grande longueur d'onde des surfaces dans les climats arides ou désertiques, notamment à travers les expérimentations de Baruch Givoni sur ce qu'il nomme le « rafraîchissement radiatif² ». Cette attention aux échanges thermiques des surfaces d'une construction est également présente dans les analyses d'Olgyay sur le contrôle des apports de chaleur, où il écrit que « [la] première ligne du contrôle de la chaleur se situe à la surface³. » Il applique à l'architecture une observation qui avait déjà été faite par les microclimatologues à propos des microclimats.

Dans la lignée d'Aronin, Olgyay déduit des travaux de Geiger sur les microclimats des préconisations relatives au choix du site d'implantation d'une construction. Dans le cas d'une vallée, dont Geiger montre que la répartition des températures sur les versants dépend du mouvement descendant de l'air nocturne (vent catabatique), Olgyay en déduit que la situation

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Outgoing radiation can constitute an important channel for heat disposal in housing, especially in hot-arid regions. This possibility is not adequately recognized nor significantly utilized in building practice. A practical calculation of outgoing radiation for architectural use could be developed similar to the solar calculator. However at present a lack of coordinated data hinders such development. »

2 B. Givoni, *Climate Considerations in Building and Urban Design*, New York : John Wiley & Sons, 1998, p. 191.

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 113. Traduction personnelle, citation originale : « The first line of heat control lies at the surface. »

la plus favorable serait « approximativement à mi-hauteur de la pente¹ », à l'abri des vents de la crête et des températures plus faibles du fond de la vallée. En ce qui concerne l'exposition au rayonnement solaire des pentes, Olgyay présente un ensemble de diagrammes relatifs à l'ensoleillement en fonction de l'inclinaison de la surface exposée, du mois de l'année et de l'orientation, pour une latitude donnée. Ces diagrammes corroborent les observations selon lesquelles environ « deux fois plus d'énergie solaire tombe sur une surface horizontale pendant les périodes de surchauffe que sur une surface verticale ; de sorte que les surfaces horizontales environnantes reflètent une bonne quantité de chaleur sur les bâtiments². »

Des diagrammes analogues sont utilisés pour présenter la vitesse du vent en fonction de l'exposition sur les pentes d'une colline³. En ce qui concerne la prise en compte du vent et des mouvements de l'air, Olgyay consacre tout un chapitre à ce problème. Contrairement au rayonnement solaire, il estime que les brises et les mouvements de l'air doivent être favorisés en été et plus généralement durant les périodes de chaleur sèche ou humide, alors qu'ils doivent être bloqués ou déviés durant les périodes de chauffage, afin de limiter les pertes de chaleur par convection ou infiltration⁴. Il présente des équations permettant de calculer la prévalence ainsi que la vitesse du vent sur cette base, en affectant des valeurs négatives aux vents indésirables et positives aux vents désirables⁵. Olgyay reprend également des diagrammes sur la vitesse du vent de part et d'autre d'un brise-vent, selon sa forme, sa hauteur et sa porosité. En s'appuyant sur ces résultats, il en déduit un plan masse d'une agglomération urbaine pour la région de New York conçu pour bloquer les vents d'hiver provenant de la direction nord-ouest par une rangée dense d'arbres à feuilles persistantes, tandis que les rues sont orientées selon l'axe nord/sud et sud-ouest/nord-est, afin de favoriser les brises d'été⁶. Il détaille ce plan dans le chapitre consacré à la planification⁷. Olgyay propose également une étude complète sur le mouvement de l'air à l'intérieur des constructions, en reprenant les travaux du Texas Engineering Experiment Station que nous avons déjà présentés. Par rapport à Aronin qui évoquait simplement ces recherches, Olgyay analyse dans le détail chacune des expérimentations, il commente les effets de la taille

1 *Ibid.*, p. 45. Traduction personnelle, citation originale : « approximately halfway up the slope. »

2 *Ibid.*, p. 33. Traduction personnelle, citation originale : « Roughly twice as much solar energy falls on a horizontal surface during overheated times as on vertical surface; so that surrounding horizontal surfaces reflect a good amount of heat onto buildings. »

3 *Ibid.*, p. 50.

4 *Ibid.*, p. 94.

5 *Ibid.*, p. 96.

6 *Ibid.*, p. 100.

7 *Ibid.*, p. 154-165.

des ouvertures et de l'aménagement intérieur sur la vitesse de l'air et la distribution des pressions. Il voit dans ces expérimentations l'illustration de principes physiques comme l'inertie des mouvements de l'air ou l'effet Venturi, et en déduit certaines recommandations sur l'emplacement des entrées et des sorties d'air¹.

Dans le souci d'illustrer le plus complètement possible l'influence des effets climatiques et microclimatiques sur les organismes, Olgyay a recours à de nombreuses illustrations issues de la botanique ou de la zoologie. Il affirme que les végétaux manifestent « l'environnement thermique² » dans lequel ils se développent et que « [la] morphologie des plantes dans divers climats semble comporter une analogie avec la formation des bâtiments, car quelques-unes des forces de mise en forme (tel que l'intervalle de température) sont quelque peu similaires aux besoins de l'environnement humain³. » La comparaison avec les formes végétales était déjà présente chez Aronin, mais dans le cas d'Olgyay elle sert à illustrer la généralité de l'approche bioclimatique qu'il envisage : elle renforce l'idée selon laquelle les phénomènes à l'œuvre dans la croissance des végétaux devraient, en principe, conditionner la conception d'une construction. La conception d'une habitation, comme la croissance d'un végétal, doit être optimale : le choix des volumes doit garantir des apports maximisés en hiver et minimisés en été (*figure 28*). Olgyay prend d'autres exemples dans le monde animal, comme le comportement qu'adoptent certains animaux pour atténuer ou supporter les effets du froid ou de la chaleur⁴. Il illustre également son propos de photographies de gigantesques termitières situées en milieu tropical, construites en terre, et dont les faces principales sont orientées à l'est et à l'ouest, ce qui garantit une température uniforme⁵. Ces exemples très primitifs de tropisme et d'orientation inscrivent l'approche bioclimatique dans la continuité de l'effort fourni par d'autres formes de vie pour tirer parti du climat.

1 *Ibid.*, p. 108.

2 *Ibid.*, p. 84.

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The plant morphology in various climates seems to bear an analogy to the formation of buildings, as a few of the shaping forces (such as temperature range) are somewhat similar to human environment needs. »

4 *Ibid.*, p. 1.

5 *Ibid.*, p. 2.

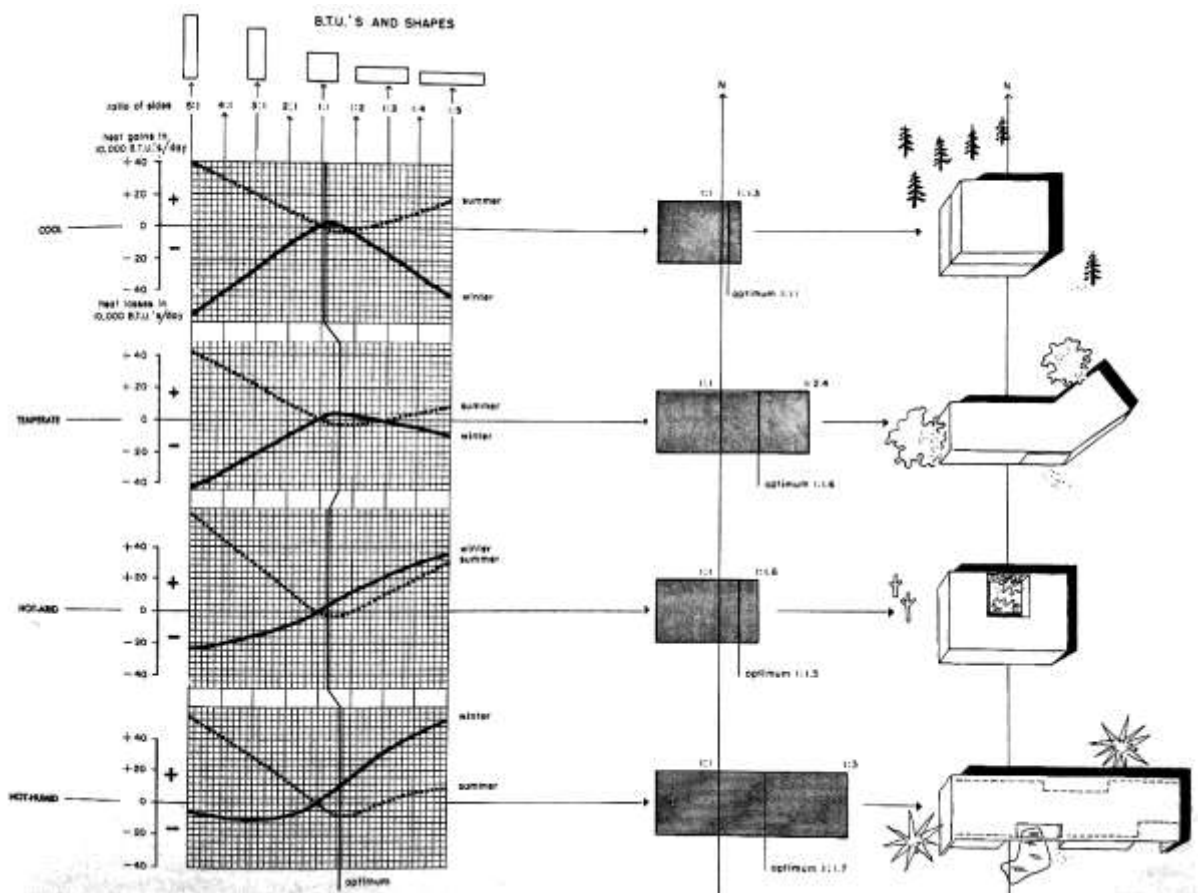


Figure 28 : Morphologie optimale des bâtiments dans différentes régions en fonction des apports et des déperditions thermiques.

(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 89)

I.3.3.3. La diffusion de *Design with Climate*

L'ouvrage *Design with Climate* synthétise l'approche bioclimatique développée par Victor et Aladár Olgyay dans toute sa généralité, comme une méthode de conception appuyée sur des données météorologiques traitées selon des procédures et des calculs, et une connaissance générale mais approfondie des phénomènes climatiques et microclimatiques, ainsi que de leurs influences physiologiques et biologiques. Pour l'architecte français Jean-Louis Izard, les frères Olgyay « ont été parmi les premiers à se préoccuper des rapports qu'entretiennent un bâtiment avec le milieu extérieur et à créer des outils théoriques destinés à une conception architecturale qui optimise les rayonnements et les échanges thermiques¹ ». Il

1 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 19.

affirme également que Victor Olgyay « paraît être le créateur du concept "bioclimatique"¹ ». En réalité Olgyay n'a pas créé ce concept, mais l'a vraisemblablement repris à des travaux en physiologie, le terme « bioclimatique » lui-même ayant été utilisé pour la première fois par l'entomologiste américain Andrew D. Hopkins à la fin des années 1910, pour décrire l'étude quantitative des variations phénologiques².

Mais c'est véritablement Olgyay qui généralise ce qu'il nomme « l'approche bioclimatique », qui est plus qu'une méthode de conception en architecture : c'est d'abord une « approche » qui nécessite une compréhension fine des phénomènes climatiques, microclimatiques et thermiques et de leurs conséquences sur les faits biologiques, physiologiques et architecturaux. Cette généralité a conduit certains historiens contemporains à parler du « biorégionalisme³ » d'Olgyay, terme impropre dans la mesure où il ne l'emploie pas, mais qui insiste sur la globalité de son projet et son souci de recréer un régionalisme par la prise en compte du climat. Il importe de garder à l'esprit que ce projet général s'inscrit dans des préoccupations très spécifiques : l'approche bioclimatique est aussi une méthode de conception, qui engage une compréhension de l'architecture dans le détail et la complexité des phénomènes thermiques.

On aurait tort de considérer *Design with Climate* comme étant véritablement à l'origine du développement de la conception bioclimatique en architecture. Si dès 1963 les bases théoriques de la conception bioclimatique sont définitivement posées, l'intérêt pour le sujet et la mise en œuvre concrète des méthodes qui y sont présentées ne se développera qu'au début des années 1970, en France comme aux États-Unis. Moins de vingt mille copies de cet ouvrage seront vendues entre 1963 et 1991, avant qu'il ne soit épuisé⁴, ce qui constitue un chiffre assez faible sur une si longue période, au regard du succès d'autres publications sur le sujet beaucoup moins bien diffusées dans une période beaucoup plus courte. Les travaux de Victor et Aladár Olgyay resteront quasiment ignorés pendant près d'une décennie de 1963 à 1973, à l'exception de quelques recherches éparses, essentiellement concentrées sur les diagrammes bioclimatiques

1 *Ibid.*

2 C. Gaillard, « De la loi bioclimatique à la conception bioclimatique en architecture », *La Météorologie. Revue de l'atmosphère et du climat*, n°113, mai 2021, p. 41-46. Voir également : A. D. Hopkins, « Periodical Events and Natural Law as Guide to Agricultural Research and Practice », *Monthly Weather Review. Supplement n°9*, Washington : U.S. Department of Agriculture, Weather Bureau, 1918, 42 p. et : « The Bioclimatic Law », *Journal of the Washington Academy of Sciences*, Vol. X, Washington : Washington Academy of Science, 1920, p. 34-40.

3 M. Chauvin-Michel, *Architectures solaires et politiques énergétiques en France de 1973 à 1985*, *op. cit.*, p. 49.

4 J. Reynolds, « The Roots of Bioclimatic Design », in : V. Olgyay *et. al.*, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. XI.

et représentées par Baruch Givoni. L'année 1973 marque une certaine redécouverte de *Design with Climate*, motivée par des préoccupations environnementales et énergétiques que nous examinerons en détail par la suite. Les recherches de Victor Olgyay seront ensuite progressivement reprises, reproduites et commentées du milieu des années 1970 jusqu'à aujourd'hui, où l'on retrouve la classification des climats et certains des diagrammes d'Olgyay dans des ouvrages professionnels en langue anglaise comme *Mechanical and Electrical Equipments for Buildings*¹.

Conclusion de la première partie

Malgré la richesse de l'information qu'il présente, il manque à l'ouvrage *Design with Climate* ainsi qu'à l'ensemble des travaux en architecture évoqués précédemment une prise en compte explicite de ce que l'on pourrait nommer « la fonction climatique² » des éléments architecturaux, pour reprendre une expression d'Ayoub. Certains passages de *Climate & Architecture* d'Aronin, quelques travaux sur l'architecture tropicale, ainsi que l'ensemble de l'ouvrage *Solar Control & Shading Devices* de Victor et Aladár Olgyay sont consacrés à une étude de la fonction climatique de certains éléments architecturaux, mais la fonction de ces éléments est essentiellement d'assurer une protection climatique, ce qui constitue une fonction climatique importante mais nullement suffisante. En réalité, notre hypothèse est que, parallèlement au développement théorique de la climatologie et de la microclimatologie appliquée à l'architecture qui culmine avec l'approche bioclimatique mise au point par Olgyay, il s'est développé durant la même période une intense recherche sur la fonction climatique des éléments architecturaux, qui s'est incarnée dans le développement de la conception solaire passive, qui peut être considérée comme l'autre face de la conception bioclimatique. La conception solaire passive aurait accompagné la mise au point des techniques permettant d'utiliser les énergies du climat pour le chauffage et le rafraîchissement.

Cette hypothèse s'appuie sur les recherches des architectes et éditeurs français Patrick Bardou et Varoujan Arzoumanian, qui ont consacré une importante partie de leurs travaux à l'étude de la conception bioclimatique et de l'architecture solaire passive. Ils estiment que les

1 W. T. Grondzik, A. G. Kwok, B. Stein, *et. al.*, *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings*, 11e éd., Hoboken : John Wiley & Sons, 2010, p. 50.

2 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 83.

termes d'architecture « solaire » et d'architecture « bioclimatique » sont synonymes, mais que « l'architecture solaire n'est qu'une démarche partiellement bioclimatique¹ », dans la mesure où elle se concentre sur la prise en compte d'un facteur climatique principal, le rayonnement solaire, et qu'elle développe des techniques pour en exploiter ses effets. L'architecte américain David Wright, qui fut l'un des architectes bioclimatiques les plus influents durant la décennie 1970, considère également que l'architecture bioclimatique et l'architecture solaire passive sont une seule et même chose². Cette hypothèse est également confirmée par les écrits de l'architecte Donald Watson sur l'évolution de la conception bioclimatique, qui affirme que l'expression de « conception solaire passive » désigne l'approche bioclimatique telle que l'avait pensée Victor Olgyay, le terme « bioclimatique » étant cependant « plus complet³ ». Ce point de vue est aussi partagé par certains ingénieurs⁴.

Cependant, il apparaît que l'approche bioclimatique, que nous venons d'étudier, et la conception solaire passive, que nous souhaitons aborder, ont connu un développement simultané mais tout à fait autonome jusqu'au milieu des années 1970, ce qui justifie de les traiter séparément. Ce développement autonome présente un partage assez net entre d'une part les travaux théoriques que nous avons évoqués qui mobilisent essentiellement la microclimatologie, et d'autre part le développement d'une compréhension du rôle des éléments architecturaux dans la production d'effets microclimatiques déterminés, que nous souhaitons évoquer dans la partie suivante. Selon ce point de vue, notre première partie était consacrée au développement de la dimension matérielle de la climatologie, c'est-à-dire à la mise en évidence des phénomènes microclimatiques produits par l'aménagement et susceptibles d'être compris et manipulés par les concepteurs. Notre deuxième partie concernerait l'autre pôle de ce problème, ce que l'on pourrait nommer la dimension climatique des choix matériels et, plus spécifiquement, des éléments constructifs utilisés par l'architecte. La mise en évidence de la dimension matérielle de la climatologie, illustrée par l'approche bioclimatique d'Olgyay, et de la dimension climatique des choix matériels, illustrée par le développement de la conception

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 39.

2 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 81 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional. Compte-rendu intégral du colloque, Castres 12-18 juin 1978*, Paris : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société, 1980. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 D. Watson, « Bioclimatic Design Research », op. cit., p. 403.

4 Chr. Cardonnel, *Solaire actif et passif. Conception, bilan thermique, habitat*, Paris : Les Éditions parisiennes chaud froid plomberie, 1983, p. 13.

solaire passive, seraient à l'origine de la conception bioclimatique qui s'est véritablement structurée au début des années 1970.

Plus fondamentalement, alors que les travaux mentionnés précédemment reposaient essentiellement sur la climatologie, la microclimatologie et la physiologie, l'ensemble des recherches et des études que nous allons présenter dans cette deuxième partie mobilisent essentiellement les sciences de l'ingénieur, et plus précisément l'étude des phénomènes thermiques et la thermique du bâtiment. Notre but est ainsi de montrer que ce qui s'est développé par la suite sous le terme de « conception bioclimatique » résulte d'une synthèse entre ces deux champs de recherche issus d'un côté de la climatologie, et de l'autre, des sciences de l'ingénieur. Ces deux champs de recherche qui ont connu des développements autonomes auraient convergé vers une méthode permettant de produire un microclimat habitable, définition qui caractérise la conception bioclimatique telle qu'elle a été développée et formalisée dès le milieu des années 1970.

PARTIE II : LA FONCTION CLIMATIQUE DES ÉLÉMENTS ET LE DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES SOLAIRES PASSIVES

Aborder la genèse de la conception bioclimatique en architecture à partir des recherches en microclimatologie, ainsi que la reprise de ces recherches par certains architectes et la naissance de « l'approche bioclimatique » développée par Victor Olgyay, ne donnerait qu'une vue partielle et essentiellement théorique du développement de cette méthode de conception. Parallèlement au développement de la connaissance des phénomènes microclimatiques et de leur prise en compte par les architectes jusqu'au milieu des années 1960, d'autres architectes, ingénieurs ou inventeurs ont mis au point des techniques susceptibles de contrôler, réguler voire amplifier certains de ces phénomènes permettant, dans certains cas, d'en obtenir une énergie utilisable dans les habitations pour le chauffage ou le rafraîchissement. Ces techniques ont été regroupées dans ce qui a été nommé dès le milieu des années 1970 « conception solaire passive », qui peut être considérée comme analogue à la conception bioclimatique dans la mesure où l'expression « *passive solar design* » est beaucoup plus employée que celle de « *bioclimatic approach* » ou de « *bioclimatic design* » dans les travaux américains à partir de cette date. La mise au point ou l'amélioration de ces techniques résulte d'une prise de conscience de la fonction climatique de certains éléments en architecture, et d'une recherche consciente et informée par les sciences de l'ingénieur des possibilités offertes par certains matériaux, traitements de surface et phénomènes physiques, afin de tirer parti des énergies issues du climat et notamment du rayonnement solaire.

Nombre de ces techniques ne sont pas nouvelles et existaient déjà dans l'architecture traditionnelle et vernaculaire sans qu'il soit possible de dater leur invention avec précision. De même, la prise de conscience de la fonction climatique des éléments architecturaux transparaît dans une grande quantité d'écrits relatifs à l'architecture ou à l'urbanisme bien antérieurs à cette période, notamment au XVIII^e et au XIX^e siècle¹. Comme le note justement Jean-Pierre Traisnel, les recherches menées en architecture solaire et bioclimatique s'inscrivent « dans la continuité des travaux des physiciens, horticulteurs, chimistes, médecins qui établissent, de l'âge des Lumières au Second Empire, les bases d'une connaissance applicable à la paroi et à sa fonction

1 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit.

environnementale¹. » Reprenant cette thèse, l'architecte Vanessa Fernandez affirme que les moyens de l'architecture bioclimatique « prennent leur source dans les techniques et les sciences de la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle². » Nous essaierons dans la mesure du possible de faire référence à ces recherches antérieures à la période que nous considérons, qui s'étend du début des années 1950 au milieu des années 1980, et qui est caractérisée par un certain foisonnement dans l'invention et le développement de ces techniques.

De par la prolifération de ces techniques et les nombreuses variations qu'elles ont connues, il était impossible d'en établir une classification exhaustive. Nous en avons regroupé l'essentiel, celles qui ont le plus largement circulé sous forme de publications, qui ont été le plus reproduites, commentées, étudiées et citées par les acteurs. La majorité de ces techniques sont très rudimentaires au regard des standards actuels et servaient souvent à remédier au manque de masse ou d'isolation thermique des constructions de cette période³, mais certaines techniques de chauffage et de rafraîchissement que nous présentons constituent des systèmes très élaborés et souvent partiellement oubliés aujourd'hui. Nous avons délibérément écarté les recherches relatives à la conversion électrique de l'énergie solaire et à toutes les formes d'utilisation directe de l'énergie solaire appliquée aux hautes et aux moyennes températures qui ne relèvent pas directement des préoccupations de l'architecture, bien qu'elles aient eu indirectement une influence sur le développement de la conception bioclimatique par la suite.

Cette partie présente donc un inventaire des techniques solaires passives, et plus généralement des techniques conçues pour réguler, atténuer ou amplifier les effets du climat, celles-ci ayant été intégrées à la conception bioclimatique à partir du milieu des années 1970. Elles forment un ensemble de techniques conçues pour assurer un contrôle climatique en limitant le recours aux éléments mécaniques alimentés électriquement. Nous avons choisi de les regrouper par « lignées techniques⁴ » afin de mettre en avant les principes physiques qui y sont à l'œuvre et qui assurent leur fonctionnement (évaporation, convection naturelle...). L'étude des techniques suivant des lignées a été développée par Jacques Lafitte puis par André Leroi-Gourhan dans *Évolution et techniques*⁵. Cette méthode repose sur le présupposé que

1 *Ibid.*, p. 427. Voir également : R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, *op. cit.*, p. 55-68.

2 V. Fernandez, « De l'épure géométrique au brise-soleil », p. 143 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, *op. cit.*

3 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, *op. cit.*, p. 30.

4 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 40.

5 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. L'Homme et la matière*, *op. cit.*, p. 24.

l'évolution des techniques et des objets techniques suit un ordre à la fois logique et chronologique¹. Elle a l'avantage d'insister sur le fonctionnement des techniques et l'évolution de leur compréhension. Si son application sur de longues séries temporelles peut donner une image faussement linéaire de l'évolution d'une technique², elle permet de définir rigoureusement des lignées d'évolution pour différentes techniques, durant une courte période déterminée³. L'étude des « lignées techniques » a été reprise en 1958 par Gilbert Simondon, afin d'analyser l'évolution des objets techniques selon les fonctions qu'ils concrétisent, plutôt que selon les usages qu'ils permettent et qu'il estime contingents⁴. On peut alors regrouper dans une même lignée technique les objets « mettant en œuvre le même principe⁵ » pour leur fonctionnement. Cette méthode s'est développée par-delà Simondon⁶.

Nous souhaitons mobiliser l'approche par « lignées techniques⁷ » dans cette partie, pour ces avantages ainsi que pour la clarté de l'exposition permise par cette méthode. L'intérêt principal de cette approche est qu'elle nous permet de restituer l'évolution des techniques relatives au contrôle climatique, à l'opposé de l'idée selon laquelle ces techniques seraient autant d'inventions isolées mises au point par un individu en dehors de toute lignée technique. L'étude des lignées techniques permet de montrer que ces inventions appartaient généralement à une ou plusieurs lignées préexistantes qu'elles prolongeaient indirectement. Elle permet également de prendre le contre-pied des inventaires des techniques de la période qui nous intéresse, qui sont essentiellement des catalogues qui présentent ces techniques indépendamment les unes des autres, comme dans le *Catalogue des outils solaires* publié par David Roditi en 1980⁸, ou le manuel de William A. Shurcliff intitulé *New Inventions in Low-Cost Solar Heating*⁹ (*Nouvelles inventions dans le chauffage solaire à bas prix*). La mise en évidence de ces lignées techniques a nécessité le croisement de très nombreuses sources. En étudiant ces techniques selon les lignées auxquelles elles appartiennent, nous souhaitons

1 *Ibid.*

2 A. Gras, *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique*, Paris : Fayard, 2003, p. 178-180.

3 X. Guchet, *Le Sens de l'évolution technique*, *op. cit.*, p. 122-127.

4 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 20.

5 Y. Deforge, *Technologie et génétique de l'objet industriel*, Paris : Maloine, (coll. Université de Compiègne), 1985, p. 72.

6 V. Bontems, « Au-delà de Simondon (1). Le progrès des lignées techniques », [en ligne], in : *Implications Philosophiques*, 22 nov. 2016, [consulté le 02/09/2021], disponible à l'adresse : <<http://www.implications-philosophiques.org/le-progres-des-lignes-techniques/>>

7 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 40.

8 D. Roditi, *Le Catalogue des outils solaires*, Paris : Alternative et Parallèles, 1980, 121 p.

9 W. A. Shurcliff, *New Inventions in Low-Cost Solar Heating: 100 Daring Schemes Tried and Untried*, Andover : Brick House Publishing Company, 1979, 293 p.

restituer leur genèse et concentrer notre analyse sur les principes physiques qu'elles mobilisent, ainsi que sur les problèmes qui ont parfois entravé leur développement.

L'approche par lignées techniques a un second avantage puisqu'elle permet de répartir les techniques selon leurs principes et leurs fonctionnements. Nous sommes en effet confrontés au problème suivant : quand un auteur se réfère au principe ancien des climatiseurs sahariens et suggère des évolutions, l'intérêt n'est pas de dater l'apparition du climatiseur saharien, mais de montrer pourquoi l'auteur intègre son invention dans la lignée de celle des climatiseurs sahariens¹. Le développement des techniques solaires passives est tout autant basé sur la reprise de techniques traditionnelles, et dont l'invention est délicate à dater par leur ancienneté, que sur l'invention de techniques nouvelles permises, par exemple, par de nouveaux matériaux. Bardou et Arzoumanian ont pu écrire que la conception bioclimatique « ne fait que se souvenir des solutions traditionnelles, améliorées par de nouveaux matériaux et adaptées aux besoins architecturaux contemporains². » Selon nous, l'essentiel est donc de reconstituer les lignées techniques qui permettent d'inscrire certains systèmes mis au point dans la seconde moitié du XX^e siècle dans la lignée de techniques traditionnelles ou vernaculaires, dont il est difficile de dater l'apparition.

En ce qui concerne proprement l'évolution des techniques de contrôle climatique, nous verrons qu'elle a constitué à résoudre et à surmonter des antagonismes identifiés dans chaque lignée technique. Par exemple, il existe un antagonisme dans l'impossibilité de réaliser à la fois une ventilation naturelle, par exemple par l'ouverture de fenêtres, et une isolation phonique suffisamment satisfaisante de l'environnement extérieur qui peut être bruyant³ (circulation, travaux...). Il y a un antagonisme technique car il est impossible de réaliser à la fois l'une et l'autre de ces fonctions et la résolution de cet antagonisme reste délicate. Généralement ce type d'antagonisme peut être surmonté en réassignant à des éléments bien différenciés des fonctions qui étaient primitivement confondues dans un même élément, selon un processus déjà repéré dans l'évolution d'autres techniques⁴. Un autre antagonisme de cette nature, qui a été résolu de cette manière à l'époque qui nous intéresse, concerne la possibilité d'assurer une ventilation

1 Le principe d'un climatiseur saharien est d'abaisser la température de l'air sec et non saturé en humidité par évaporation au contact de l'eau contenue dans un linge humide, ou une jarre de terre poreuse et remplie d'eau, selon le fonctionnement d'un climatiseur adiabatique. Voir J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 303-304.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 54.

3 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., p. 196.

4 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 34.

naturelle satisfaisante, tout en protégeant les habitants des insectes dans les zones tropicales. L'observation montrait que les moustiquaires entravaient la circulation de l'air. Ce problème a été très sérieusement étudié par Koenigsberger¹ et par Givoni², qui l'ont résolu en proposant de ne pas installer de moustiquaires dans le plan de la façade, mais au contraire largement en débord vers l'extérieur afin de limiter ses effets sur le mouvement de l'air.

Nous essaierons dans la mesure du possible de signaler ces antagonismes et leurs résolutions pour chaque lignée technique. Nous présenterons dans une première partie les techniques relatives au contrôle climatique à l'échelle du microclimat, des surfaces et des ouvertures. Dans un second temps, nous aborderons les techniques solaires passives de chauffage des habitations, pour terminer sur les techniques de rafraîchissement et de climatisation naturelle.

II.1. Protection, régulation thermique et choix matériels

Si l'on s'en tient à des considérations très générales et en s'efforçant de faire abstraction des usages culturels, les éléments en architecture, comme le toit, le mur ou les ouvertures possèdent des fonctions techniques différenciées (supporter, franchir...) qui dépendent des matériaux et de la mise en œuvre employée, mais également du climat où se situent ces constructions (abriter, ventiler...). En restant à ce niveau général et très superficiel, il est déjà possible de proposer des corrélations entre la forme, les matériaux et les dimensions de ces éléments observés dans l'architecture traditionnelle ou vernaculaire et les zones climatiques où elles se trouvent. C'est à partir d'une analyse de cette nature que le géographe Jean Dollfus propose en 1954 de hiérarchiser l'importance relative du toit et des murs ainsi que de leurs matériaux, en fonction de la latitude dans les constructions traditionnelles³, ces résultats étant commentés par Olgyay en 1963. Dans la même perspective, l'architecte français Paul-Jacques Grillo présente en 1960 une analyse de la forme et du matériau des toitures en fonction du climat pour l'ensemble du monde⁴, et le géographe Pierre Deffontaines propose en 1972 une recension

1 *Ibid.*, p. 126.

2 B. Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1994, p. 50-52.

3 J. Dollfus, *Les Aspects de l'architecture populaire dans le monde*, *op. cit.*, p. VII-VIII.

4 P.-J. Grillo, *Form, Function & Design*, [1ère éd. *What is design ?*, 1960], New York : Dover Publication Inc., 1975, p. 90-93.

des « dispositifs de toiture¹ » corrélée aux différents types de climats et aux matériaux disponibles. Ces travaux sur la fonction climatique des éléments en architecture se concentrent sur la fonction de protection et de régulation thermique qu'ils doivent assurer, celle-ci étant variable en fonction des matériaux disponibles et du type de climat et de microclimat où la construction se situe.

L'histoire des éléments architecturaux du point de vue climatique sur une longue période a déjà été entreprise, entre autres par Jean-Pierre Traisnel pour le cas de la France². L'étude de Traisnel est précieuse dans la mesure où elle montre que certains problèmes repris au milieu du XX^e siècle ont parfois fait l'objet de recherches importantes au XIX^e siècle, par exemple en ce qui concerne la protection des constructions et l'étude du comportement thermique des parois. Cette partie est consacrée à l'analyse des fonctions climatiques essentielles que sont la protection et la régulation des apports climatiques, celles-ci pouvant être assurées à plusieurs échelles : au niveau du microclimat, aux abords de la construction et enfin par la construction elle-même, grâce aux choix des matériaux ainsi que leur couleur et leur texture d'une part, et le positionnement, le dimensionnement et la protection des ouvertures d'autre part.

II.1.1. Microclimat et contrôle climatique aux abords de la construction

II.1.1.1. Modifier le microclimat par la végétation et le traitement du sol

En prenant comme hypothèse de travail l'idée énoncée par Olgyay en 1963 selon laquelle « [l'interception] de l'énergie³ » doit se produire « au bon endroit, avant qu'elle n'attaque le bâtiment⁴ », le microclimat et l'environnement proche d'une construction constituent le premier niveau d'intervention pour réaliser un contrôle climatique. Cette hypothèse est également conforme à son approche graduelle de la réduction des variations climatiques présentée en 1951, qui affirme que les systèmes de conditionnement d'air intérieur ne doivent être installés qu'en dernier recours et quand le contrôle climatique ne peut pas être correctement réalisé aux autres échelles⁵. Selon ce point de vue, le contrôle climatique peut être

1 P. Deffontaines, *L'Homme et sa maison*, Paris : Gallimard, (coll. Géographie humaine), 1972, p. 62-89.

2 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 63.

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Interception of the energy happens at the right place — before it attacks the building. »

5 V. Olgyay, « The Temperate House », *op. cit.*, p. 182.

réalisé à différentes échelles et chaque échelle engage des choix techniques spécifiques. L'architecte et ingénieur Ayoub, dont les travaux en architecture tropicale seront intégrés au développement de la conception bioclimatique en France dès le milieu des années 1970, partage un point de vue analogue à celui d'Olgyay. Il estime que la régulation des phénomènes climatiques doit s'opérer à différents niveaux et écrit en 1960 :

« Une partie des influences thermiques qui affectent un bâtiment prennent leur source dans les environnements lointain et immédiat sur lesquels la technique a de sérieuses possibilités d'action par les moyens dont elle dispose pour améliorer le microclimat d'une région. Il serait donc rationnel qu'une étude complète abordât le contrôle des phénomènes thermiques depuis leurs causes lointaines jusqu'à leur action finale sur les ambiances intérieures. Il est logique par exemple, avant d'étudier les moyens de protection des façades contre les radiations solaires diffuses, de réduire celles-ci à leur minimum par un traitement adéquat des sols et surfaces ambiantes¹. »

Ayoub affirme que la fonction de protection solaire n'est pas limitée à la façade, mais peut être obtenue au niveau du microclimat et à distance de la construction, en prenant en compte ce qu'il nomme les « microfacteurs² », qui agissent aussi sur la température des surfaces aux abords des constructions. L'étude de « l'environnement lointain » qu'il mentionne nécessite de prendre en compte des éléments orographiques significatifs mais éloignés, comme une colline ou une dépression, susceptibles d'influencer le microclimat du site. Un relief proche ou lointain peut être une protection solaire efficace dans certains climats, mais peut tout autant créer un masque bloquant des apports solaires favorables dans un autre. Ainsi, les protections solaires au niveau du microclimat (colline, arbre...) et au niveau de la construction elle-même (persienne, saillie...) peuvent être regroupées dans la même lignée technique, puisqu'elles consistent à assurer les mêmes fonctions d'occultation du rayonnement solaire.

La recherche du contrôle et de la régulation des phénomènes microclimatiques mobilise des techniques agroforestières et paysagères qui ont été particulièrement diffusées par les ingénieurs et les architectes préoccupés par ce problème à partir des travaux des microclimatologues précédemment évoqués. Ayoub affirme que « [l'étude] de l'environnement

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 76.

2 *Ibid.*, p. 104.

lointain et de son action sur le microclimat du site et de la cité fait appel aux techniques forestières, agricoles et de travaux publics ainsi qu'aux techniques de l'urbanisme¹. » Comme Geiger ou Aronin avant lui, il suggère d'intégrer les techniques du monde agricole et agroforestier dans le but de modifier favorablement le microclimat d'un site. Parmi ces techniques, il évoque « le traitement des surfaces horizontales² » qui modifie « les fonctions thermiques des divers sols arides et pavements, des diverses végétations et plans d'eau³. » Il préconise par exemple « la création d'un simple miroir d'eau dans les régions arides⁴ » afin d'améliorer « les conditions thermiques en tempérant en toute saison le micro-climat du site⁵. » En ce qui concerne les techniques agricoles et forestières, il affirme que « la diversité des arbres, leur volume, densité, propriétés thermiques et caducité de leurs feuillages en font un élément important de contrôle des radiations, vents et température de l'air au voisinage immédiat du bâtiment⁶. » Ce point avait été particulièrement étudié au début des années 1950 par Aronin avec l'aide de botanistes⁷. Dans la même perspective, d'autres architectes comme Givoni, proposent de modifier l'albédo des surfaces adjacentes aux constructions par la végétation afin de contenir le rayonnement réfléchi⁸.

Dans la mesure où les apports solaires sur les façades est et ouest sont considérés comme défavorables dans les climats chauds, ainsi que dans les climats tempérés durant une partie de l'année, la plantation d'arbres pour protéger ces façades ou la conservation de ceux déjà présents sur le site est systématiquement recommandée⁹. Comme nous le verrons à propos des protections solaires, cette préconisation est justifiée par le fait que la géométrie complexe du rayonnement solaire sur ces façades rend très difficile le recours à des protections solaires fixes conventionnelles (brise-soleil, persiennes, jalousies...) sans une étude détaillée de leur géométrie¹⁰. L'étude des protections solaires par des arbres à l'est et à l'ouest avait été menée dès 1951 par Olgyay à partir de maquettes, en modélisant chaque arbre comme un élément opaque. Dans la lignée des préconisations d'Olgyay, Ayoub écrit que les plantations d'arbres

1 *Ibid.*, p. 76.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 136.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 76.

7 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 94-100.

8 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 304.

9 E. M. Fry, J. Drew, *Tropical Architecture in the Dry and Humid Zones*, op. cit., p. 106-107.

10 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 304.

« sont particulièrement efficaces sur les façades voisines de l'est et de l'ouest¹ ». Les entretiens avec certains architectes confirment que des arbres positionnés pour la protection solaire de ces orientations ont été plantés dans certaines de leurs constructions en climat tempéré². Ayoub affirme que ce choix est particulièrement intéressant dans les climats à deux saisons marquées où « l'implantation d'arbres caducs peut être considérée comme la solution la plus rationnelle du contrôle solaire sur ces orientations³. »

L'insistance sur la rationalité de ce choix est importante à souligner : ce sont avant tout des critères géométriques qui justifient le recours aux arbres pour la protection solaire sous certaines latitudes. La chute des feuilles des plantes à feuillage caduc, qui permet de bénéficier des apports solaires pendant la période de chauffage, est présentée comme « une valeur fonctionnelle spécifique⁴ » qui étaye la rationalité de ce choix. D'autres spécificités des végétaux semblent cependant ignorées. Bien que le phénomène d'évapotranspiration de la végétation ait été bien étudié par les climatologues dès la fin des années 1940⁵, son intérêt pour le rafraîchissement est rarement mentionné avant la fin des années 1970 par les architectes et les ingénieurs⁶. La végétation est donc essentiellement privilégiée pour son opacité sélective et le fait qu'elle puisse être positionnée à l'écart de la construction, afin d'assurer un contrôle climatique à l'échelle du microclimat. Cet usage de la végétation est présenté comme une redécouverte de « l'arbre utile⁷ » par certains architectes.

Plutôt que de recourir à la végétation, l'implantation en zone urbaine dense est présentée comme intéressante dans les zones tropicales sèches et plus globalement dans les climats chauds et secs, étant donné l'intensité du rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi qui est nécessairement nuisible pour le confort intérieur. Ayoub estime que dans ces climats « le souci du contrôle solaire doit être prioritaire⁸. » La construction en hauteur et l'étroitesse des rues dans les zones arides sont considérées comme de bons moyens pour protéger mutuellement les

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 136.

2 Entretien avec Georges Wursteisen, le 18/06/2019 à Cabestany.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 136.

4 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 94. Traduction personnelle, citation originale : « a specific functional value ».

5 Ch. P. Péguy, *Précis de climatologie*, *op. cit.*, p. 154.

6 J.-L. Izard, A. Guyot, « Effets particuliers de la végétation », *Archi bio*, *op. cit.*, p. 33-36.

7 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, « Le Végétal », Paris : Ministère de l'environnement et du cadre de vie, 1979, n. p.

8 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 72.

façades du rayonnement solaire direct¹. Pour Olgyay, la rue et la texture du maillage urbain font office de brise-soleil horizontal dans ce type de climat². Cependant, cette fonction de protection de la rue dans les climats tropicaux n'est pas reconnue par l'ensemble des architectes : Dreyfus affirme « que la notion de rue est inadaptée en pays tropical³ » car les rues canalisent le vent et dévient les brises, tandis que les façades en vis-à-vis ont tendance à réfléchir le rayonnement solaire⁴. Le rejet du principe de la rue par Dreyfus dans les zones tropicales est donc motivé par le fait que le rayonnement solaire réfléchi y est considérable, celui-ci étant « *reçu même par des surfaces dites à l'ombre*⁵. » Afin de remplacer la protection produite par la rue qu'il estime imparfaite, il préconise « d'intégrer au maximum la végétation dans les zones bâties⁶ » afin « d'améliorer l'environnement *immédiat* de chaque construction⁷. » Bien que le délai de croissance d'un végétal soit une contrainte rarement mentionnée, la protection des constructions par la végétation est donc unanimement considérée comme favorable dans l'ensemble des climats par la majorité des architectes et des ingénieurs. L'usage de pelouses enherbées au sol est recommandé pour modifier favorablement l'albédo des surfaces horizontales, puisque « l'effet modérateur⁸ » de la végétation sur la température de l'air, l'humidité et le rayonnement est systématiquement considéré comme positif.

II.1.1.2. Le contrôle climatique du vent et l'usage des brise-vent

Pour de nombreux ingénieurs et architectes, la protection apportée par la végétation ne se limite pas aux effets indésirables du rayonnement solaire ou au contrôle de l'albédo des surfaces horizontales. Si le rayonnement solaire peut être considéré comme le principal facteur à contrôler, le vent et ses effets sont présentés, par ordre d'importance décroissant, comme le second facteur à prendre en compte par la majorité des ingénieurs et des architectes dans de très nombreux climats. En ce qui concerne l'implantation des constructions dans les climats tropicaux humides, Dreyfus propose d'espacer systématiquement les bâtiments afin de

-
- 1 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, op. cit., p. 204.
 - 2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 91.
 - 3 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 316.
 - 4 *Ibid.*
 - 5 *Ibid.*, p. 112.
 - 6 *Ibid.*, p. 315.
 - 7 *Ibid.*
 - 8 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, op. cit., p. 37.

maximiser l'exposition aux vents et aux brises. Il recommande notamment de séparer les constructions d'au moins sept fois leur hauteur, afin d'éviter l'effet de masque et les turbulences induites dans l'écoulement du vent par les obstacles¹. Cette règle qui stipule que l'écoulement du vent en aval d'un obstacle est perturbé jusqu'à une distance de sept fois la hauteur de cet obstacle ($7h$) a abondamment circulé, puisqu'elle est mentionnée par d'autres auteurs afin d'en déduire l'espacement des constructions et le positionnement des brise-vent². Elle est vraisemblablement issue des recherches menées en soufflerie au Texas Engineering Experiment Station, qui ont également mis en évidence que la disposition en quinconce des constructions permettait une implantation plus dense, tout en minimisant les turbulences en aval dans le sens du vent³.

Il importe de préciser que les effets du vent et des brises, généralement bénéfiques pour le rafraîchissement dans les zones tropicales sèches et humides, sont à l'inverse systématiquement considérés comme une source de déperditions thermiques et de nuisances dans les climats froids et tempérés, au moins durant une partie de l'année. Dans les climats tempérés et froids, une végétation basse et compacte à feuillage persistant (buisson, haie...) est présentée comme susceptible d'assurer la fonction de brise-vent une partie de l'année et jusqu'à une distance d'environ sept fois leur hauteur. L'usage de plantations brise-vent en architecture est déjà mentionné dans l'architecture traditionnelle de plusieurs pays⁴, mais des architectes comme Olgyay ont proposé de systématiser leur emploi pour la planification urbaine dans les climats froids en utilisant de longues rangées d'arbres afin de dévier les vents orientés selon l'axe nord-est/sud-ouest⁵. Préoccupé par la conception en climat froid, Aronin dédie de longs développements au choix des haies et des clôtures brise-vent⁶. Résumant différentes expérimentations, il donne les valeurs de réduction de la vitesse du vent en fonction de la densité de la haie brise-vent à différentes distances à partir des recherches du climatologue C. E. P. Brooks⁷. Des graphiques sur l'effet brise-vent d'une haie sont présentés par Olgyay en 1963, issus d'études expérimentales et de simulations en soufflerie⁸ (*figure 29*). En ce qui concerne les effets de la végétation sur les mouvements de l'air, d'autres recherches mentionnées plus

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 168.

2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 102.

3 *Ibid.*, p. 101.

4 E. Aubert de la Rüe, *L'Homme et le vent*, Paris : Gallimard, (coll. Géographie humaine), 1940, p. 85-87.

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 100.

6 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 182-196.

7 *Ibid.*, p. 190-191.

8 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 98-99.

tardivement estiment qu'une surface végétale permet de multiplier de quatre à vingt fois la « couche de transition¹ » (la couche d'air près du sol considérée comme immobile car retenue par la friction du sol) par rapport à une surface lisse².

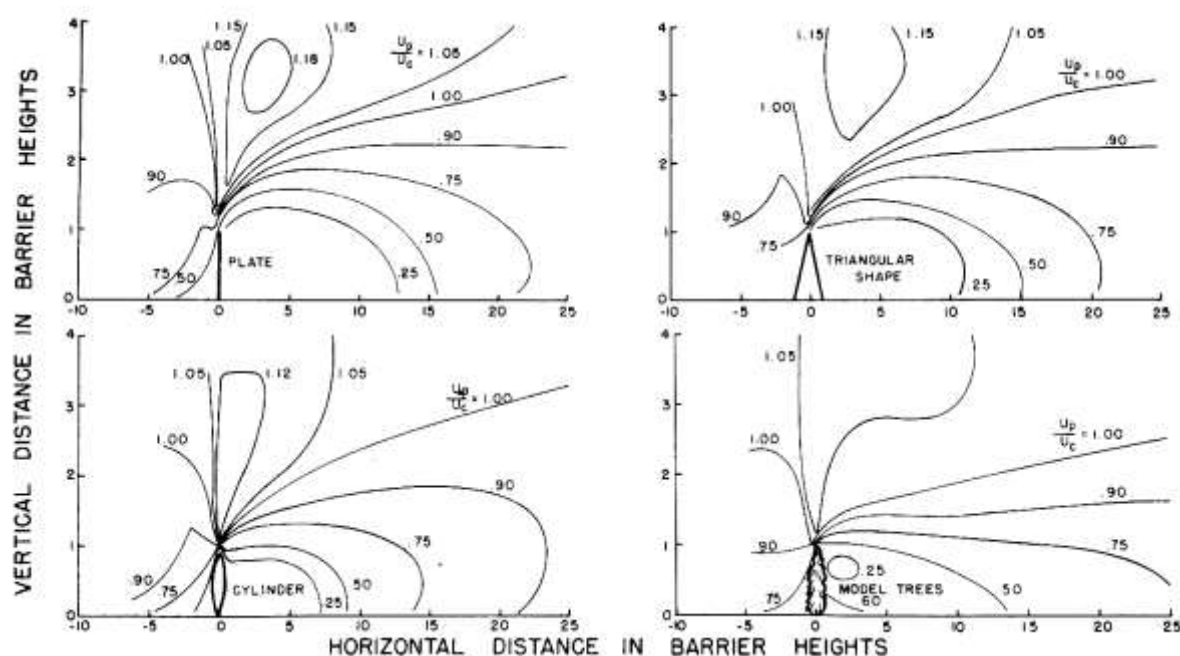


Figure 29 : Effets de différents brise-vent sur la vitesse relative de l'air.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 98)

En France, les connaissances des ingénieurs agricoles sur la plantation des haies brise-vent sont présentées comme utiles aux architectes dès la fin des années 1970 et diffusées dans des périodiques d'architecture³. L'usage traditionnel des arbres dans le monde agricole pour canaliser le vent est pris comme exemple⁴. Le contrôle des vents locaux et des brises mobilise ces techniques agricoles. L'architecte Bob Laignelot présente le choix du site pour la construction d'une de ses maisons bioclimatiques par la prise en compte du cers, vent local de la région Languedoc et explique que « [la] configuration du terrain – adossé à une colline – fait que la façade nord est protégée du cers qui tourne du nord à l'ouest – à l'est, il y a un rideau

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 155.

2 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., p. 37.

3 D. Soltner, « Planter des haies brise-vent », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », n° 325, juin-juillet 1979, p. 88-89.

4 Entretien avec Bernard Banyuls, le 23/10/2019 à Perpignan.

d'arbres qui protège très efficacement¹. » Dès la fin des années 1970, les recherches sur les effets du vent en architecture menées à la soufflerie du CSTB à Nantes par Alain Guyot et Jacques Gandemer², intègrent la végétation comme « un élément de contrôle du gisement solaire et du microclimat³ ». Les recherches expérimentales de Guyot et Gandemer seront intégrées aux manuels en langue française dédiés à la conception bioclimatique dès 1979⁴. Ces manuels vont contribuer à diffuser leurs résultats sur l'écoulement de l'air en milieu urbain mais aussi leurs observations sur les aménagements brise-vent utilisés en agriculture, comme la protection contre le mistral dans la plaine de Crau en France⁵. Leurs travaux peuvent être considérés comme un pendant de ceux menés aux États-Unis en soufflerie à la Texas Engineering Experiment Station depuis le milieu du XX^e siècle. Dès 1974, l'expertise du CSTB sur la modélisation de l'écoulement du vent en soufflerie est mobilisée par des architectes associés à la conception bioclimatique en France, notamment pour l'aménagement de la plage du Prado à Marseille, conçu pour minimiser l'incidence du mistral sur les constructions et l'aménagement extérieur⁶.

II.1.1.3. Le contrôle climatique par l'orientation de la construction

Dans la continuité des problèmes posés par le contrôle climatique à l'échelle du microclimat et l'utilisation de protections solaires et de brise-vent, un paramètre de conception déterminant concerne l'implantation d'une construction dans un microclimat et le choix d'une orientation. L'orientation doit être déterminée en fonction de facteurs climatiques d'ordre

-
- 1 R. Laignelot, « L'Expérience d'un architecte habitant sa propre maison solaire », p. 73 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional. Compte-rendu intégral du colloque, Castres 12-18 juin 1978*, Paris : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société, 1980. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 J. Gandemer, A. Guyot, *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Guide méthodologique et conseils pratiques*, Paris : Ministère de l'Équipement/Ministère de la Qualité de vie, décembre 1976, 130 p. (Archives de Roger Dabat – Marseille). J. Gandemer, A. Guyot, *La Protection contre le vent. Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques*, Paris : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, juin 1981, 132 p. (Archives personnelles de Georges Wursteisen – Cabestany)
 - 3 A. Guyot, « La Végétation, composant climatique de l'architecture méditerranéenne », p. 522. in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture. Compte-rendu de la Conférence Internationale tenue à Cannes, France, du 13 au 16 décembre 1982*, Paris : Technique et documentation-Lavoisier/American Solar Energy Society, 1982. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 4 A. Guyot, « Le Vent et la ventilation en architecture » in : J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 21-37.
 - 5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 32.
 - 6 Atelier 9, Groupe A.B.C., CSTB, *La Plage du Prado, conception et aménagement en fonction du vent*, Marseille : Secrétariat à l'expansion de la ville de Marseille, 1975, n. p. (Archives personnelles de Roger Dabat – Marseille) Voir également : J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 23-24.

cosmique comme la position du soleil mais aussi en fonction du microclimat, et particulièrement de la nature des surfaces horizontales et verticales alentour qui peuvent générer des apports thermiques considérables par rayonnement infrarouge et réflexion du rayonnement solaire¹. De plus, le choix d'implanter une construction modifie le microclimat puisque chaque « logement nouvellement construit crée un certain nombre de climats distincts à partir de l'unique préexistant près du sol au-dessus du site de construction² » selon Geiger. L'architecte Jean-Louis Izard estime au même titre qu'on « ne peut tirer du bilan sur terrain vierge aucune conclusion sur les possibilités d'aménagement tant que l'on n'a pas envisagé les incidences de cet aménagement sur le bilan définitif³. »

Selon l'approche bioclimatique, le choix d'une orientation consiste à positionner les différentes surfaces d'une construction et donc les pièces avec lesquelles elles communiquent, de manière à ce que celles-ci bénéficient des apports climatiques favorables et limitent les effets thermiques défavorables. Les discussions relatives à l'orientation des constructions constituent un problème ancien et classique en architecture depuis Vitruve⁴. Ce problème a été particulièrement étudié au XIX^e siècle et dans la première moitié du XX^e siècle en France, dans les controverses qui ont animé les recherches sur l'orientation optimale des immeubles selon « l'axe héliothermique⁵ » issues des problématiques hygiénistes de cette période⁶. Les avantages de l'orientation au sud sont explicitement exprimés par certains hygiénistes allemands dès 1883⁷. Parmi les recherches du début du XX^e siècle, on trouve celles de l'architecte français Augustin Rey qui a étudié les orientations les plus profitables à partir de la mesure des températures de surfaces différemment exposées, ainsi que les problèmes

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 146.

2 R. Geiger, *The Climate Near the ground*, op. cit., p. 377. Traduction personnelle, citation originale : « Every newly built dwelling makes a number of separate climates out of the single one preexisting near the ground above the building site. »

3 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 54.

4 G. Bardet, « Le Facteur soleil en urbanisme », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », op. cit., p. 202-206.

5 A. Harzallah, D. Siret, E. Monin, J. Bouyer, « Controverses autour de l'axe héliothermique: l'apport de la simulation physique à l'analyse des théories urbaines », [en ligne], in : A. Thomine-Berrada, B. Bergdol (dir.), *Repenser les limites: l'architecture à travers l'espace, le temps et les disciplines*, Paris : INHA, 2005, 11 p. ; D. Siret, *L'architecture au soleil. De l'hygiénisme à la ville durable*, H.D.R., Architecture, Université de Nantes, 2010, 142 p. Dir. J. P. Péneau.

6 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 109-115 ; D. Siret, « Rayonnement solaire et environnement urbain : de l'héliotropisme au désenchantement, histoire et enjeux d'une relation complexe », [en ligne], *Développement durable et territoires*, vol. 4, n°2 « Santé et environnement », juillet 2013, p. 2-6.

7 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 110.

d'espacement des constructions pour favoriser l'exposition solaire¹. L'étude de Rey prend en compte la durée d'ensoleillement ainsi que la température de l'air, indépendamment de la quantité d'énergie reçue par une surface, et recommande une orientation selon l'axe nord/sud².

Malgré le caractère « scientifique³ » de la démarche dont il se revendique, ce choix sera vivement critiqué dès 1930. D'autres travaux contemporains mieux justifiés sur le plan scientifique menés par Félix Marboutin et Alfred Henry utilisent des mesures actinométriques de l'intensité énergétique reçue par une surface en fonction de l'angle d'incidence : elles aboutissent à des recommandations d'orientation selon l'axe est/ouest, permettant de maximiser les apports d'hiver et de minimiser les apports d'été⁴. Des recherches analogues sont menées au tout début du XX^e siècle aux États-Unis par William Atkinson, qui étudie notamment les ombres portées par les bâtiments de grande hauteur dans l'espace urbain, ainsi que la pénétration du rayonnement solaire dans les constructions aux solstices et aux équinoxes suivant différents paramètres⁵. Le Corbusier a repris ces problèmes de choix d'orientation, et a alterné entre des choix d'orientation antagonistes tout au long de sa carrière, bien que certains historiens affirment qu'il aurait été le premier à défendre l'intérêt de l'orientation des façades au sud pour la réduction des besoins de chauffage⁶.

Les travaux théoriques sur la conception bioclimatique reprennent directement ou indirectement les résultats de ces recherches sur l'orientation optimale pour les climats tempérés menées entre le XIX^e et le début du XX^e siècle. Dans *Design with Climate*, Olgyay commente et analyse les résultats des principales études sur ce sujet, notamment ceux des Français Félix Marboutin et Gaston Bardet⁷. Dans ses termes, Olgyay définit l'orientation optimale comme celle qui permet une exposition « maximum pendant la période de sous-chauffage, tout en réduisant simultanément l'insolation à un minimum pendant la période de surchauffe⁸ », étant entendu que l'exposition est mesurée sur une surface verticale. Si l'on s'en tient simplement à

1 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1980, p. 163.

2 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 108, 114.

3 *Ibid.*, p. 109.

4 *Ibid.*, p. 110-115 ; G. Bardet, « Le Facteur soleil en urbanisme », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », op. cit., p. 205-206.

5 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 176-177.

6 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 108.

7 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 54.

8 *Ibid.*, p. 54. Traduction personnelle, citation originale : « An optimum orientation for a given site would give maximum radiation in the underheated period while simultaneously reducing insolation to a minimum in the overheated period. »

la géométrie solaire, qui est « parfaitement prévisible¹ » pour une latitude donnée, l'ensemble des documents relatifs à l'architecture tropicale et à la conception bioclimatique que nous avons pu consulter sont unanimes : l'orientation ouest est systématiquement considérée comme la plus défavorable², ainsi que l'orientation est, mais dans une moindre mesure. Pour cette raison, Givoni affirme qu'aux latitudes basses, dans les climats extrêmement chauds, « les façades est et ouest sont généralement dépourvues d'ouvertures³. »

L'orientation selon l'axe est/ouest est donc systématiquement recommandée pour tous les climats. Généralement, dans l'hémisphère nord, l'orientation de la façade principale au sud doit être privilégiée⁴, tandis que dans l'hémisphère sud, c'est l'orientation nord qui doit être recherchée. Pour les latitudes élevées, et si l'on considère seulement le critère d'exposition au rayonnement solaire, la façade principale d'une construction doit donc être orientée vers l'équateur, afin de favoriser la quantité de rayonnement atteignant cette façade aux périodes où le soleil est à l'altitude la plus faible (période hivernale⁵). Aux latitudes plus basses (tropicales et équatoriales) le choix entre l'orientation au nord ou au sud est présenté comme moins déterminant, dans la mesure où la quantité de rayonnement solaire reçue par la toiture est considérablement plus importante que celle reçue par les façades à mesure que l'on se rapproche de l'équateur⁶, ce qui explique le recours aux toits ventilés ou aux « toits parasols⁷ » pour limiter l'échauffement des toitures à ces latitudes. Ces recommandations sur l'orientation sont partagées par les ingénieurs de l'époque, comme Marcel Roubinet, ingénieur spécialiste de la climatisation en France, qui estime en 1970 que la charge de refroidissement pour la climatisation d'une construction moderne orientée selon l'axe nord/sud peut dépasser de 40 % celle d'une construction orientée selon l'axe est/ouest⁸. L'intérêt de l'orientation sud est aussi justifié par les climatologues, comme Landsberg⁹.

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 202.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 122-123.

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 222.

4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 57 ; E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 87 ; R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 94.

5 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, op. cit., p. 105.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 122.

7 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 133.

8 M. Roubinet, *La Climatisation*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1970, p. 116.

9 H. E. Landsberg, « Comfortable living depends on microclimate », op. cit., p. 9.

Ces considérations générales sur l'orientation sont considérées « toutes choses égales par ailleurs¹ » et reposent essentiellement sur la géométrie solaire. Bien qu'elle maximise les apports solaires au solstice d'hiver, Olgyay considère que l'orientation au sud peut être défavorable du point de vue des températures intérieures² : il recommande d'orienter la façade principale des constructions au sud-sud-est, voire complètement au sud-est dans les climats chauds et secs³. Cette déviation de l'orientation de la façade principale par rapport au sud est aussi justifiée pour l'architecte David Wright, qui considère que pour « un écart par rapport au vrai sud ou midi solaire de 15° vers l'est ou vers l'ouest, l'ensoleillement décroît seulement de 2 %⁴ ». Ayoub considère que l'orientation la plus avantageuse s'écarte de 25° par rapport au sud⁵.

Ces problèmes d'orientation se complexifient encore par la prise en compte des vents dominants et des brises pour les besoins de rafraîchissement, qui est présentée comme essentielle toute l'année dans de nombreux climats, et une partie de l'année dans les climats tempérés. Cependant, l'orientation favorable vis-à-vis du captage des vents ou des brises correspond rarement à celle déduite pour maximiser ou minimiser le rayonnement solaire⁶ : un premier antagonisme apparaît entre les exigences de ventilation et celles relatives au captage du rayonnement solaire, qui nécessite une résolution par un compromis. Pour une construction dans les zones tropicales humides, Dreyfus estime dans les cas « où l'orientation privilégiée du point de vue de la ventilation⁷ » est « défavorable du point de vue de la protection contre le rayonnement solaire⁸ », celle-ci « doit être choisie en fonction de la ventilation⁹. » Dès lors, « l'orientation privilégiée¹⁰ » des façades principales pourra être sensiblement déviée vers l'est ou l'ouest, selon les vents dominants. Son raisonnement est basé sur le fait qu'il « est toujours possible de protéger une façade contre le rayonnement solaire¹¹ », même pour les façades est et

1 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., p. 105.

2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 54.

3 *Ibid.*, p. 61.

4 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 85.

5 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 94.

6 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 229.

7 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 134.

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*, p. 312.

11 *Ibid.*, p. 134.

ouest, mais qu'il « ne sera jamais possible d'obliger le vent à traverser une construction qui aura été mal orientée¹. »

Ces antagonismes dans le choix de l'orientation ne concernent pas seulement les zones tropicales humides, mais l'ensemble des climats où les vents et les brises peuvent avoir un effet favorable sur le confort pendant tout ou partie de l'année. Dans les zones arides, Givoni recommande « de réduire les températures intérieures diurnes ² » et de minimiser l'échauffement solaire par une orientation des façades principales au nord ou au sud, mais il suggère de légèrement dévier de cette orientation si elle permet d'apporter « une ventilation pendant la fin de journée et la nuit³ ». Il estime que dans les climats méditerranéens maritimes « l'orientation par rapport au vent est plus importante⁴ » que pour le même type continental, bien qu'il soit également nécessaire de minimiser l'impact du rayonnement solaire dans ces deux climats régionaux. Nous reviendrons dans le chapitre consacré aux problèmes de ventilation naturelle sur les hypothèses de résolution de cet antagonisme, par déviation de l'orientation de la façade vers l'axe des vents et des brises favorables. Des problèmes analogues se posent dans les zones au climat tempéré, parfois avec plus de complexité dans la mesure où il est nécessaire de distinguer entre les vents défavorables et les brises favorables, bien que le plan et la morphologie de la construction puissent permettre de résoudre ces antagonismes⁵. Dans les climats froids ou exposés à des vents violents, les effets du vent sont systématiquement considérés comme une source de nuisances et de déperditions. Il est par exemple estimé qu'une construction soumise à « un vent de 40 km/h perd deux fois plus d'énergie qu'avec un vent de 8 km/h⁶. » L'orientation ainsi que la morphologie générale de la construction doivent alors être déduites dans le but de protéger la construction des vents dominants et de limiter la résistance à son écoulement.

II.1.1.4. Le contrôle climatique par la morphologie de la construction

Le choix d'une orientation implique des considérations relatives à la morphologie de la construction, qui est un paramètre qui relève également du microclimat. Victor et Aladár Olgyay

1 *Ibid.*

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 355.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 369.

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 90 ; E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 69.

6 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, « Prise de site », op. cit., n. p.

avaient établi dès 1954 des préconisations relatives aux plans des constructions selon l'orientation et pour différents climats¹. Victor Olgyay suggère une morphologie compacte, éventuellement sur plusieurs étages, en climat froid, un plan allongé sur l'axe est/ouest en climat tempéré ainsi que pour les climats chauds et humides, mais largement évidé afin de favoriser la ventilation transversale². En ce qui concerne les climats chauds et secs, il propose une construction compacte entourant un patio. Mazria reprend les résultats théoriques d'Olgyay pour qui « [la] forme optimale d'un corps de bâtiment correspond à celle qui lui permet de perdre le minimum de chaleur en hiver et d'en gagner un minimum en été³. » Il résume les principales conclusions d'Olgyay concernant la morphologie optimale d'une construction par le principe selon lequel « [le] carré n'est pas la forme optimale, quelle que soit la localisation de la construction⁴ » et qu'il « existe une forme optimale générale, donnant les meilleurs résultats dans chaque cas et pour tous les climats : c'est la forme allongée dans la direction est-ouest⁵. »

Poursuivant les recherches d'Olgyay, Mazria recommande également d'abaisser la construction « de sorte que son côté nord disparaisse sous la pente du toit⁶. » Ces recommandations seront parfois reprises, bien qu'en pratique l'exigence de compacité de la construction ait prévalu dans les climats tempérés, notamment pour limiter les effets défavorables des vents dominants. Certains architectes, comme Jean-Pierre Cordier en France, ont développé des recherches dans ce sens, estimant à juste titre que « plus le bâtiment est compact plus la surface d'échange du volume intérieur avec l'extérieur est réduite, moins il y aura des déperditions⁷. » Cette exigence de compacité est appuyée sur une critique des volumes trop complexes, multipliant inutilement les décrochements et les saillies. Exposés aux vents dominants, Cordier formule l'analogie selon laquelle les éléments saillants agissent comme les « ailettes de refroidissement⁸ » qu'on trouve sur les « cylindres de moteurs à refroidissement

1 A. Olgyay, V. Olgyay, « The Theory of Sol-Air Orientation », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, op. cit., p. 133-137.

2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 89.

3 E. Mazria, *The Passive Solar Energy Book: A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design*, Emmaus : Rodale Press, 1979, p. 291-292. Trad. *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, coll. (Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 67.

4 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, coll. (Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 67-69.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 73.

7 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, op. cit., n. p.

8 J. P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », n° 315, op. cit., p. 40.

par air¹ » et multiplient les déperditions thermiques de la construction. L'insistance sur le compromis à trouver entre les volumes internes et les contraintes climatiques externes apparaît chez d'autres architectes².

Dans la mesure où une morphologie compacte n'assure pas la protection contre les vents dominants mais consiste à dévier leur écoulement, les architectes ont développé l'usage d'espaces-tampons en l'absence de contrôle possible par des éléments environnementaux (brise-vent, haie...). Les espaces-tampons, dont on trouve des exemples dans l'architecture vernaculaire ou traditionnelle en zone rurale, sont des pièces disposées en bordure de la construction (garage, atelier...), face aux orientations les plus défavorables (nord, nord-ouest) afin d'assurer une protection adéquate. De par leur exposition au vent et l'abondante déperdition thermique qu'elles subissent en climats tempérés ou froids, ces pièces ne doivent pas être chauffées et ont pour rôle d'immobiliser une masse d'air entre l'extérieur et l'espace intérieur qui est éventuellement chauffé³. L'architecte français Michel Gerber a fait un usage abondant des espaces-tampons et la morphologie des habitations qu'il a conçues reflète l'utilisation de cet élément de protection. À propos d'une de ses constructions situées sur une crête particulièrement exposée aux vents violents, il explique avoir « ajouté un espace tampon nord en deux niveaux : un hangar en bas, un atelier en haut⁴ ». Il affirme que « les espaces ne sont pas chauffés mais protègent du vent du nord très fort qui attaque ici à peu près à la diagonale nord-ouest⁵ ». Pour les ouvertures en hauteur qui ne peuvent pas bénéficier de la protection de haies brise-vent, Gerber a également mis au point des déflecteurs placés devant les fenêtres, afin de limiter les déperditions thermiques par les vitrages exposés aux vents dominants⁶ (figure 139, p. 579).

Du choix d'une implantation favorable sur un site abrité jusqu'à la disposition d'espaces-tampons aux orientations les plus défavorables en passant par l'usage de brise-vent, on peut déceler la répétition à différentes échelles d'un même problème qui est d'assurer la protection contre les effets défavorables du vent. Puisqu'ils reposent sur le même principe qui consiste à dévier l'écoulement du vent, les brise-vent et les espaces-tampons peuvent être

1 *Ibid.*

2 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 62.

3 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 75-76.

4 M. Gerber, « Architecture bioclimatique dans les Corbières », p. 75 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

regroupés dans la même lignée technique. Dans la mesure où l'ensemble du contrôle climatique ne peut pas être réalisé à l'échelle du microclimat ou aux abords de la construction, ce contrôle est alors dévolu à la construction elle-même et aux éléments qui la composent. En ce sens, elle assure la fonction d'un « abri climatique¹ » et doit réaliser par elle-même la part du contrôle climatique qui n'a pas pu être effectuée à l'échelle du microclimat et aux abords de la construction. L'action d'un bâtiment sur le contrôle climatique commence au niveau des surfaces de la construction et dépend du choix des matériaux, de leur texture et de leur couleur, étant entendu que ces choix vont définir en première approximation le comportement thermique global de la construction exposée aux facteurs climatiques et microclimatiques extérieurs. Les considérations relatives aux matériaux et aux surfaces extérieures s'inscrivent dans la continuité de celles évoquées précédemment.

II.1.2. Le contrôle climatique par les surfaces et les matériaux

II.1.2.1. L'action de l'enveloppe construite et l'importance accordée aux phénomènes thermiques

Une fois envisagés le microclimat, les abords et la morphologie de la construction, l'approche graduelle du contrôle climatique nécessite d'étudier et de choisir les qualités physiques des surfaces et des matériaux composant la structure construite, à la lumière des facteurs climatiques et microclimatiques qu'il est nécessaire de contrôler et de réguler. L'ensemble de ces matériaux forme alors l'enveloppe construite, telle que la définit Givoni en 1969 :

« L'enveloppe d'un bâtiment sépare l'espace intérieur de l'environnement extérieur et par là même modifie ou supprime les effets directs des paramètres climatiques tels que la température ambiante extérieure, l'humidité, le vent, le rayonnement solaire, la pluie, la neige, etc. Cette enveloppe est traditionnellement composée de deux types de matériaux, opaques et transparents, bien que l'on utilise parfois aussi des matériaux translucides². »

1 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Paris : Berger-Levrault, (coll. Architectures), 1982, p. 7.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat, op. cit.*, p. 139.

La notion d'enveloppe construite a été structurante pour le développement des techniques d'isolation et des matériaux isolants au cours du XX^e siècle¹, mais elle désigne plus généralement chez Givoni l'ensemble des propriétés physiques qui caractérise la paroi d'une construction. Nous aborderons dans ce chapitre les recommandations et les recherches expérimentales sur les matériaux opaques et nous aborderons les matériaux transparents dans le chapitre suivant.

En ce qui concerne les matériaux opaques, l'essentiel des connaissances relatives à leurs propriétés physiques relève du champ de la thermique et correspond aux propriétés de conduction, qui dépendent de la nature du matériau, et aux propriétés de convection et de rayonnement, qui dépendent de ses surfaces et de leur environnement, les phénomènes de changement de phase (évaporation, condensation) étant pris en compte mais rarement quantifiés. La conduction, la convection et le rayonnement constituent les trois phénomènes de propagation de la chaleur systématiquement rappelés dans les manuels relatifs à la conception bioclimatique ou solaire passive². Si la majorité des connaissances sur la propagation et la transmission de la chaleur relève des sciences et ont été effectivement développées par des physiciens, comme Joseph Fourier³ ou des ingénieurs entre le XIX^e et le XX^e siècle, de nombreuses expérimentations sur les propriétés thermiques des matériaux ont été menées par des architectes associés à la conception bioclimatique de manière informelle ou au sein d'institutions officielles, notamment par Givoni au Centre de Recherche du Bâtiment au Technion situé à Haïfa, en Israël⁴. D'autres recherches théoriques et expérimentales dans ce domaine proviennent des architectes et ingénieurs en zone tropicale, ces recherches ayant été par la suite intégrées à la conception bioclimatique au début des années 1970.

Les principales propriétés thermiques des matériaux présentées dans les manuels pour quantifier les apports et les déperditions d'une construction afin d'en anticiper le comportement thermique sont les suivants :

- la conductivité (notée k ou λ) et la résistance thermique (notée $1/k$ ou $1/\lambda$) des matériaux ;

1 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 37-38.

2 Voir : D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 65-68.

3 G. Bachelard, *Étude sur l'évolution d'un problème de physique : la propagation thermique dans les solides*, [1ère éd. 1927], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque des textes philosophiques), 2016, p. 33-72.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 17.

- les facteurs d'absorption (absorptivité), de réflexion (albédo) et d'émission (émissivité) des surfaces vis-à-vis du rayonnement électromagnétique, pour une longueur d'onde ou une gamme de longueurs d'onde donnée ;
- le coefficient de convection des surfaces qui dépend de la vitesse de l'air ;
- la capacité thermique des matériaux, anciennement nommée « capacité calorifique¹ ».

Ces propriétés thermiques entrent dans de nombreux calculs, souvent complexes mais en pratique rarement réalisés manuellement. Nous avons déjà mentionné le calcul de la température fictive au soleil développé par Mackey et Wright Jr. dans les années 1940 et repris par Dreyfus par la suite². L'intérêt du calcul de la température fictive au soleil est qu'il met en évidence « l'ensemble des phénomènes d'échange de chaleur intervenant sur les faces extérieures des parois d'une construction³ » et permet de synthétiser à la fois les facteurs climatiques significatifs et les propriétés thermiques principales des surfaces et des matériaux. Ce calcul prend en compte de nombreux paramètres comme la température de l'air extérieur, « la fraction de rayonnement solaire absorbée par la surface⁴ » et « l'échange de chaleur radiante de grande longueur d'onde avec l'environnement⁵ ». Une partie de ses propriétés thermiques sont intégrées à l'équation sous la forme de coefficients afin de limiter la complexité de ce calcul⁶. L'équation pour le calcul de la température fictive au soleil a été réécrite une première fois par Dreyfus en 1960 et a encore été simplifiée par la suite par Givoni⁷.

La diffusion de la notion de température fictive au soleil est un bon exemple de la manière avec laquelle les architectes se sont approprié certains résultats obtenus par les ingénieurs par des calculs ou des expérimentations complexes qu'ils n'étaient pas en mesure de reproduire. Le concept de température fictive au soleil s'est diffusé indépendamment de la formule mise au point par Mackey et Wright Jr. et simplifiée par Dreyfus puis Givoni. Sans mentionner cette formule, « l'effet air-soleil⁸ » est ainsi présenté dans certains manuels afin de mettre en évidence l'influence du rayonnement solaire sur la température des surfaces et donc sur le gradient thermique entre l'extérieur et l'intérieur d'une construction. Le calcul est alors

1 *Ibid.*, p. 121.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 131-134.

3 *Ibid.*, p. 132.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 230.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 231.

7 *Ibid.*

8 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 118.

relégué derrière le phénomène qualitatif qu'il explique : « l'effet air-soleil » sert à illustrer la tendance à l'échauffement des éléments de constructions exposés au rayonnement solaire. L'amélioration des connaissances apportées par les physiciens ou les ingénieurs a été traduite en termes qualitatifs par les architectes, qui ont interprété ces connaissances comme la mise en évidence de certains effets thermiques indispensables à anticiper.

II.1.2.2. La connaissance des effets thermiques : le cas de la température des surfaces

On peut généraliser l'observation précédente et montrer que le développement des connaissances et des techniques relatives au contrôle climatique au niveau des surfaces et des matériaux s'est développé comme une « science d'effets¹ », en reprenant la formule de Gaston Bachelard. « L'effet air-soleil », illustré par l'échauffement d'une surface sombre exposée au rayonnement solaire est un phénomène intuitivement connu. Cet effet commun a fait l'objet de nombreuses expérimentations, communiquées sous la forme de graphiques, de diagrammes ou de données numériques, afin que ce phénomène soit mieux pris en compte et compris par les concepteurs en vue du contrôle climatique. Les résultats les plus aboutis sur l'échauffement des surfaces d'une construction en fonction de leurs couleurs proviennent des recherches menées par Givoni et ses collaborateurs au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa, au nord de l'Israël et sont présentés dans l'ouvrage *Man, Climate and Architecture*². Givoni relate par exemple une expérimentation pour mesurer les températures de surfaces grises et blanches orientées au nord, sud, est et ouest. Les résultats de cette expérimentation montrent « des différences dépassant 23 °C dans les températures de murs gris sous diverses orientations, tandis que pour des murs badigeonnés à la chaux, les différences étaient toutes inférieures à 3 °C³. » À partir de ces résultats, Givoni propose des formules empiriques qui ont été déduites du relevé des variations de température. Ces équations ont la même forme que les équations simplifiées permettant de calculer la température fictive au soleil évoquées précédemment, à l'exception de certaines valeurs qui ont été supposées constantes pour simplifier encore le calcul, comme les pertes dues au rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel⁴.

1 G. Bachelard, *Le Pluralisme cohérent de la chimie moderne*, [1ère éd. 1932], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque de Philosophie Contemporaine), 1973, p. 229.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 233.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 235.

Les résultats expérimentaux obtenus par Givoni ne concernent qu'une partie des recherches menées dans la seconde moitié du XX^e siècle sur le comportement thermique des surfaces par différents physiciens et ingénieurs. Elles visaient à mettre au point des surfaces dites « sélectives¹ », qui sont des surfaces métalliques généralement recouvertes d'oxydes afin d'en modifier le comportement thermique et limiter leur émissivité, par exemple pour atteindre de plus hautes températures dans les capteurs solaires afin d'améliorer leur rendement. Les recherches sur cet effet de sélectivité thermique des surfaces oxydées ont été initiées par le physicien israélien Harry Z. Tabor (1917-2015) au milieu des années 1950². Elles ont été reprises par certains ingénieurs importants à l'origine du développement des techniques solaires passives comme Félix Trombe. Mais c'est notamment l'américain John I. Yellott qui a contribué à diffuser les découvertes faites dans ce domaine dans le champ de l'architecture.

Initialement spécialisé dans la mécanique, Yellott fut dans la seconde partie de sa carrière un acteur important pour la promotion et le développement international des techniques solaires passives de chauffage et de rafraîchissement des habitations. Engagé dans le développement des applications domestiques de l'énergie solaire depuis le milieu des années 1950, Yellott publie en 1966 un article important sur le comportement des matériaux exposés au rayonnement solaire intitulé « How Materials React to Solar Energy³ » (« Comment les matériaux réagissent à l'énergie solaire »). Ce bref article, initialement adressé à des architectes, explique les mécanismes physiques à l'origine des différences de chaleur sensible des surfaces exposées au rayonnement solaire et sera abondamment diffusé. Si ces mécanismes de « sélectivité thermique⁴ » des surfaces sont déjà bien connus des physiciens au début des années 1960, des ingénieurs comme Ayoub estiment que les recherches dans ce domaine sont longtemps restées « confinées dans les domaines de la physique sans objectif architectural⁵ ». Cet article de Yellott vise précisément à introduire dans le champ de l'architecture les

-
- 1 H. Tabor, « Selective radiation. I. Wavelength discrimination. II. Wavefront discrimination », *Bulletin of the Research Council of Israel*, 5A, (2), janvier 1956, p. 119-134. Voir également : J. A. Duffie, « New Materials in Solar Energy Utilization », p. 493-50 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 4, Solar Energy : I, New York : United Nations, 1964. (Archives Nations Unies – en ligne)
 - 2 D. Behrman, *Solar Energy. The Awakening Science*, [1^{ère} éd. 1976, 2^e éd. rev. et augm. 1979], Londres : Routledge & Kegan Paul, 1979, p. 175-176.
 - 3 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *Architectural Record*, mai 1966, p. 196-198.
 - 4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 118.
 - 5 *Ibid.*, p. 71.

connaissances acquises en physique sur le comportement thermique des surfaces et sur les échanges radiatifs.

Cet article est illustré de quelques schémas, dont un diagramme particulièrement important qui synthétise les principales propriétés thermiques de nombreux matériaux (*figure 30*), dont il existe une traduction en français (*figure 31*). L'intérêt de ce diagramme est qu'il permet de visualiser « le facteur de réflexion » ou albédo de la surface du matériau, le « facteur d'émission » ou émissivité, qui désigne la quantité d'énergie rayonnée par la surface du matériau dans l'infrarouge lointain, et son « facteur d'absorption » ou absorptivité, qui quantifie la capacité du matériau à capter l'énergie transmise pour la gamme de longueurs d'onde du rayonnement solaire¹. On y distingue quatre types de comportements thermiques pour les matériaux exposés au rayonnement solaire, répartis en deux catégories. Dans la première catégorie, on trouve les surfaces réfléchissantes et absorbantes, avec les « matériaux réflecteurs » comme l'aluminium poli, qui ont un facteur d'émission et d'absorption faibles mais un albédo élevé, et les « corps noirs », comme l'asphalte ou le sable humide, qui à l'inverse ont un albédo faible mais un facteur d'émission et d'absorption élevés.

La seconde catégorie regroupe les surfaces sélectives pour lesquelles les facteurs d'absorption et d'émission (nécessairement égaux pour une même longueur d'onde en vertu de la loi du rayonnement de Kirchhoff²) varient entre la gamme des longueurs d'onde visibles et infrarouges. Les « matériaux sélectifs froids » comme la chaux appartiennent à cette catégorie, puisqu'ils ont un albédo élevé et un facteur d'absorption faible pour le rayonnement visible mais un facteur d'émission élevé dans l'infrarouge, ce qui favorise leur refroidissement par rayonnement de grande longueur d'onde. On trouve également dans cette catégorie les « matériaux sélectifs chauds », qui sont des métaux spécialement traités, ayant un albédo faible et un facteur d'absorption élevé pour le rayonnement visible mais un facteur d'émission faible dans l'infrarouge³. Ce dernier type de matériau a donc « une forte absorption aux courtes longueurs d'onde et une faible émissivité aux longueurs d'onde plus longue⁴ » et possède les propriétés d'un « piège à énergie⁵ » selon l'expression de Givoni. Les recherches sur les surfaces sélectives concernaient cette dernière catégorie de matériaux conçus pour piéger l'énergie solaire et atteindre des températures élevées. Les surfaces mises au point par Tabor

1 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 61.

2 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, op. cit., p. 129.

3 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 61.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 200.

5 *Ibid.*

étaient des « matériaux sélectifs chauds » presque parfaits¹. L'approche des surfaces selon leur sélectivité thermique était nouvelle : dans les années 1940, avant que les recherches sur le captage de l'énergie solaire se généralisent, l'étude du comportement thermique des surfaces se limitait à leur facteur de réflexion et leurs propriétés sélectives n'étaient pas consciemment exploitées².

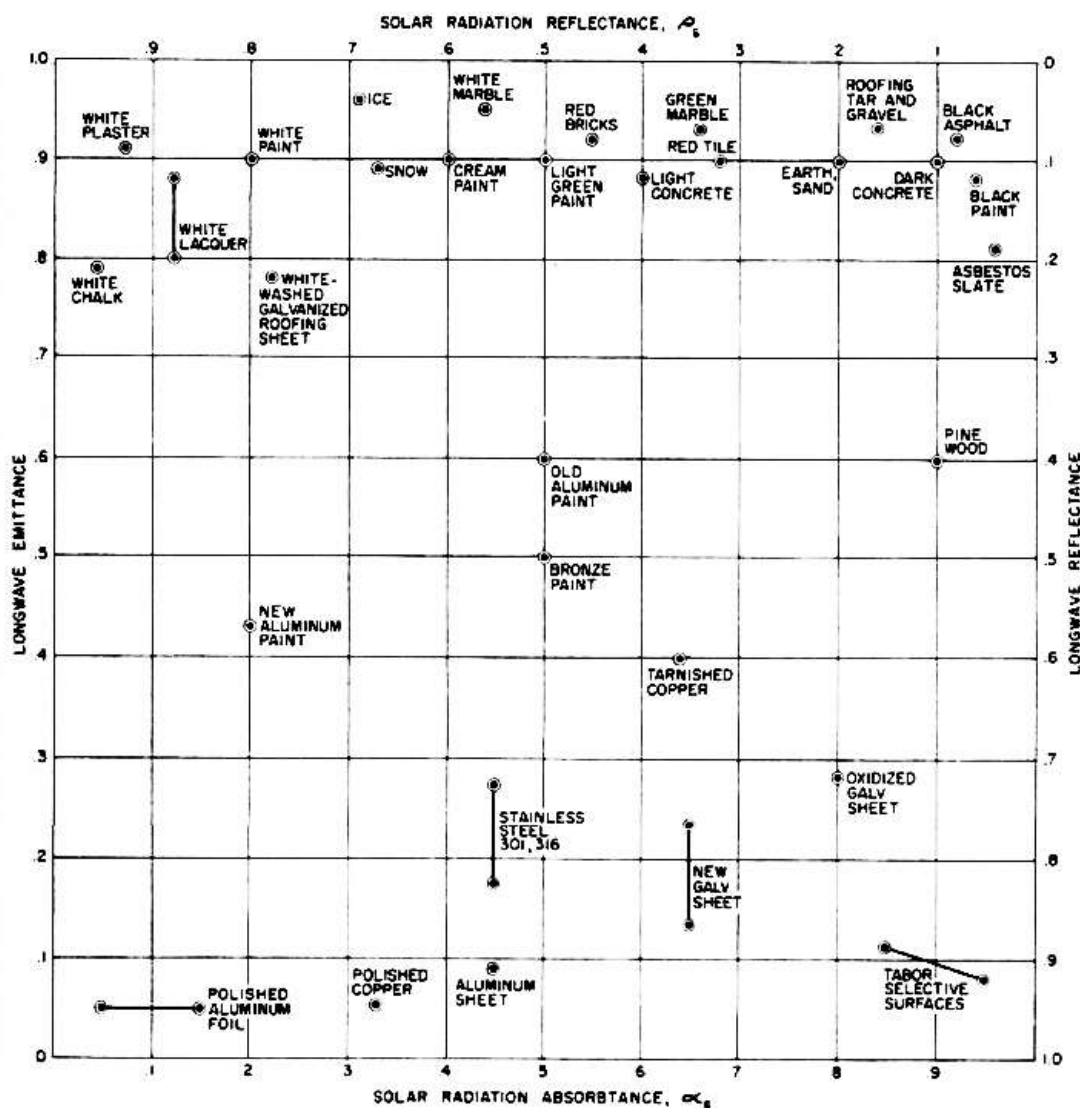


Figure 30 : Facteurs d'absorption, d'émission et de réflexion au rayonnement visible et infrarouge de différents matériaux.

(J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *Architectural Record*, mai 1966, p. 196)

1 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *op. cit.*, p. 196.

2 M. Dérivé, « Le Comportement des matériaux sous les rayons invisibles du soleil », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », *op. cit.*, p. 183-185.

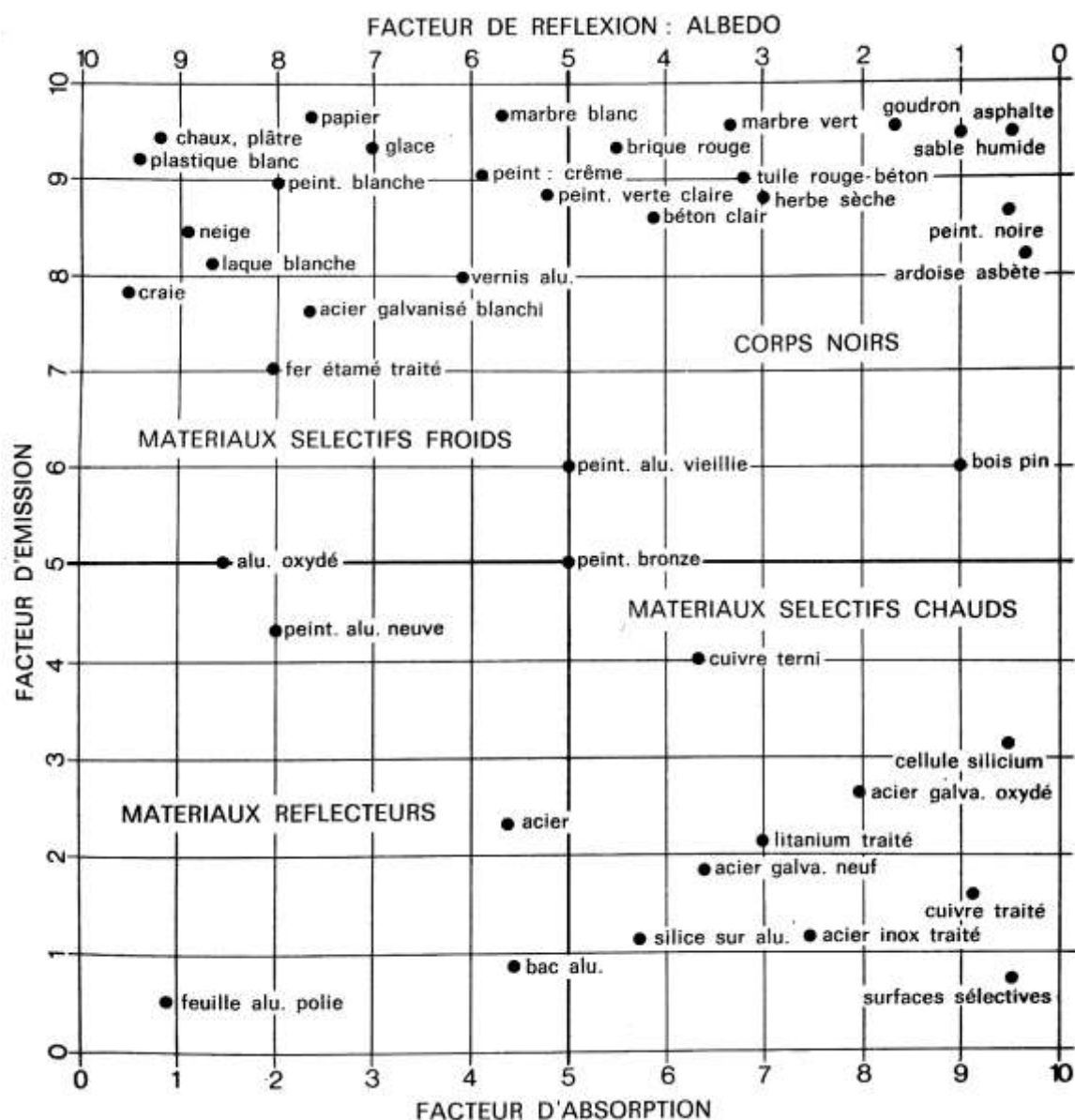


Figure 31 : Traduction du diagramme de Yellott en français et classification des matériaux.
(J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 61)

Cette catégorisation des matériaux en fonction de l'albédo, de l'émissivité et de l'absorptivité de leurs surfaces est particulièrement importante puisqu'elle considère l'ensemble des phénomènes qui régissent les échanges radiatifs et qui sont à l'origine des différences de chaleur sensible entre surfaces. Yellott affirme que son diagramme met en évidence des propriétés thermiques contre-intuitives, qui expliquent pourquoi « de nombreux matériaux dont on pourrait s'attendre à ce qu'il soit de bons "réflecteurs" du soleil ne sont pas

aussi bons que d'autres matériaux généralement considérés comme de mauvais réflecteurs¹. » Si l'article de Yellott a été particulièrement diffusé à partir de 1966, ce diagramme sera amené à circuler indépendamment de celui-ci et plus largement². En France, il est d'abord traduit une première fois en 1971 par les architectes du Groupe A.B.C.³, puis traduit une nouvelle fois par Michel Le Chapellier et diffusé dans une revue consacrée à l'énergie solaire en 1977⁴. Il sera repris par Jean-Louis Izard, reproduit dans différents ouvrages et largement diffusé⁵ (figure 31).

Les travaux de Yellott confirment les résultats expérimentaux obtenus indépendamment par Dreyfus puis par Givoni sur l'intérêt des surfaces peintes avec un badigeon de chaux dans les climats chauds et secs⁶. Ce diagramme confirme également les conclusions de Givoni sur la couleur, qu'il estime être un mauvais indicateur du comportement thermique global des matériaux :

« La couleur d'une surface donne une bonne indication de son facteur d'absorption pour le rayonnement solaire. Le facteur d'absorption décroît, et le facteur de réflexion croît avec la clarté de la couleur. Mais la couleur n'est pas une indication du comportement d'une surface vis-à-vis des rayonnements de grande longueur d'onde⁷. »

C'est ainsi que certaines surfaces claires et apparemment réfléchissantes comme l'aluminium poli ne rayonnent que très faiblement dans l'infrarouge lointain, ce qui limite considérablement le refroidissement de leur surface en période nocturne. Cette caractéristique fait que l'aluminium tient « une place à part dans les matériaux de construction, à cause de son émissivité faible⁸ » et que « sa température superficielle tendra à être plus élevée que celle d'une surface recouverte d'un badigeon à la chaux⁹. » De nuit, une surface en aluminium peut donc être à une température plus élevée que des surfaces peintes en blanc ou en noir, qui possèdent toutes deux une émissivité élevée, comme l'explique Givoni :

-
- 1 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *op. cit.*, p. 196. Traduction personnelle, citation originale : « many materials that one might expect to be good "reflectors" of the sun are not as good as other materials usually assumed to be poor reflectors. »
 - 2 Entretien avec Jean-Louis Izard, le 07/10/2019 à Marseille.
 - 3 P. Chiniara, J.-L. Izard, J.-P Long., *Étude d'une maison solaire*, École d'Architecture Marseille-Luminy/Groupe A.B.C., mai 1971, p. 14. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 4 P. Le Chapellier (dir.), *L'Affranchi*, « Énergie solaire et habitat », *op. cit.*, p. 23.
 - 5 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 22 ; J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 61.
 - 6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 246.
 - 7 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 125.
 - 8 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 23.
 - 9 *Ibid.*, p. 131.

« [Des] peintures noires et blanches possèdent des facteurs d'absorption du rayonnement solaire totalement différents et une surface noire s'échauffe beaucoup plus pendant une exposition au soleil. Mais les facteurs d'émission aux grandes longueurs d'onde des deux couleurs sont les mêmes et cela fait qu'elles se refroidissent de la même façon la nuit lorsqu'elles rayonnent vers le ciel¹. »

L'émissivité élevée de certaines surfaces sera exploitée dans différents systèmes de rafraîchissement par rayonnement nocturne dans l'infrarouge lointain imaginé par Givoni que nous évoquerons par la suite.

Cependant, la surface d'un matériau n'est pas inaltérable, d'autant plus si elle est directement exposée à des facteurs climatiques périodiques intenses comme le rayonnement solaire direct ou des précipitations. Ces altérations modifient les propriétés thermiques des surfaces : l'émissivité de l'aluminium poli, par exemple, augmente avec son oxydation². En ce qui concerne les surfaces recouvertes de chaux, Dreyfus estime qu'un « badigeon frais n'absorbe que 15 % environ du rayonnement solaire³ », ce qui correspond à un coefficient d'absorption de 0,15, mais qu'un « badigeon ancien en absorbe beaucoup plus⁴. » À défaut d'un entretien régulier, il recommande « pour des calculs de ne pas prendre un coefficient inférieur à 0,50, à moins que l'on ne soit certain que le badigeon sera refait à intervalles suffisamment rapprochés⁵ ». Contrairement à Dreyfus, le chimiste Farrington Daniels considère que l'altération de la chaux peut être thermiquement profitable dans certains climats tempérés. Il relate l'exemple emprunté à Tabor de régions en Israël où « les toits sont blanchis à la chaux au printemps pour refléter les rayons du soleil et garder la maison fraîche en été⁶ », tandis qu'à l'automne « les pluies lavent la chaux, laissant une surface plus sombre sur le toit qui, en absorbant la lumière du soleil, contribue à chauffer la maison en hiver⁷. »

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 125.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 58-59.

3 *Ibid.*, p. 26.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 130.

6 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, New Haven/Londres : Yale University Press, 1964, p. 164.

7 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « in Israel and similar areas of moderate climates the roofs are whitewashed in the spring to reflect the sun's rays and keep the house cool in summer. In the fall the rains wash off the whitewash, leaving a darker surface on the roof which by absorbing the sunlight contributes to heating the house in winter. »

Les résultats relatifs au comportement thermique des surfaces ont encore été complexifiés à la suite de Yellott et Givoni par d'autres travaux, issus d'autres chercheurs ayant contribué au développement de la conception solaire passive. C'est le cas du chimiste Harold R. Hay (1909-2009) qui fut un des principaux acteurs du développement des techniques solaires passives aux États-Unis, qui a collaboré avec Yellott et sur lequel nous aurons l'occasion de revenir en détail dans les chapitres consacrés aux techniques de rafraîchissement. En 1973, Harold Hay présente au congrès *Le Soleil au service l'homme* à Paris une communication intitulée « Solar Radiation and Color Adaptation¹ » (« Rayonnement solaire et adaptation de la couleur »). Il affirme l'idée contre-intuitive qu'il existe des surfaces « noires froides » (« *cool black* ») et « blanches chaudes » (« *warm white* ») et que les résultats relatifs à la température en fonction de l'absorptivité doivent faire intervenir la porosité et la translucidité de cette surface². Reprenant les observations de Farrington Daniels, il prend pour exemple du *cool black* les pratiques agricoles sur les sols sombres composés de cendres basaltiques issues d'éruptions volcaniques, qui limitent l'évaporation, conservent l'humidité du sol et condensent l'humidité de l'air³. En ce qui concerne le *warm white*, il cite le pelage clair de certains animaux, qui permet paradoxalement de réchauffer leur peau en transmettant le rayonnement solaire jusqu'à celle-ci, tout en produisant un effet de serre au voisinage de la peau⁴.

L'idée popularisée par Hay selon laquelle il existe des surfaces noires et froides, ainsi que des surfaces blanches et chaudes a marqué de nombreux architectes et ingénieurs contemporains de Hay⁵. La prise en compte de la texture et de la porosité des surfaces complexifie encore l'estimation du comportement thermique des matériaux exposés aux facteurs climatiques, d'autant plus si l'on fait intervenir l'humidité, la capillarité ou les changements de phase qui peuvent aussi intervenir⁶. La mise en évidence de l'importance de ces phénomènes donne une idée des possibilités offertes au concepteur qui souhaite réaliser un contrôle climatique au niveau de la surface d'une construction. L'exemple des sols volcaniques poreux utilisé par Hay et repris à Daniels résonne avec les travaux de Geiger en

1 H. R. Hay, « « Solar Radiation and Color Adaptation », p. B.2-1-B.2-11 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, « The Sun and Life », Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne)

2 *Ibid.*, p. B.2-2.

3 *Ibid.*, p. B.2-3.

4 *Ibid.*, p. B.2-4.

5 K. Haggard, « A clear sky story on the evolution of passive solar design. The source and multiple applications of Harold Hay's roof pond system », p. 23 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.

6 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 184-188.

microclimatologie. De la même manière que Geiger explique les phénomènes microclimatiques à partir des échanges radiatifs près du sol, Hay et Yellott décrivent le comportement thermique des surfaces à partir de ces mêmes échanges radiatifs. En ce sens, la surface extérieure d'une construction obéit aux mêmes lois physiques qu'un microclimat.

II.1.2.3. De la surface à l'épaisseur : la prise en compte des phénomènes thermiques en régime périodique ou variable

Les considérations précédentes relatives aux choix des surfaces et à leur traitement sont indissociables des qualités propres à l'épaisseur des matériaux qui forment la paroi d'une construction. Pour visualiser la progression de la chaleur à partir d'une surface plus chaude, Givoni propose de diviser mentalement un matériau de construction en plusieurs tranches de même largeur : suivant le gradient de température, le « flux de chaleur cause dans chaque tranche une élévation de température et la chaleur utilisée à cet effet y est stockée¹ », tandis que la « chaleur en excès est par la suite transmise à la tranche suivante, qui est plus froide². » Cette image illustre la propagation du flux de chaleur qui se poursuit tant qu'il existe un gradient de température dans l'épaisseur du matériau et dont la vitesse dépend en première approximation de la nature de ce matériau. On distingue généralement les matériaux dits isolants et les matériaux dits massifs, en fonction de leurs caractéristiques par rapport à la progression de ce flux. Cette distinction est bien antérieure à la période que nous considérons, puisqu'on doit au physicien français Eugène Péclet la définition des matériaux « mauvais conducteur de la chaleur³ » à partir de 1829 et que les recherches sur les matériaux isolants ont été particulièrement développées dès le début du XX^e siècle aux États-Unis⁴. Nous aborderons seulement les évolutions qui ont été introduites dans la compréhension des matériaux isolants et massifs durant la période que nous considérons.

La caractéristique principale d'un matériau isolant est de retarder la transmission du flux de chaleur dans son épaisseur en s'échauffant en surface. Un matériau isolant est généralement léger et poreux, ses propriétés isolantes étant « fonction du nombre de molécules d'air, c'est-à-

1 *Ibid.*, p. 140.

2 *Ibid.*

3 E. Péclet, *Traité de la chaleur considérée dans ses applications, Tome III*, [4^eme éd.], Paris : G. Masson, 1878, p. 1 ; J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 70-73 ; K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 65-66.

4 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 65-70.

dire de la dimension réduite des pores¹ » et non « du volume total d'air par unité de volume du matériau² ». Les calculs des ingénieurs comme Dreyfus montrent qu'un matériau ou une surface réalise une isolation thermique à partir du moment où elle immobilise une certaine quantité d'air ou de gaz : la résistance superficielle des surfaces, qui dépend de leur rugosité, constitue un premier niveau d'isolation thermique³. On peut donc définir un matériau isolant comme un certain usage de l'air ou d'un gaz. De par sa fonction dans les isolants, mais également dans les vides d'air employés dans les doubles parois de certaines constructions en zone tropicale, Givoni a proposé de considérer l'air « comme un matériau de construction⁴ » à part entière. Ce point de vue nous paraît original puisqu'il permet d'insister sur les fonctionnalités antagonistes de l'air dans les constructions bioclimatiques, qui peut assurer la fonction d'isolant thermique dans certains éléments s'il est immobilisé, mais peut aussi avoir la fonction de fluide caloporteur dans d'autres éléments s'il est mobile, afin de transférer la chaleur d'un point à un autre.

Si en ce sens les matériaux isolants ne diffèrent des matériaux massifs que par leur porosité et leur fonction, les ingénieurs et les architectes ont mis en évidence pendant la période qui nous intéresse le fait que les méthodes de calcul pour anticiper le comportement thermique de chacun de ces types de matériaux étaient en revanche radicalement différentes. En effet, à l'époque un matériau isolant est caractérisé par sa conductivité thermique, qui détermine « le flux de chaleur qui, par unité de temps, traverse une unité d'épaisseur d'une unité de surface de matériau soumis à un gradient de température égal à l'unité⁵. » Les formules de calcul de la conduction et de la résistance thermique sont analogues aux formules utilisées en électricité et il existe « une grande analogie entre la notion de conductivité thermique et celle de conductibilité électrique⁶ ». En ce qui concerne plus spécifiquement les matériaux de construction, la conductance thermique est présentée comme une propriété fondamentale : celle-ci prend en compte l'épaisseur de l'élément de construction, ainsi que la résistance superficielle des surfaces intérieures et extérieures de l'élément, et s'exprime comme l'inverse de la résistance thermique⁷. Étant donnée leur importante porosité, la « conductivité thermique

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 115.

2 *Ibid.*

3 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 70.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 131.

5 *Ibid.*, p. 122.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 48.

7 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 123.

des matériaux les plus isolants¹ » est présentée comme « 30 fois plus faible que celle des autres matériaux² » par Dreyfus. À titre de comparaison, il affirme qu'une « épaisseur de 3 ou 4 cm de laine de verre ou de panneaux légers de fibres de bois a le même pouvoir isolant que 1 mètre de béton³. »

Mais Dreyfus rappelle que ces valeurs sont données pour un calcul thermique en régime permanent, qui considère que les températures intérieures et extérieures sont constantes, en faisant abstraction de leur éventuelle variation sous l'action des facteurs climatiques et du rôle de l'inertie thermique, qui sont en revanche pris en compte en régime périodique ou variable⁴. Il explique en ces termes la différence entre l'étude en régime permanent et en régime périodique :

« Lorsque les températures sur les faces externe et interne d'une paroi sont maintenues indéfiniment à des valeurs données, on dit qu'on se trouve en régime permanent. La donnée essentielle en ce qui concerne les phénomènes de transmission de la chaleur est alors la conductivité, ou d'une façon plus générale, la conductance. Dans ces conditions 4 cm de laine de verre par exemple, sont équivalents à 1 m de béton. [...] Dans la pratique, cependant, les phénomènes de transmission de chaleur à travers les parois des constructions sont périodiques. Lorsqu'une onde de chaleur périodique se transmet de la face externe à la face interne d'une paroi intérieure, elle le fait avec retard en s'amortissant⁵. »

Le calcul en régime permanent est justifié dans la mesure où les matériaux isolants sont employés lorsqu'il existe une importante différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une construction. C'est le cas dans les climats froids et à certaines périodes de l'année dans les climats tempérés où Givoni fait remarquer qu'en hiver « le flux de chaleur des bâtiments chauffés en continu approche le régime permanent et la résistance thermique est le principal facteur, bien qu'il ne soit pas le seul, qui soit déterminant pour les conditions intérieures⁶. » Il s'établit également un régime permanent dans les climats chauds lorsque le bâtiment est climatisé par conditionnement mécanique de l'air.

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 49.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 24-25.

5 *Ibid.*

6 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 144.

Mais les travaux sur l'architecture tropicale évoqués précédemment avaient mis en évidence les limites de l'étude en régime permanent. Ces limites avaient déjà été repérées par les ingénieurs français André Nessi et Léon Nisolle dans les années 1930¹ et par les travaux des ingénieurs américains Charles Osborn Mackey et Lawrence T. Wright Jr.² abondamment diffusés et commentés. Leur article de 1943, consacré à une méthode de calcul en régime variable³, a été très largement commenté dans différents travaux sur l'architecture tropicale⁴, et a été suivi de nombreux autres articles sur les calculs en régime périodique⁵. Mackey et Wright Jr. considèrent dans leur important article de 1943 qu'un « flux constant de chaleur à travers les matériaux de construction est l'exception plutôt que la règle⁶ » et qu'il est « fondamentalement incorrect de sélectionner un matériau pour un mur de bâtiment sur la base de ses propriétés thermiques à flux constant⁷. » Leurs équations, à base de séries de Fourier, regroupent une suite de calculs heure par heure, prenant en compte pour chaque horaire une dizaine de facteurs dont la température extérieure, le rayonnement solaire, les mouvements de l'air au niveau des surfaces extérieures et intérieures, ainsi que différentes propriétés thermiques du matériau, moyennant quelques simplifications⁸. En pratique, la complexité de ces calculs heure par heure les rend difficilement réalisables manuellement et ils ne seront généralisés qu'avec l'introduction des ordinateurs dans le milieu des années 1970, pour la réalisation de simulations thermiques dynamiques.

À partir des recherches de Mackey et Wright Jr. et des travaux sur l'architecture tropicale, l'intérêt pour l'étude des phénomènes thermiques en régime périodique ou variable s'est par la suite propagé dans les recherches relatives aux techniques solaires passives. Dans l'essentiel des travaux sur la conception bioclimatique et solaire passive, l'existence d'un régime thermique permanent constitue l'exception plutôt que la règle⁹. En ce qui concerne le régime permanent, l'architecte français Jean-Louis Izard considère qu'en « conception

1 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 127 ; K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 106.

2 *Ibid.*

3 C. O. Mackey, L. T. Wright Jr., « Summer Comfort Factors as Influenced by Thermal Properties of Building Materials », New York : John B. Pierce Foundation, (coll. Educational Series), 1943, 27 p.

4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 83.

5 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 106.

6 C. O. Mackey, L. T. Wright Jr., « Summer Comfort Factors as Influenced by Thermal Properties of Building Materials », op. cit., p. 7.

7 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Steady flow of heat through building materials is the exception rather than the rule. [...] It is basically incorrect to select a material for a building wall on the basis of its steady flow thermal properties. »

8 *Ibid.*, p. 8.

9 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 60.

bioclimatique cette hypothèse est insuffisante¹ » et estime « nécessaire d'avoir recours au régime variable qui, comme son nom l'indique, tient compte du fait que les valeurs des paramètres climatiques agissants varient dans la journée² ».

La critique des simplifications introduites par le régime permanent justifie une critique plus générale de l'intérêt de l'isolation thermique pour tous les climats. Izard remet en cause dès le milieu des années 1970 la prise en compte exclusive des déperditions par la première réglementation thermique française, qui encourage l'isolation des constructions et néglige les apports solaires³. Des ingénieurs comme Ayoub affirment que « considérée isolément⁴ », la propriété d'isolation « ne correspond à aucune réalité dans la plupart des climats chauds⁵ », tandis que d'autres ingénieurs, comme Gilles Olive, soulignent les « conséquences néfastes⁶ » du calcul en régime permanent, même dans les climats tempérés, qui pousse « à la construction de structures très isolantes⁷ ». L'historien de l'architecture Kiel Moe a récemment mis en évidence le fait que la promotion des matériaux isolants et de l'isolation thermique dans la construction au XX^e siècle s'était appuyée sur une généralisation abusive du régime permanent, basée sur une idéologie diffusée par l'industrie frigorifique qui assimilait un bâtiment à un système totalement isolé, imperméable et réfrigéré⁸. Cette histoire tend à valoriser l'intérêt précoce des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique et solaire passive pour la prise en compte des échanges thermiques en régime périodique ou variable⁹. Elle montre que les premiers travaux des ingénieurs sur le régime périodique dus à Nessi et Nisolle en France et à Mackey et Wright Jr. aux États-Unis ont souvent été ignorés ou considérablement simplifiés par la suite¹⁰.

1 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 16.

2 *Ibid.*

3 J.-L. Izard, « Paramètres à prendre en considération dans l'étude d'un projet de construction. Échanges thermiques entre les bâtiments et leur environnement : résumé du problème », II.2 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement. Compte-rendu du colloque, Lyon 6-8 avril 1976*, s. l., Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, 1980. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 71.

5 *Ibid.*

6 G. Olive, « Hygrothermique des enveloppes », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », n° 315, juin-juillet 1977, p. 51.

7 *Ibid.*

8 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, *op. cit.*, p. 37-39.

9 *Ibid.*, p. 72-73.

10 *Ibid.*, p. 105-107.

L'étude des phénomènes thermiques en régime périodique ou variable permet d'intégrer une propriété essentielle des matériaux dits massifs, qui possèdent une importante capacité thermique. Cette grandeur désigne « la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de volume du mur, ou d'une unité de sa surface, de 1 degré¹. » La capacité thermique d'un matériau intervient dans ses caractéristiques de déphasage et d'amortissement de l'onde de chaleur en régime thermique périodique ou variable, ces propriétés permettant de déterminer l'inertie thermique du matériau. L'inertie thermique est présentée comme la « grandeur introduisant un retard dans la transmission d'un flux de chaleur par une paroi² », ce « retard » étant nommé déphasage thermique. Cette propriété essentielle a été valorisée par certains ingénieurs et architectes comme le français Robert Leroux dès le début des années 1930 et a été particulièrement étudiée en architecture tropicale³. D'après les travaux de Mackey et Wright Jr. et ceux de Dreyfus, le calcul du déphasage thermique et de l'amortissement de l'onde de chaleur d'un matériau massif est fonction de la diffusivité thermique (a) de ce matériau, donnée par la formule suivante :

$$a = \frac{\lambda}{pc} \quad (1)$$

Où :

λ est la conductivité thermique de ce matériau (en kcal/°C.m².h)

p son poids spécifique (en kg/m³)

c sa capacité thermique massique ou chaleur spécifique (en kcal/°C.kg)⁴.

Dreyfus indique que le produit λpc varie « de 600 pour le béton à 2 à 4 pour les matériaux légers⁵ », l'important écart entre ces valeurs montre que la diffusivité thermique d'un matériau massif est considérable par rapport à celle d'un matériau isolant qui est négligeable. Ces résultats seront repris par Givoni, qui affirme que lorsque le produit λpc est élevé « les murs peuvent absorber la chaleur émise par des sources intérieures avec plus de rapidité et il en résulte que l'élévation de température est plus faible⁶ », alors que pour de petites valeurs du

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 129.

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 122.

3 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 128-130.

4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 81.

5 *Ibid.*, p. 88.

6 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 141. ;

produit λpc caractéristiques des matériaux isolants, ceux-ci « s'échauffent plus rapidement¹ ». En France, d'autres méthodes de calcul du déphasage thermique seront développées par François-Marie Camia, physicien au centre de microcalorimétrie du CNRS, et également associé aux recherches sur la conception bioclimatique².

En pratique, la complexité des calculs thermiques en régime périodique et variable dispensera les architectes d'avoir recours à ces formules, et ils utiliseront essentiellement des tableaux résumant le déphasage thermique en heures et le facteur d'amortissement des principaux matériaux de construction. On trouve des tableaux de cette nature dans différents ouvrages et articles³. Ces tableaux donnent quelques valeurs de déphasage thermique pour certains matériaux courants. Par exemple, Ayoub affirme que la valeur du déphasage des maxima de température entre l'extérieur et l'intérieur est « de 2 h 30 pour une structure en panneaux de bois et de 5 h 30 pour une structure moyenne en briques⁴. »

Pour les architectes, l'inertie thermique apportée par les matériaux ayant une diffusivité thermique importante permet de « réguler l'écoulement des flux de chaleur extérieurs dont le débit varie entre la nuit et le jour⁵ » et intervient directement dans le contrôle climatique et la régulation thermique. Afin d'expliquer la fonction de l'inertie thermique en régime périodique, Jean-Louis Izard propose l'analogie suivante issue du domaine de l'hydraulique :

« La meilleure illustration [de l'inertie thermique] est fournie par la similitude des barrages sur les cours d'eau, destinés à régulariser leur débit : en cas de crue, le barrage se remplit, diminuant ainsi le débit en aval ; si à la crue succède un étiage (basses eaux), l'eau stockée par le barrage sert à alimenter le débit en aval. Avec des crues et des étiages se succédant régulièrement il est assez facile d'estimer la capacité qu'il faut donner au barrage pour que le débit en son aval soit constant : la capacité est donc bien la grandeur agissante en cas de régime variable du cours d'eau ; il est de même en thermique du bâtiment⁶. »

1 *Ibid.*

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 17-19.

3 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *op. cit.*, p. 198 ; B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 156.

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 89.

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 16.

6 *Ibid.*, p. 16.

En régime thermique variable ou périodique, l'inertie thermique est assimilée à un système de stockage temporaire, permettant de déphaser les apports de chaleur dépendant de phénomènes climatiques irréguliers et de les transmettre progressivement à l'ambiance intérieure¹. L'assimilation de l'inertie thermique à un système de stockage conduira à multiplier son emploi par les architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive dans de nombreux climats. La plupart des techniques solaires passives que nous allons aborder dans les chapitres suivants emploient à ce titre le béton et la terre crue, mais aussi l'eau sous forme de fûts insérés dans la masse de la construction afin de multiplier le stockage thermique, l'eau ayant une capacité thermique par unité de masse particulièrement importante². L'inertie thermique du sol, considérée comme une « ressource³ » par certains architectes, sera elle aussi abondamment utilisée dans de nombreuses constructions solaires passives, notamment en enterrant partiellement le rez-de-chaussée.

Étant donné l'importance accordée à l'inertie thermique, l'isolation thermique par l'extérieur relativement nouvelle en 1970 et souvent coûteuse, a très généralement été préférée par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique dans les climats tempérés et chauds et secs⁴. Concernant cette période, certains ingénieurs affirment cependant que le « problème de l'isolation était négligé, alors qu'il s'agit d'une technique passive par excellence⁵ » et que les publications relatives à ces techniques « n'ont pas donné assez de place à l'isolation⁶ », malgré son intérêt économique évident. Il est vrai que l'isolation thermique n'est pas présentée comme une technique solaire passive en tant que telle dans ces publications consacrées aux techniques solaires passives, mais comme un dispositif complémentaire aux matériaux massifs et aux systèmes de captage qui sont d'abord valorisés. La recherche des apports solaires et de leur stockage prime la volonté de contrôler les déperditions thermiques. La « surisolation⁷ » systématique des constructions n'est jamais présentée comme une solution satisfaisante, même dans les climats tempérés, et l'accent est mis sur la complémentarité entre inertie et isolation thermique.

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 140.

2 *Ibid.*, p. 390.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 136.

4 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 14.

5 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, Paris : Alternative et Parallèles, (coll. AnArchitecture), 1980, p. 11.

6 *Ibid.*, p. 25.

7 *Ibid.*, p. 42.

Les expérimentations diffusées durant cette période se concentrent essentiellement sur l'association des matériaux isolants et massifs, que ce soit au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa en Israël sous la supervision de Givoni, ou dans d'autres centres de recherches en zone tropicale. À partir de la mesure des températures maximum et minimum à l'extérieur ainsi qu'à l'intérieur de différents prototypes, Givoni a notamment mis en évidence l'importance de la position de l'isolation et a observé que le « maximum de la température intérieure est plus bas et le minimum plus élevé avec une isolation extérieure qu'avec une isolation intérieure¹ » pour le climat du nord de l'Israël. Dans ce climat, l'intérêt de l'isolation augmente si la surface extérieure de la construction est sombre, mais il est en revanche quasiment nul si la surface extérieure est claire, dans la mesure où la température de la surface s'élève très faiblement au-dessus de l'air extérieur en journée et que le gradient de température dans la paroi est alors faible². La mesure des températures à l'intérieur de différents prototypes a montré que l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation était sans incidence notable, ce qui permet à Givoni de conclure que « sous un climat chaud et dans des conditions intérieures naturelles, à l'exclusion d'un chauffage ou d'un refroidissement artificiel, on obtient la résistance thermique optimale en agissant sur la couleur externe et la ventilation³. » Ce résultat important montre l'importance des caractéristiques des surfaces extérieures sur le comportement thermique global d'une construction. Des études analogues ont été menées dans d'autres centres de recherches en zone tropicale.

Ces considérations relatives aux surfaces, à la couleur et leur texture, ainsi qu'aux propriétés respectives des matériaux isolants et massifs permettent de prendre en compte l'effet de certains facteurs climatiques sur la paroi externe d'une construction située dans un climat donné (ensoleillement, vitesse de l'air...) dans le but d'affiner l'étude préalable du comportement thermique de cette construction. Cependant, nous n'avons abordé jusqu'à présent que la fonction des matériaux opaques, relativement simple à étudier en l'absence d'ouvertures. Les relations entre matériaux opaques et transparents étant au cœur de la majorité des techniques solaires passives, il est nécessaire d'aborder l'étude des matériaux transparents et translucides, ainsi que des ouvertures et de leur rôle envisagé sous l'angle de leur fonction climatique. Le chapitre suivant est consacré aux développements dans la compréhension du rôle des ouvertures transparentes, translucides ou opaques et aux recherches sur la protection de ces

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 145.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

ouvertures qui sont présentées dans les manuels relatifs à la conception bioclimatique et solaire passive.

II.1.3. La fonction des ouvertures et leur protection

II.1.3.1. Comprendre et contrôler « l'effet de serre »

Envisagée du point de vue de sa fonction climatique, la caractéristique d'une ouverture, vitrée ou non, est de permettre d'admettre sélectivement des éléments du climat extérieur en fonction de son orientation (air, rayonnement solaire...). Outre la vue sur l'extérieur qu'elle permet, la fonction d'une ouverture vitrée est d'admettre le rayonnement solaire afin d'apporter une certaine quantité d'énergie sous forme électromagnétique et thermique, mais aussi d'offrir un éclairage naturel jusqu'à une certaine distance, ces deux fonctions étant le plus souvent associées dans les climats froids et tempérés¹. On peut ainsi poser en principe que les « ouvertures sont calibrées et conçues, suivant les latitudes, en fonction du besoin de lumière² » selon l'observation de l'architecte André Ravéreau. Dans les climats chauds et secs par exemple, la fonction d'éclairage peut être assurée par une mince fente pratiquée dans la maçonnerie. Si une ouverture vitrée est montée sur un châssis mobile et adéquatement orientée, elle peut également assurer la fonction de ventilation d'une pièce intérieure, bien que cette fonction puisse être assurée par d'autres éléments mobiles ou par des dispositifs architecturaux spécifiques.

Une propriété essentielle de certains matériaux transparents utilisés pour les ouvertures vitrées est de produire un effet de serre dans une pièce fermée et dépourvue de ventilation. Cet effet est intuitivement connu depuis l'emploi d'espaces vitrés et de serres pour la production de chaleur sensible pour des applications horticoles³. Son étude s'est particulièrement développée à partir du XVIII^e siècle, notamment sous l'impulsion du physicien et naturaliste genevois Horace Bénédict de Saussure⁴ (1740-1799), mais l'effet de serre n'a pu être complètement expliqué qu'à partir de la compréhension spectrale du rayonnement solaire⁵. L'effet de serre est

1 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Egypte : Gourni*, op. cit., p. 95.

2 A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Paris : Sindbad, (coll. Hommes et sociétés), 1981, p. 171.

3 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 41-53.

4 *Ibid.*, p. 55-59.

5 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 87-90.

systématiquement présenté dans les publications relatives à la conception bioclimatique et solaire passive et constitue une propriété décisive pour le développement des techniques qui y sont associées. Givoni donne l'explication la plus claire de ce phénomène :

« La propriété essentielle du verre, et de certains plastiques transparents, qui est la cause de leur effet thermique spécifique, est la transparence différentielle aux rayonnements de courte et de grande longueur d'onde. Tandis qu'il transmet la quasi-totalité des rayonnements du domaine de 0,4 à 2,5 microns qui correspond à peu de choses près à la définition du spectre solaire, le verre est complètement opaque aux rayonnements de plus grande longueur d'onde aux alentours de 10 microns¹. »

Cette propriété se manifeste par une élévation rapide de la chaleur sensible de l'air dans une pièce ou un espace non ventilé et exposé au rayonnement solaire à travers ce type de matériaux. Givoni poursuit :

« Ainsi, le verre transmet le rayonnement de manière sélective ; il permet au rayonnement solaire de pénétrer à l'intérieur des bâtiments, où il est absorbé par les surfaces et les objets que contiennent ces bâtiments, ce qui a pour effet d'élever leur température. Mais ces surfaces chauffées émettent à leur tour un rayonnement dont le maximum d'intensité se situe à une longueur d'onde voisine de 10 microns et ce rayonnement ne peut être transmis à l'extérieur, du fait de l'opacité du verre à cette longueur d'onde². »

Cette explication est cependant incomplète : l'effet de serre s'explique essentiellement par le fait qu'une serre bloque les échanges convectifs entre l'air intérieur et extérieur³. Le volume d'air isolé dans la serre s'échauffe par conduction le long des surfaces déjà échauffées par le rayonnement solaire, ce qui l'anime de mouvements convectifs. Ce processus s'entretient jusqu'à ce que les déperditions (par infiltration ou par conduction) et les apports thermiques se compensent. Ainsi, ce sont essentiellement les phénomènes convectifs qui permettent de décrire convenablement l'effet de serre, ce qui explique que cet effet puisse être créé avec un matériau

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 251.

2 *Ibid.*

3 R. Lee, « The "greenhouse" effect », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 12 (3), 1973, p. 556-557.

transparent au rayonnement de grande longueur d'onde et qui le distingue nettement du forçage radiatif, improprement nommé « effet de serre », qui existe à l'échelle atmosphérique¹.

La propriété d'effet de serre produite par le verre et certains plastiques en fait un matériau privilégié par l'ensemble des architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive dans les climats froids, tempérés ou disposant d'une période froide. Des recherches menées en Afrique du Sud par J. F. van Straaten durant les années 1950 ont établi que le flux d'énergie par mètre carré transmis à travers un vitrage orienté à l'ouest était plus de huit fois supérieur à celui transmis à travers un mur léger faiblement isolé et plus de quatorze fois supérieur à celui transmis à travers un mur bien isolé ou en brique². Pour Ayoub, « le verre apparaît comme le matériau par excellence du contrôle thermique naturel, dans tous les climats ensoleillés à deux saisons, chaude et froide³ ». À titre de comparaison, il estime « que 88 % du flux solaire incident pénètre directement à l'intérieur à travers un vitrage propre, alors que ce pourcentage n'atteint pas 25 % dans le cas d'un mur de 25 cm en hiver⁴. » De par ses propriétés sélectives, le verre est parfois présenté comme un matériau « miracle⁵ » par certains architectes associés à la conception solaire passive.

L'ingénieur John Yellott, que nous avons déjà mentionné, considère le développement des techniques solaires passives comme indissociable de la généralisation de l'emploi du verre et des grandes ouvertures vitrées dans la construction⁶. Il affirme en 1978 :

« [Le] verre, ou tout autre matériau de vitrage adapté, est un élément essentiel pour une application réussie de la plupart des systèmes de chauffage passifs, et il y a eu un grand regain d'intérêt pour cette technique à la fin des années 1930 et au début des années 1940 lorsque de grandes "fenêtres isolantes" hermétiquement scellées sont devenues disponibles à des prix raisonnables⁷. »

1 *Ibid.*, p. 556.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 253.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 119.

4 *Ibid.*, p. 120.

5 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, p. 13.

6 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 1 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

7 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Glass or other suitable glazing material is an essential element for successful application of most passive heating systems and there was a great upsurge of interest in this technique in the late 1930's and early 1940's when large hermetically-sealed "insulating windows" became available at reasonable prices. »

Ces fenêtres dites « isolantes » sont les premières fenêtres double vitrage qui permettaient d'atténuer l'inconfort habituellement ressenti au voisinage des fenêtres simple vitrage de grande dimension (effet de paroi froide¹). La généralisation de l'utilisation du double vitrage dès la fin des années 1970² et l'amélioration de l'étanchéité à l'air constituent une seconde étape importante dans ce développement³.

L'orientation et la dimension des ouvertures dépendent des critères que nous avons évoqués précédemment principalement relatifs à la géométrie solaire, mais également au microclimat. À l'aide d'outils graphiques et de maquettes, l'architecte américain Henry N. Wright, auteur d'études théoriques sur l'orientation, avait mis en évidence dès 1936 qu'une maison conventionnelle de cinq pièces la plus mal orientée possible pouvait accumuler jusqu'à neuf fois plus d'énergie thermique que la même maison bien orientée⁴. Il avait estimé qu'une optimisation dans la disposition des ouvertures et dans la morphologie de la construction permettrait de capter quatre fois plus d'énergie thermique en hiver que la première habitation mal orientée⁵. Bien que les valeurs du rayonnement solaire employées pour cette étude aient été critiquées par la suite⁶, l'écart entre les résultats traduit l'importance de l'orientation des vitrages. L'architecte américain David Wright considère en 1978 que la répartition des ouvertures détermine très largement les apports solaires dans les constructions solaires passives et bioclimatiques. Il estime « qu'une maison solaire passive n'a pas beaucoup plus de vitres qu'une maison conventionnelle : 16 à 20% de la surface totale⁷ », mais que celles-ci sont « réparties différemment : toutes au sud⁸. »

Ces estimations proposées par des architectes provenaient essentiellement de leurs expériences et ont été étayées par un certain nombre d'expérimentations réalisées par différents organismes de recherche dans différents climats. Une de ces expérimentations réalisées au

1 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 27.

2 Sur le développement du double vitrage, connu depuis le XIXe siècle, voir : J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 294-295.

3 J. Souviron, « The construction of efficiency : Glazing insulation in France and Belgium since 1945 » in : J. Mascarenhas-Mateus, A. Paula Pires (eds.), *History of Construction Cultures*, Londres : CRC Press, 2021, p. 324-327.

4 H. N. Wright, *Solar Radiation as Related to Summer Air-Conditioning and Winter Heating in Residences*, New York: John B. Pierce Foundation, 1936. Voir : J. M. Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, op. cit., p. 301.

5 *Ibid.*

6 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 54.

7 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 84 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

8 *Ibid.*

Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa par Givoni et publiée en 1965 a consisté à mesurer la variation des températures intérieures pendant une période de vingt-quatre heures en juillet et en août dans quatre prototypes identiques construits en béton léger, qui se distinguaient seulement par l'orientation de leur fenêtre principale : soit au nord, au sud, à l'est ou à l'ouest¹. Givoni a observé qu'au lever du soleil la température à l'intérieur du prototype exposé à l'est s'élève de « 13 °C en quatre heures, contre 5 °C à l'extérieur dans le même intervalle² » puis s'abaisse progressivement au cours de l'après-midi. Pour le prototype orienté à l'ouest, la température intérieure augmente jusqu'à « 11 °C au-dessus du niveau extérieur³ », alors que la variation des températures intérieures pour les prototypes orientés au nord et au sud est semblable et ne dépasse pas 3,5 °C au-dessus de la température extérieure. Selon Givoni, cette élévation des températures intérieures des prototypes par rapport aux températures extérieures peut être atténuée par une ventilation transversale et complètement annulée par la disposition d'occultations extérieures devant les vitrages, indépendamment de leurs orientations⁴. Ces résultats montrent le caractère particulièrement défavorable pour le confort d'été des vitrages orientés à l'est et à l'ouest en l'absence de ventilation ou de protections solaires. Dans les climats tempérés, des études analogues réalisées par le CSTB et mentionnées en 1979 ont mis en évidence « que dans un bâtiment d'inertie moyenne (briques, parpaings, béton armé), les besoins de chauffage diminuent avec l'agrandissement des fenêtres sud⁵. »

II.1.3.2. La reprise des méthodes numériques, graphiques et analogiques pour étudier les ouvertures et de leur protection

Les expérimentations menées par Givoni au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa et par d'autres organismes ont généralement confirmé la nécessité d'étudier soigneusement l'orientation et le dimensionnement des ouvertures vitrées. Afin d'éviter le recours systématique à ce type d'expérimentation, des méthodes de calcul avaient été développées dès le début du XX^e siècle par les ingénieurs et les thermiciens aux États-Unis afin d'anticiper les charges de refroidissement pour dimensionner les systèmes de conditionnement mécaniques de

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 239-243.

2 *Ibid.*, p. 239.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 241.

5 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, « Fenêtre capteur. Fenêtre déperdition : quelques chiffres », op. cit., n. p.

l'air¹. Yellott a notamment contribué au développement de ces méthodes afin d'estimer ce qu'il nomme le « gain de chaleur solaire² » en 1963. Les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique et solaire passive n'ont fait que reprendre ces méthodes de calcul à partir du début des années 1970, en interprétant ces charges de refroidissement comme des « gains³ » solaires, c'est-à-dire des apports thermiques favorables durant une partie de l'année à condition d'être contrôlés par des protections adéquates⁴. Ces méthodes de calcul ont été utilisées pour anticiper la part du chauffage susceptible d'être assurée par le rayonnement solaire à travers les vitrages, mais aussi pour prévoir la quantité d'énergie thermique transmise par un élément opaque comme un capteur solaire. En France, le calcul des apports solaires par les vitrages sera développé par le Comité Scientifique et Technique des Industries du Chauffage⁵ (COSTIC) et les fabricants de vitrages à partir des années 1940⁶. D'autres méthodes de calcul ont été progressivement mises au point par la suite et certaines ont été intégrées en 1982 dans la réglementation thermique française⁷.

Le calcul des apports solaires à travers un vitrage est relativement simple à réaliser à partir de tableaux des apports solaires par ciel clair en Wh/m² ou kcal/m² calculés ou mesurés pour différentes orientations et inclinaisons, à différentes latitudes et pour chaque mois. On trouve ce type de tableau dans certains manuels dédiés à la conception solaire passive⁸. Des données moins complètes donnant par exemple la quantité d'énergie solaire reçue par une surface pour différentes orientations représentatives à une certaine latitude, ont été utilisées pour estimer les apports solaires dès 1930⁹. À partir de ces données, le calcul fait intervenir la surface totale des vitrages pour chaque orientation, ainsi que le coefficient de transmission qui

-
- 1 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 292 ; M. Roubinet, *La Climatisation*, op. cit., p. 51-52.
 - 2 J. I. Yellott, « Calculation of Solar Heat Gain Through Single Glass », *Solar Energy*, vol. 5, n°4, octobre-décembre 1963, p. 167-175.
 - 3 *Ibid.*
 - 4 J. I. Yellott, « Glass – An Essential Component in Passive Heating », p. 95-99 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off: Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference: January 11-13, 1979, San Jose, California*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1979. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 5 E. Gallo, « L'émergence du "solaire" avant 1973, chez les inventeurs et les thermiciens », p. 104-105 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, op. cit.
 - 6 V. Fernandez, « De l'épure géométrique au brise-soleil », p. 148-149 in : *ibid.*
 - 7 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 133.
 - 8 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 300-304.
 - 9 V. Fernandez, « De l'épure géométrique au brise-soleil », p. 147 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, op. cit.

dépend du type de vitrage, de son inclinaison et de l'angle d'incidence du rayonnement solaire¹. Ce coefficient est toujours inférieur à l'unité. Un exemple est donné par Ayoub en 1960, pour le calcul d'un vitrage orienté au sud :

« Si on considère une façade sud, à la latitude 30°, par temps clair, il est facile de calculer [...] qu'une énergie solaire de 3 300 kcal/m² atteint la paroi extérieure au cours de la journée du 21 décembre, 2 900 kcal environ traversent le vitrage par mètre carré, soit 14 500 pour une surface vitrée de 5 m² que présenterait une pièce d'appartement. Ceci représente une énergie de 17,5 kW, l'équivalent d'un radiateur de 1,5 kW qui fonctionnerait de l'aube jusqu'à la nuit. Il n'en faut pas plus durant les hivers modérés de ces latitudes, l'énergie accumulée dans les masses intérieures, cloisons et meubles, suffisant pour les besoins de la nuit². »

On remarque qu'Ayoub assimile les apports solaires cumulés pour cette journée de décembre au fonctionnement continu d'un radiateur. Le calcul très simplifié qu'il utilise suppose néanmoins une compréhension de la géométrie du rayonnement solaire, qui fait intervenir l'azimut et la hauteur du soleil donnant l'angle d'incidence, la latitude du lieu considéré, ainsi que les fonctions sinus et cosinus³.

Mais ce type de calcul ne donne qu'une grossière approximation des apports solaires pour une journée et n'aide pas à concevoir les protections solaires nécessaires dans de nombreux climats. Pour ce faire, de nombreuses méthodes graphiques et géométriques plus ou moins complexes à utiliser avaient été progressivement mises au point dans la première moitié du XX^e siècle⁴, ainsi que des outils analogiques recensés par Aronin en 1953 permettant de simuler l'ensoleillement, comme les *Heliodons* ou le *Solarscope*⁵. En ce qui concerne les méthodes graphiques, les données obtenues avec les calculs précédemment évoqués peuvent par exemple être directement déduites d'un diagramme représentant les courbes d'iso-intensité (ou d'iso-incidence) pour une orientation donnée. Ce diagramme donne la « variation de transmission d'un vitrage ordinaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire⁶ », cet angle

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 94 ; E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 223.

2 *Ibid.*, p. 120.

3 *Ibid.*, p. 96.

4 V. Fernandez, « De l'épure géométrique au brise-soleil », p. 155-158 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, *op. cit.*

5 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 31-55.

6 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 40.

étant obtenu à l'aide d'un diagramme solaire pour la latitude considérée, qui permet de lire la hauteur et l'azimut du soleil pour tout moment de l'année (figure 32). Ces diagrammes très utilisés et diffusés par les fabricants de vitrages dès le milieu du XX^e siècle représentent la trajectoire du soleil pour une latitude donnée en coordonnées orthogonales (figure 33) ou en projection orthographique, stéréographique ou équidistante¹, cette dernière étant la plus utilisée aux États-Unis² (figure 34). Les « calculateurs de rayonnement » (« *Radiation Calculator* ») utilisés dès les années 1950 aux États-Unis donnent les courbes d'iso-intensité du rayonnement solaire reçu sur une surface verticale et horizontale, et ont été conçus pour être superposés à un diagramme solaire en projection équidistante, afin de visualiser directement la quantité d'énergie reçue par l'élément de construction, sans passer par le calcul de l'angle d'incidence³. L'utilisation d'un référentiel géocentré et les déformations induites par la projection géométrique rendent la lecture de ces diagrammes solaires plus ou moins délicate sans une certaine habitude. Ils ont néanmoins très largement circulé et sont systématiquement présentés dans les manuels consacrés à la conception bioclimatique et solaire passive.

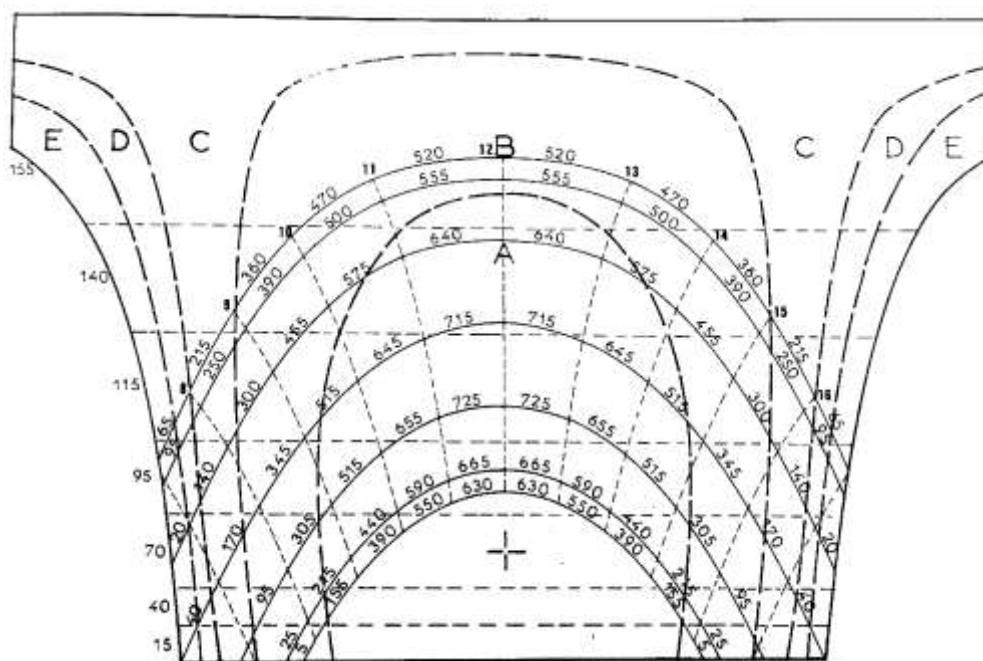


Figure 32 : Courbes d'iso-intensité superposées à un diagramme solaire pour un plan incliné à 75°.
(J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 45)

1 A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control & Shading Devices*, op. cit., p. 38-40.

2 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 95.

3 A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control & Shading Devices*, op. cit., p. 61.

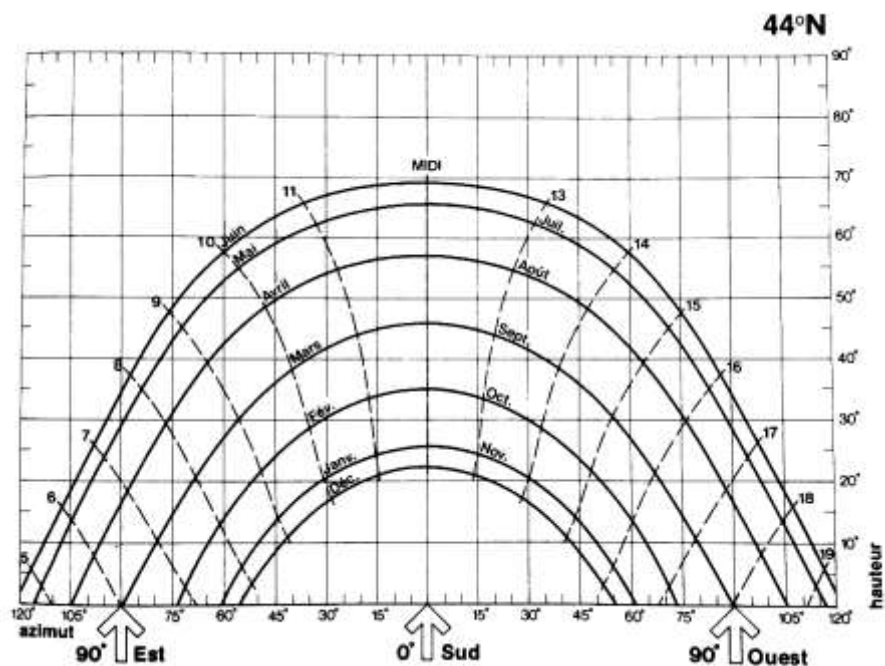


Figure 33 : *Diagramme solaire en coordonnées orthogonales.*
(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 251)

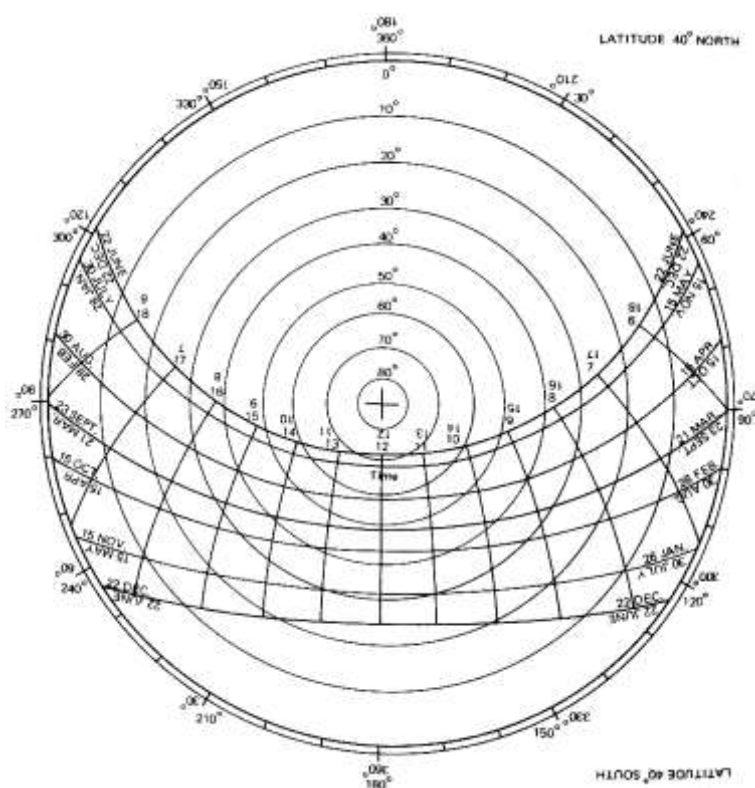


Figure 34 : *Diagramme solaire en projection orthographique.*
(O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, Londres : Longman, 1974, p. 303)

II.1.3.3. Le « contrôle solaire » et la synthèse des recherches sur les protections solaires

En plus d'aider à anticiper la quantité d'énergie transmise à travers les vitrages, ces différents outils graphiques, géométriques et analogiques servaient à concevoir et à dimensionner les protections solaires nécessaires à l'occultation des vitrages indispensables au « contrôle solaire¹ » dans de nombreux climats, au moins durant une partie de l'année. Une protection solaire est un élément architectural généralement saillant par rapport au plan de la façade, mobile ou immobile, qui permet de réduire la pénétration du rayonnement solaire par une ouverture, en produisant une ombre sur celle-ci tout ou partie de l'année. Elle possède un rôle important pour le contrôle de la lumière naturelle, qui était systématiquement favorisée par les ingénieurs et les architectes associés à la conception bioclimatique pour l'éclairage de leurs constructions². La forme de cette protection peut considérablement varier en fonction de l'orientation et de considérations esthétiques (brise-soleil, persiennes, auvents, jalousies, « boîte à œuf », balcons, coursives...). Elle peut être réalisée par la façade elle-même en l'inclinant vers l'extérieur par un fruit ou un encorbellement³. Parmi d'autres, Le Corbusier a particulièrement contribué à promouvoir dès 1920 l'utilisation des dispositifs d'occultation sous différentes formes⁴, en collaboration avec Iannis Xenakis qui a utilisé des méthodes graphiques d'étude des masques dès le début des années 1950⁵. Les protections solaires imaginées par Le Corbusier pour les façades est et ouest (loggias) n'ont cependant jamais fait preuve d'une quelconque efficacité⁶. Plus généralement, l'utilisation des protections solaires pour la « défense des habitations contre la chaleur solaire⁷ » dans les régions chaudes et tropicales et pour « le réglage de l'ensoleillement⁸ » dans les régions tempérées était largement

1 *Ibid.*

2 D. Watson, « Bioclimatic Design Research », *op. cit.*, p. 406, 414-415.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 132.

4 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*, p. 363-378 ; D. Siret, « Généalogie du brise-soleil dans l'œuvre de Le Corbusier », [en ligne], *Cahiers thématiques*, École nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille, 2004, p. 169-181 ; V. Fernandez, « De l'épure géométrique au brise-soleil », p. 146-149 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, *op. cit.*

5 D. Siret, A. Harzallah, « Architecture et contrôle de l'ensoleillement », [en ligne], *Congrès IBPSA France*, Saint-Pierre de la Réunion, novembre 2006, p. 6.

6 D. Siret, « L'illusion du brise-soleil par Le Corbusier », [en ligne], *Colloque langages scientifiques et pensée critique : modélisation, environnement, décision publique*, Cerisy, juin 2002, n. p.

7 G. Ghilardi, « La Défense des habitations contre la chaleur solaire », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », *op. cit.*, p. 199-200.

8 A. Wogenscky, « Réglage de l'ensoleillement », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », *op. cit.*, p. 207-211.

encouragée dans la première moitié du XX^e siècle, et de nombreux dispositifs mobiles avaient été imaginés à cet effet¹.

Victor et Aladár Olgyay donnent un panorama visuel des protections solaires fixes en 1957 dans l'ouvrage *Solar Control & Shading Devices*² (figure 35). Leur méthode de conception de ces protections repose sur la superposition de diagrammes. Tout d'abord, il est nécessaire d'obtenir les données météorologiques représentatives du climat local où doit être située la construction, afin de déterminer les périodes de surchauffe où celle-ci doit être protégée du rayonnement solaire direct³. Ces périodes de l'année correspondent à certaines positions du soleil dans le ciel qui sont déduites à l'aide d'un diagramme solaire de la latitude considérée. Une fois ces périodes repérées graphiquement sur le diagramme solaire, il suffit de superposer sur celui-ci d'autres diagrammes représentant les « masques d'ombre⁴ » produits par différents dispositifs. Ces masques d'ombre représentent sur un cercle la période de l'année durant laquelle la protection occulte le rayonnement solaire direct à cent pour cent, ainsi qu'à cinquante pour cent sur une paroi verticale. Victor et Aladár Olgyay donnent de nombreux exemples de ces masques d'ombres pour différentes formes de protections solaires⁵ (figure 36). Une fois défini le type de protection approprié à partir de ces diagrammes, l'architecte n'a plus qu'à adapter le ou les types de protections choisis à l'échelle de l'ouverture du bâtiment considéré. Cette opération doit être répétée pour chacune des orientations.

L'ingénieur et architecte Ayoub reprendra une grande partie des travaux présentés dans *Solar Control & Shading Devices* pour les diffuser en France dès 1960⁶. Il a développé des méthodes géométriques simplifiées par rapport à celle des frères Olgyay qui font intervenir différents angles pour repérer la position du soleil et il affirme que les brise-soleil conçus suivant sa méthode « sont valables pour toutes les orientations y compris l'est et l'ouest apparemment intraitables par des écrans fixes⁷. » Il estime que leur « rendement moyen sur ces orientations critiques est de l'ordre de 77 % et peut atteindre 95 % le 21 juin et 60 % le 21 décembre ou inversement, et toutes les valeurs intermédiaires, suivant les exigences du

1 R. Montaut, « Dispositifs mobiles de protection contre le soleil », *Techniques & Architecture*, « Le Soleil », *op. cit.*, p. 212-216.

2 A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control & Shading Devices*, *op. cit.*, p. 14-15.

3 *Ibid.*, p. 78.

4 *Ibid.*, p. 78-79.

5 *Ibid.*, p. 88-92.

6 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 102.

7 *Ibid.*, p. 70.

climat¹. » La conception de protections solaires par cette méthode géométrique ainsi que celle de la superposition des masques seront reprises par la suite². Les outils présentés par Victor et Aladár Olgyay en 1957 ont été particulièrement utilisés par les architectes et les ingénieurs en zone tropicale et on trouve des protections solaires vraisemblablement conçues suivant leur méthode dès le milieu des années 1930 au Brésil³. Selon l'historien Daniel Barber, l'utilisation de protections solaires est le premier indice d'une prise en compte consciente du climat par les architectes modernes⁴, mais nous contestons cette thèse dans la mesure où cet indice n'indique qu'une prise en compte de l'ensoleillement et non de l'ensemble des facteurs et des éléments qui caractérisent un climat local.

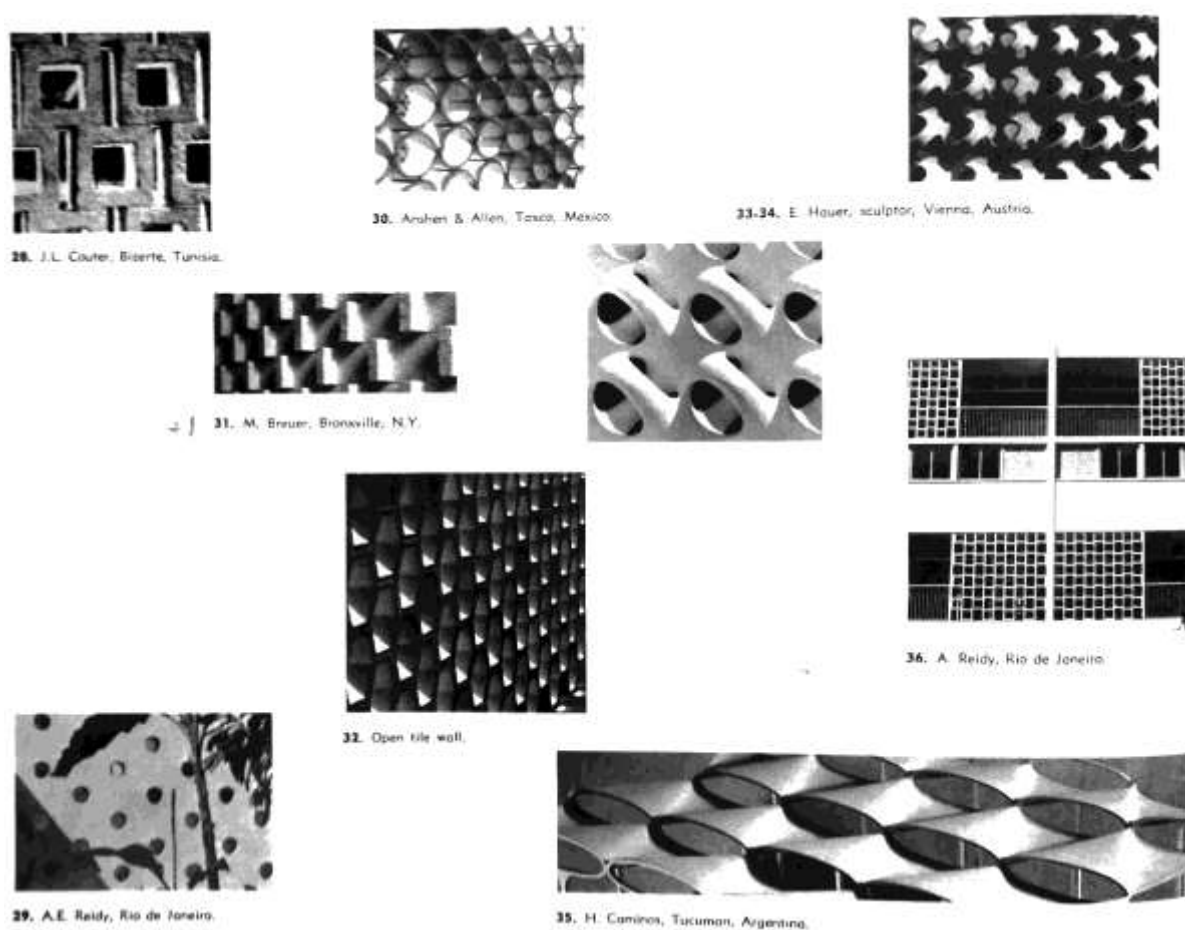


Figure 35 : Différentes morphologies de protections solaires.

(A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control & Shading Devices*, Princeton : Princeton University Press, 1957, p. 14-15)

1 *Ibid.*

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 67-68.

3 D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, op. cit., p. 75-77, 86-87.

4 *Ibid.*, p. 9.

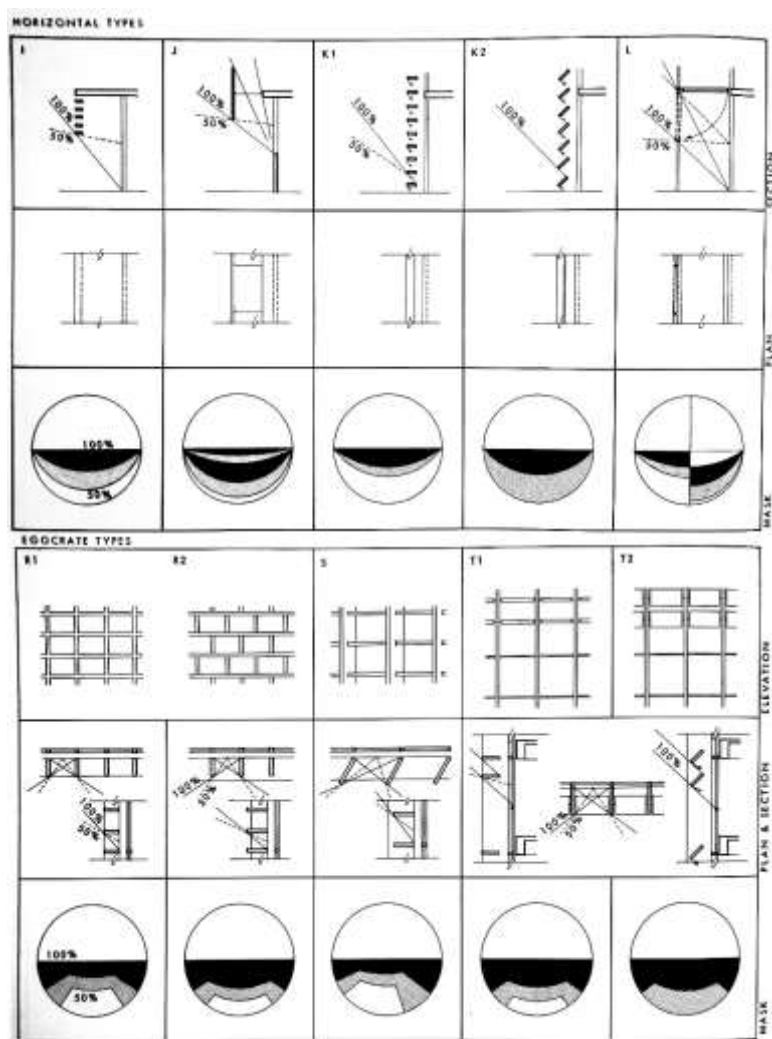


Figure 36 : Masques d'ombres pour différents types de protections solaires.
(A. Olgyay, V. Olgyay, *Solar Control & Shading Devices*, Princeton : Princeton University Press, 1957, p. 90 et 92)

Du point de vue de la conception bioclimatique et solaire passive, la protection solaire des vitrages ne doit pas être pensée indépendamment, mais dans la continuité des problèmes de protection posés au niveau microclimatique que nous avons évoqués précédemment. L'utilisation de la végétation et de protections solaires appartiennent à la même lignée technique : « l'arbre utile¹ » qui projette une ombre sur le vitrage d'une façade orientée à l'ouest assure la même fonction qu'une protection solaire bien conçue. Ils constituent deux échelles d'intervention et deux réponses possibles au même problème de protection solaire. En l'absence de végétation ou de masques créés par l'environnement, de nombreux architectes et ingénieurs estiment qu'il est nécessaire de concevoir une protection pour les ouvertures orientées entre le

1 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, op. cit., n. p.

nord-est et le sud-est et entre le sud-ouest et le nord-ouest dans la majorité des climats chauds, ainsi que pour certains climats tempérés où une protection des ouvertures orientées au sud est également recommandée. Le recours à des protections fixes (auvent, brise-soleil...) est cependant problématique pendant la mi-saison dans les climats tempérés. En effet, celles-ci peuvent ne pas occulter le rayonnement solaire en automne à des périodes où les températures sont encore élevées et les apports solaires sont indésirables, et peuvent à l'inverse l'occulter au printemps au moment où ces apports sont favorables¹. Ce problème était souvent résolu par l'emploi de protections mobiles et manipulables par les habitants (cannisse, tonnelle, toile tendue...) ou de plantes grimpantes à feuillage caduc (treille, vigne...).

Du point de vue climatique, l'utilisation de protections solaires placées devant des ouvertures vitrées vise à résoudre un antagonisme. Ce choix admet que si les ouvertures vitrées permettent des apports favorables, leur exposition au rayonnement solaire à certaines périodes de l'année sera défavorable du point de vue du confort intérieur. Les antagonismes entre périodes favorables et défavorables aux apports climatiques, déjà repérés par Olgyay en 1951² et qui existent à l'échelle de l'ensemble d'une construction, se retrouvent ici au niveau d'un élément, qui doit à la fois capter et être protégé du rayonnement solaire à des périodes différentes. L'utilisation des outils évoqués précédemment trouve sa justification dans la résolution de cet antagonisme, en modélisant la géométrie solaire pour dimensionner les protections, afin d'en limiter les effets défavorables sur les températures intérieures. Les caractéristiques de conductivité thermique, mais aussi d'absorption et d'émission au rayonnement, qui sont déterminantes pour le choix des surfaces et des matériaux de construction, sont également importantes dans le cas des protections solaires, qui doivent également ne pas entraver la circulation de l'air le long de la façade de la construction et doivent donc être placées en retrait par rapport à celle-ci³.

1 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 81 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 V. Olgyay, « The Temperate House », op. cit., p. 187.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 118.

II.1.3.4. Les recherches expérimentales sur l'isolation mobile des ouvertures

En ce qui concerne l'élévation des températures intérieures, les expérimentations de Givoni mentionnées précédemment sur l'orientation des ouvertures ont confirmé la supériorité des protections extérieures sur les protections intérieures¹, déjà observée par les architectes et les ingénieurs en zone tropicale. Les protections intérieures sont inefficaces pour limiter l'effet de serre et contenir l'élévation de la température intérieure. Si elles ne servent pas au contrôle solaire, les protections intérieures et les systèmes d'isolation mobile pour les ouvertures ont néanmoins fait l'objet de nombreuses recherches et expérimentations dès la fin des années 1960 aux États-Unis, afin d'améliorer les faibles performances d'isolation thermique des vitrages disponibles à l'époque. Il est apparu que des systèmes d'isolation mobile bien conçus et étanches permettraient de réduire les déperditions thermiques nocturnes par les ouvertures dans les climats froids, tempérés ou secs et soumis à de grandes amplitudes diurnes de température. De nombreux systèmes de ce type ont été développés par l'entreprise Zomeworks², située à Albuquerque dans l'État du Nouveau-Mexique aux États-Unis et fondée par l'architecte Steve Baer, inventeur prolifique et acteur majeur de la conception solaire passive sur lequel nous aurons l'occasion de revenir. Le climat de la ville d'Albuquerque, située à 1500 mètres d'altitude (35° nord) est sec, très ensoleillé et caractérisé par une importante amplitude diurne des températures. Les ouvertures y sont à la fois une source d'apports et de déperditions thermiques défavorables dans des proportions considérablement plus importantes que dans les climats tempérés.

Parmi les systèmes développés et commercialisés par Zomeworks, on trouve le *Nightwall*³ (littéralement « mur de nuit »). Ce produit est issu d'expérimentations menées en 1975 sur des systèmes d'isolation facilement manipulables⁴. Il s'agit de panneaux rigides conçus pour être en contact direct avec la face intérieure des vitrages et remplis d'une mousse de plastique isolante. Différents systèmes de fixation ont été proposés, dont des bandes magnétiques en bordure du panneau, permettant de limiter l'infiltration d'air⁵. Un autre système plus élaboré développé par l'architecte David Harrison pour Zomeworks se nomme le

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 240-241.

2 L. Hescong, *Architecture et volupté thermique*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. de l'anglais par H. Guillaud, 1981, p. 58-59.

3 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 230-231.

4 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, Albuquerque : Zomeworks Corp., 1975, p. 103.

5 *Ibid.*

*Beadwall*¹ (littéralement « mur de billes »). Il s'agit d'une ouverture vitrée composée de deux vitrages séparés par un large espace conçu pour accueillir des billes de polystyrène soufflées à l'aide d'un système d'aspiration et permettre de réaliser une isolation entre les deux vitrages² (figure 37). Les performances de cette isolation étaient considérées comme très bonnes et ce système a été installé dans différentes réalisations aux États-Unis³. L'architecte David Roditi, installateur agréé du *Beadwall* en France où il a été rarement employé, fait néanmoins remarquer que ce système n'avait qu'une efficacité très limitée, car les billes de polystyrène avaient tendance à coller aux vitrages sous l'action des phénomènes électrostatiques⁴. De plus, cette technique présentée comme passive était dépendante d'un système moteur pour le soufflage.

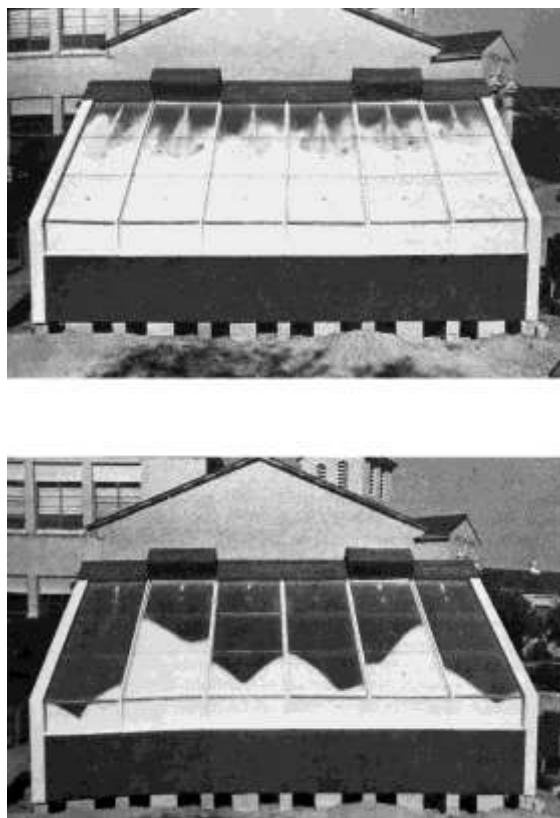


Figure 37 : Beadwall installé dans une serre.

(S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, Albuquerque : Zomeworks Corp., 1975, p. 51)

-
- 1 *Ibid.*, p. 50. Voir également : D. Harrison, « Beadwalls », p. 283-287 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 *Ibid.*
 - 3 S. Baer, « Harold Hay's influence on Zomeworks Corporation », p. 40 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.
 - 4 Entretien avec David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan.

Un autre système d'isolation des ouvertures développé et commercialisé par Zomeworks est le *Skylid* (littéralement « paupière de ciel »), qui est un système breveté inventé en 1971 par Baer¹. Il s'agit d'un ensemble de lames en aluminium pivotantes selon l'axe vertical et dont l'épaisseur est injectée de mousse isolante² (*figure 38*). Ces lames forment une occultation intérieure mobile, conçue pour s'ouvrir ou se fermer automatiquement en fonction du rayonnement solaire, ce qui permet de les utiliser pour occulter des ouvertures inaccessibles, comme celles situées en toiture³. Cet automatisme ne fait intervenir aucun système électronique puisqu'il est piloté par la différence de pression de vapeur saturante d'un gaz⁴. Les lames du *Skylid* sont montées sur un tirant actionné par un contrepoids formé par deux réservoirs remplis de fréon, gaz dont le changement de phase a été utilisé dans les installations frigorifiques. Un des réservoirs est situé sur la face extérieure d'une des lames : lorsque celui-ci s'échauffe sous l'action du rayonnement solaire, le fréon s'évapore et se liquéfie dans l'autre réservoir plus froid situé sur l'autre face de la lame, à l'abri du rayonnement solaire⁵. Ce changement de phase du fréon fait basculer le *Skylid* en position ouverte, afin d'admettre le rayonnement solaire à l'intérieur de la construction et cette position est maintenue tant que le réservoir exposé est plus chaud que celui situé derrière la lame. Lorsque le soleil se couvre ou se couche, le réservoir abrité étant maintenu échauffé par la température intérieure de la pièce, le fréon s'évapore et se condense dans le premier réservoir qui n'est plus réchauffé par le rayonnement solaire : le *Skylid* se referme pour limiter les déperditions thermiques par l'ouverture⁶. Le système peut également être manipulé à la main à l'aide d'une corde pour forcer la position ouverte ou fermée⁷. Le système *Skylid* a été installé dans de nombreuses constructions solaires passives aux États-Unis par Zomeworks (*figure 39*). Il a même été utilisé en combinaison avec le système *Beadwall* dans des projets importants, comme l'aménagement du terminal aéroportuaire d'Aspen dans l'État du Colorado⁸, bien que les *Beadwalls* aient cependant rapidement dysfonctionné⁹. En

1 US Patent No. 3,884,414. Voir : S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 91.

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 87.

3 *Ibid.*, p. 88.

4 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 91.

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 88.

6 *Ibid.*

7 Entretien avec Mariette Gerber, le 17/10/2019 à Treilles.

8 R. Shore, « Pitkin County's Airport Terminal... Or... Where did All the Natural Gas go? », p. 129 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

9 *Ibid.*, p. 130.

dehors des États-Unis, des modèles de *Skylids* ont été importés et installés en France à la fin des années 1970 par Gerber et sont toujours fonctionnels à ce jour¹.

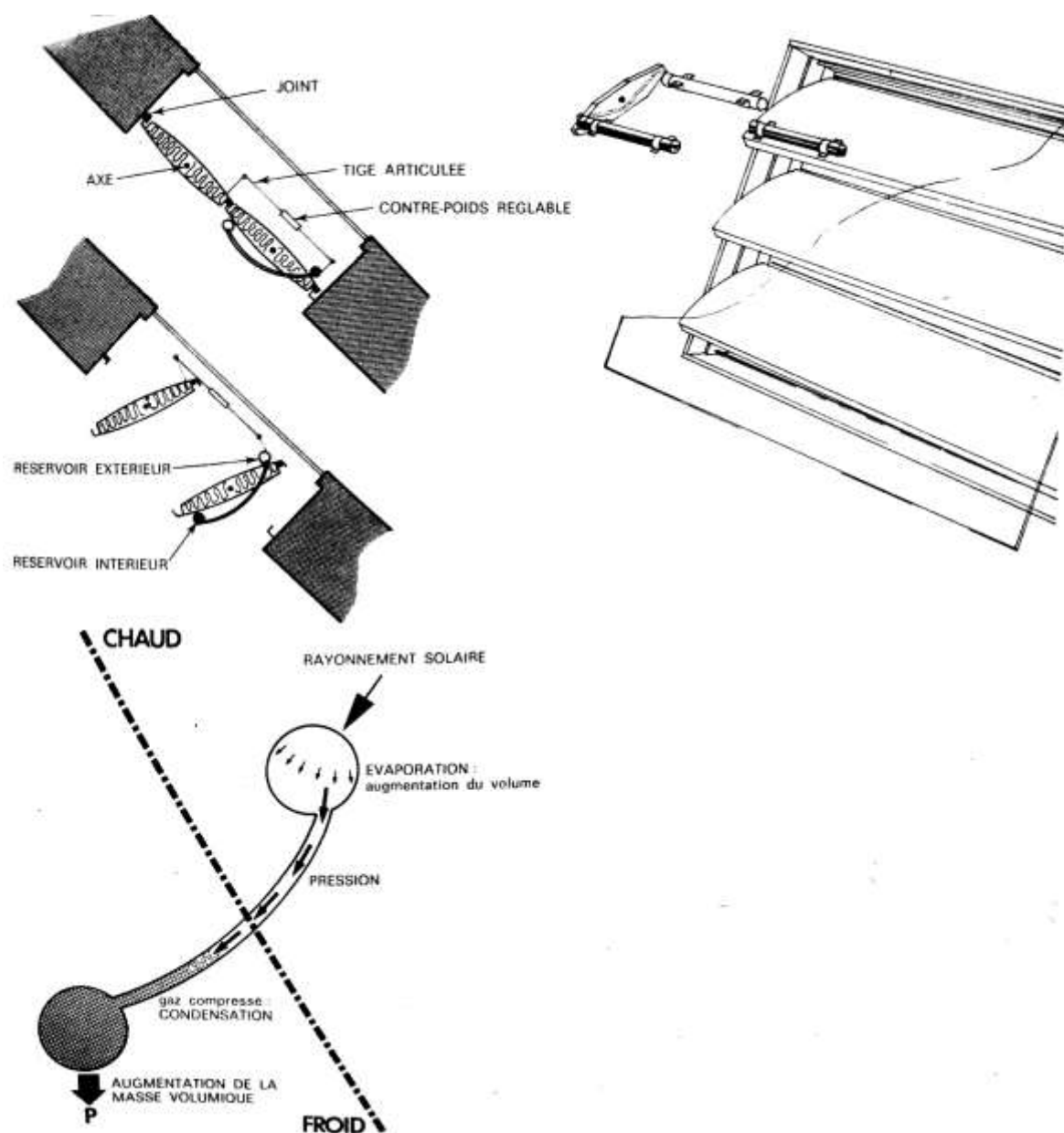


Figure 38 : *Fonctionnement du Skylid*.
(J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 87)

1 Entretien avec Mariette Gerber, le 17/10/2019 à Treilles.



Figure 39 : Skylid installé dans la maison de S. Baer.
(J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 88)

Le système *Skylid* est particulièrement original et fonctionne selon le principe d'un « moteur à gravité¹ » selon Baer. Son intérêt réside dans l'utilisation des deux réservoirs remplis de fréon, qui « comparent les températures au lieu d'agir à une température définie². » On peut considérer le *Skylid* comme un système à information et à deux états (ouvert ou fermé). Le fonctionnement d'un système à information est caractérisé par la distinction entre un signal (ici la différence de température entre les deux réservoirs) et une énergie, souvent potentielle, qui dans ce cas est fournie par la gravité et dont l'action est asservie au signal³. L'information qui

1 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 93.

2 *Ibid.*, p. 91. Traduction personnelle, citation originale : « The two cannisters they compare temperatures rather than acting at a set temperature. »

3 G. Simondon, « L'Invention et le développement des techniques », *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, Paris : Seuil, (coll. Traces écrites), 2005, p. 221-222.

détermine l'état ouvert ou fermé du *Skylid* est produite par une certaine différence de température des réservoirs, dont un est soumis à l'action périodique de facteurs climatiques et notamment du rayonnement solaire direct. Le changement d'état du fréon déplace le centre de gravité du moteur à gravité, si bien que le mécanisme peut être assimilé à une simple bascule en équilibre instable. Cette capacité de prise d'information très simplifiée du *Skylid* en fait un comparateur entre deux températures, et son principe sera repris pour de nombreuses applications relatives à la fermeture d'ouvertures et de trappes dans différentes constructions solaires passives¹, comme des serres².

D'autres recherches plus poussées ont essayé d'intégrer dans un seul et même élément de construction cette capacité de prise d'information et de changement d'état, afin de mettre au point un matériau qui puisse devenir opaque ou transparent au rayonnement solaire, en fonction de la température extérieure. Ces recherches ont abouti au *Cloud Gel*, développé et breveté par le chimiste américain Day Chahroudi, membre de l'association Suntek et collaborateur de Baer³. Mis au point au début des années 1970 à partir d'expérimentations sur des polymères et des solvants, le *Cloud Gel* est un film plastique conçu pour être transparent jusqu'à une certaine température de surface : lorsque celle-ci est dépassée, le film devient opaque et blanc afin de réfléchir le rayonnement solaire⁴. Cet effet issu d'une réaction chimique est réversible⁵. Avec un matériau de cette nature, Day Chahroudi imaginait pouvoir contenir l'échauffement par effet de serre des constructions : en devenant opaque à partir d'une certaine température, le *Cloud Gel* agit comme un système de régulation direct des apports par une occultation. Le *Cloud Gel* est présenté en France en 1978 comme une « innovation scientifique⁶ » permettant « de concevoir des matériaux sensibles aux variations climatiques et qui entretiennent automatiquement une température constante de la maison⁷ ». Malgré les espoirs qu'il a suscités, ce matériau n'a eu, à notre connaissance, aucune application notable et n'a jamais été

1 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 93-96.

2 D. Harrison, « Review of Monte Vista Elementary School Greenhouse », p. 109-110 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 D. Chahroudi, « Free passive solar heating for cold, cloudy winters. Designing molecules and crystal structures », p. 43-44, in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.

4 *Ibid.*, p. 44.

5 D. Chahroudi, « Building as Organism », p. 277, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 D. Chahroudi, « La maison organique », trad. de l'anglais par C. Vinsonneau, *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, avril 1978, p. 34-35.

7 *Ibid.*

commercialisé. Parmi de nombreuses autres inventions, Day Chahroudi est également à l'origine du développement des premiers vitrages faiblement émissifs (*Low-E glass*) mis au point au MIT dès 1972¹, qui sont abondamment utilisés aujourd'hui.

La mauvaise fiabilité de certains de ces systèmes, ainsi que l'amélioration de la performance des doubles vitrages et le développement des vitrages faiblement émissifs mis au point par Chahroudi ont vraisemblablement précipité l'abandon de ces techniques dès les années 1980. Néanmoins, les recherches sur ces différents systèmes peuvent être présentées comme des tentatives de résolution technique des antagonismes propres à l'emploi des ouvertures dans les climats froids, tempérés ou secs et soumis à d'importantes amplitudes diurnes de température. Les vitrages y sont à la fois source d'apports et de déperditions favorables et défavorables en fonction de la période considérée². Ces antagonismes se retrouvent dans les différents systèmes : le *Skylid* a été conçu pour limiter les déperditions thermiques tout en admettant les apports solaires favorables et le *Cloud Gel* a été développé dans le but de limiter ses apports jusqu'à une température de référence. Bien que le *Beadwall* nécessite une manipulation et suppose une prise d'information extérieure, le *Skylid* et le *Cloud Gel* fonctionnent de manière automatique, à partir du changement de phase d'un gaz pour le premier et d'une réaction chimique réversible pour le second. Ces différents systèmes cristallisent les fonctions climatiques antagonistes des ouvertures sous l'action de facteurs climatiques variables, qui ont pour conséquence d'inverser régulièrement le gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur des constructions. Ces antagonismes sont centraux dans les techniques solaires passives que nous allons évoquer par la suite.

Les chapitres précédents présentaient le développement des techniques de contrôle climatique au niveau du microclimat, du choix des surfaces, des matériaux, des ouvertures et de leur protection, mais n'abordaient pas les techniques solaires passives de chauffage et de rafraîchissement. À la différence des techniques évoquées précédemment, qui concernent essentiellement la régulation thermique et le contrôle climatique par la protection des constructions, les techniques solaires passives se définissent essentiellement par leur production, soit pour servir au chauffage des constructions pour le confort d'hiver (*passive solar heating techniques*), soit pour servir au rafraîchissement de celles-ci pour le confort d'été (*passive solar*

1 D. Chahroudi, « Free passive solar heating for cold, cloudy winters. Designing molecules and crystal structures », p. 44, in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.

2 R. G. Stein, *Architecture and Energy: Conserving Energy Through Rational Design*, New York : Anchor Books, 1978, p. 65.

cooling techniques). De par ces fonctions, ces techniques sont essentiellement conçues pour des climats tempérés ou ayant des saisons marquées avec des besoins de chauffage ou de rafraîchissement identifiés. L'architecte Mazria affirme que les techniques solaires passives fonctionnent dans tous les climats compris dans la bande située entre le 28° et le 56° parallèle¹, mais certaines de ces techniques peuvent être utilisées à des latitudes plus basses ou plus élevées.

Les techniques solaires passives ont connu un important développement dans la seconde moitié du XX^e sous l'impulsion d'ingénieurs, d'inventeurs, de chercheurs et d'architectes principalement de nationalité américaine et elles ont été très largement diffusées internationalement. La dimension productive des techniques solaires passives étant déterminante, nous avons souhaité détailler dans la mesure du possible les performances des systèmes mentionnés, afin d'étudier leur efficacité réelle et ne pas s'en tenir aux témoignages parfois très subjectifs de techniciens ou d'habitants, que nous avons néanmoins considérés. Quand elles existent, ces données sur la performance des techniques solaires passives publiées à l'époque proviennent de mesures du pourcentage des besoins de chauffage ou de rafraîchissement assuré par une technique dans une construction instrumentée pour l'occasion. Ces données doivent être interprétées avec précaution, car les techniques solaires passives « ont des *spécificités* et des *climats préférentiels d'utilisation*² », comme l'écrivent les architectes Patrick Bardou et Varoujan Arzoumanian. Leurs performances réelles peuvent considérablement varier d'un climat à l'autre. Nous n'avons pas tenu compte du rendement des techniques solaires passives (quotient de l'énergie incidente sur l'énergie transmise) mentionné dans certains ouvrages³, car la notion de rendement issue de la thermodynamique est moins signifiante en ce qui concerne le captage de l'énergie solaire pour les applications thermiques à basse température qui nous occupe ici⁴.

Bien que sujette à des débats, la définition d'une technique solaire passive fait généralement consensus parmi les ingénieurs et les architectes associés à la conception bioclimatique. Une technique solaire de chauffage ou de rafraîchissement est dite « passive » si elle peut fonctionner « sans nécessiter d'apports continus d'énergie non renouvelable⁵ », c'est-

1 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 10.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

3 R. Chareyre, *La Maison autonome*, Paris : Alternative et Parallèles, 1978, p. 50.

4 M. Perrot, *La Houille d'or, ou l'énergie solaire*, Paris : Fayard, (coll. Bilan de la science), 1963, p. 16-17.

5 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 1 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
Traduction personnelle, citation originale : « Passive solar heating and cooling systems may be strictly defined as those which can function without requiring continuous inputs of non-renewable energy. »

à-dire que son fonctionnement ne repose pas sur les systèmes mécaniques moteurs (ventilateurs, pompes...) qu'on trouve dans les techniques conventionnelles de chauffage et de rafraîchissement, mais aussi dans les techniques solaires dites « actives¹ » par opposition aux techniques passives. L'opposition entre techniques passives et actives serait apparue à la fin des années 1930 aux États-Unis, afin de différencier les recherches menées dans les universités sur les capteurs solaires et les systèmes de distribution de la chaleur à eau ou à air, de celles menées parallèlement par les architectes comme George Fred Keck ou Arthur Brown².

L'ingénieur américain Douglas Balcomb, qui a très largement contribué au développement de nombreuses techniques solaires passives, propose de définir « un système de chauffage et de refroidissement solaire passif comme un système dans lequel l'énergie thermique circule par des moyens naturels³ ». C'est cette définition qui a fait autorité à l'époque. Les « moyens naturels » que Balcomb évoque sont essentiellement les phénomènes physiques que nous avons déjà mentionnés, qui sont exploités et favorisés dans ces différentes techniques, afin de servir une fonction déterminée de chauffage ou de rafraîchissement. La convection naturelle de l'air, la conduction et le rayonnement des surfaces, ainsi que les phénomènes de changement de phase, constituent les principaux modes de transfert de l'énergie thermique à l'œuvre dans les techniques solaires passives. Toujours selon Balcomb, le fait que ces techniques mobilisent des phénomènes naturels explique qu'elles « semblent fonctionner relativement bien dans les climats maussades avec une grande quantité d'énergie solaire diffuse⁴ », mais nous verrons que cette affirmation peut être nuancée. Nous aborderons dans un premier temps l'ensemble des techniques solaires passives de chauffage, pour étudier dans un second temps celles dédiées au rafraîchissement des constructions.

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 44.

2 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 28.

3 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) Traduction personnelle, citation originale : « I would define a passive solar heating and cooling system as one in which the thermal energy flows by natural means. »

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « they appear to work relatively well in crummy climates with a great amount of diffuse solar energy »

II.2. Les techniques solaires passives de chauffage et leurs évolutions

Cette partie est consacrée aux développements des techniques solaires passives conçues pour le chauffage des habitations. Elles sont systématiquement mentionnées dans les ouvrages consacrés à la conception bioclimatique ou solaire passive et sont signalées par les différents acteurs avec qui nous avons pu nous entretenir. Bien qu'on trouve l'emploi de techniques solaires passives avant cette période, elles ont principalement été développées dans la seconde moitié du XX^e siècle, notamment aux États-Unis mais aussi en France. Le développement de ces techniques a fait l'objet de recherches historiques menées par Butti et Perlin¹, et plus récemment par Anthony Denzer² et Daniel Barber aux États-Unis³ et par Paul Bouet en France⁴. Notre approche diffère cependant de ces travaux qui se concentrent sur le développement de certaines techniques, puisque nous avons souhaité présenter un inventaire critique complet des techniques solaires passives les plus diffusées durant la période qui nous occupe et nous les avons regroupées en lignées techniques afin de montrer leur évolution.

Ces techniques ont fait l'objet de nombreuses classifications dans les années 1970. Notre approche a consisté à suivre dans les grandes lignes la classification proposée par Balcomb et affinée par les architectes français Marc Vaye et Frédéric Nicolas qui distinguent trois typologies de systèmes selon le positionnement des éléments de captage, de stockage et de distribution de l'énergie solaire⁵. Une première catégorie regroupe les systèmes à gain direct (fenêtres, serres...), où l'énergie solaire est captée dans une pièce ou un volume habitable pour être stockée dans une masse de matériau dans le sens « soleil → espace → masse⁶ ». La seconde catégorie désigne les systèmes à gain indirect, où le flux solaire est capté par une masse de matériau avant d'être transféré à l'espace habitable selon le sens « soleil → masse → espace⁷ ».

1 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit.

2 A. Denzer, *The Solar House: Pioneering Sustainable Design*, op. cit.

3 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit.

4 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 249-263 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit. ; P. Bouet, « Deux maisons solaires sans histoire », *Plan Libre 181*, « Prendre le soleil », mars 2021, p. 12-15.

5 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », n° 192, septembre 1977, p. 28 ; F. Nicolas, M. Vaye, « Recherche sur les enveloppes bioclimatiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit., p. 82-84. Voir également : F. Nicolas, M. Vaye, *Recherches sur les enveloppes bioclimatiques*, Paris : Plan Construction, mars 1977, 110 p. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28.

7 *Ibid.*

La dernière catégorie rassemble les systèmes où l'énergie solaire est captée par un élément séparé (capteur), puis transférée dans un stockage massif afin d'être distribuée sous forme de chaleur sensible, selon le sens « soleil → capteur → masse → espace¹ ». À chacune de ces catégories correspond un rôle déterminé de l'inertie thermique apportée par les matériaux massifs : on peut alors parler d'inertie thermique adjacente dans les systèmes à gain direct, d'inertie intégrée dans les systèmes à gain indirect et d'inertie isolée dans les systèmes de captage séparés. Nous traiterons des techniques solaires passives dans cet ordre en mentionnant, s'il y a lieu, les techniques appartenant à plusieurs de ces catégories.

II.2.1. Les systèmes de captage direct

II.2.1.1. Une utilisation intuitive de l'effet de serre

Les systèmes de captage direct de l'énergie solaire (ou systèmes à gain direct) constituent la forme la plus primitive et la plus simple susceptible d'exploiter l'effet de serre évoqué précédemment. Balcomb propose la définition suivante d'un système à gain direct :

« Le premier type [de système solaire passif] et le plus simple est l'approche à gain direct dans laquelle on a simplement une étendue de vitrage, généralement du verre à double vitrage, face au sud. Le bâtiment doit avoir une masse thermique considérable, soit un sol en béton coulé, soit une construction massive en maçonnerie avec une isolation à l'extérieur. C'est une sorte de capteur solaire habitable². »

Dans un système à gain direct, la fonction de captage n'est pas assurée par un élément séparé mais est une fonction du volume habitable lui-même, et c'est à partir de ce volume que la distribution de la chaleur sensible accumulée est réalisée, essentiellement par convection naturelle. Cette fonction de captage direct peut être réalisée par une fenêtre correctement orientée, et c'est sous cette forme qu'on trouve les premiers emplois intuitifs de l'effet de serre

1 *Ibid.*

2 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 2, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) Traduction personnelle, citation originale : « The first and simplest type is the direct gain approach in which one simply has an expanse of glazing, usually double-pane glass, facing south. The building should have considerable thermal mass, either a poured concrete floor, or a massive masonry construction with insulation on the outside. This is a sort of live-in solar collector. »

en architecture, utilisé dans les *heliocaminus* à l'époque romaine¹. Au XVIII^e et au XIX^e siècle, le développement des techniques de fabrication du verre et le goût pour les serres horticoles privées vont entraîner l'apparition d'un autre système à gain direct, la serre², dont nous traiterons dans un second temps.

La période de développement de l'utilisation de fenêtres et de baies vitrées pour assurer le chauffage d'une pièce habitable peut être située assez précisément. Au tout début du XX^e siècle, l'architecte américain William Atkinson a mené des expérimentations sur l'effet de serre, l'orientation des constructions et les problèmes de planification urbaine, aboutissant à la publication d'un ouvrage consacré à ces sujets en 1912³. Il aurait également construit une « maison solaire⁴ » la même année. Dans les décennies suivantes, l'utilisation de larges baies vitrées orientées au sud dans les constructions de certains architectes modernistes aux États-Unis, comme celles de Walter Gropius, Marcel Breuer⁵ ou Frank Lloyd Wright⁶, plaide en faveur d'une prise de conscience de l'intérêt de ce mode de captage direct de l'énergie solaire. Mais ce sont généralement les réalisations de l'architecte américain George Fred Keck à la fin des années 1930 qui sont véritablement considérées comme les premières « maisons solaires⁷ ». Keck a notamment utilisé les premières baies à double vitrage « Thermopane » commercialisées par la compagnie Libbey-Owens-Ford au milieu des années 1930 et dès 1939 il a conçu la plupart de ses maisons solaires à partir de la prise en compte de la course du soleil pour la conception des protections solaires⁸. George Fred Keck avait eu accès à des données météorologiques nationales relatives à l'ensoleillement par l'intermédiaire de son frère William⁹. L'importance de la commercialisation des baies double vitrage pour le développement des techniques solaires passives est reconnue par Barber¹⁰ ainsi que par Butti et Perlin¹¹, qui ont mené une étude complète de ces réalisations, ainsi que par l'architecte David

1 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 19-20.

2 *Ibid.*, p. 47-53.

3 W. Atkinson, *The Orientation of Buildings: or Planning for Sunlight*, New York : John Wiley & Sons, 1912, 139 p. Voir : K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 176-179.

4 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 179.

5 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 15-21.

6 D. Watson, « Bioclimatic Design Research » in : K. W. Boër (éd.), *Advances in Solar Energy. An Annual Review of Research and Development*, op. cit., p. 404.

7 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 184 ; D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 21-32.

8 *Ibid.*, p. 25

9 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 183.

10 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 9-61.

11 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 185-186.

Roditi¹. Ces travaux confirment la thèse de Yellott à propos de l'importance du verre pour le développement des techniques solaires passives².

Les différentes réalisations de Keck à partir de 1939 sont généralement considérées comme les premières maisons solaires passives, bien que le manque d'inertie thermique et la faible quantité de matériaux massifs dans ces constructions, comme dans d'autres maisons solaires de cette époque, aient été critiqués³. Une étude menée entre 1945 et 1947 par l'ingénieur Francis W. Hutchinson avait mis en évidence l'importante amplitude des températures à l'intérieur des maisons solaires⁴, due au manque de masse thermique d'une part⁵, et à l'absence d'isolation nocturne des vitrages d'autre part⁶. C'est pourquoi d'autres auteurs attribuent à l'architecte Arthur Brown la réalisation de la première maison solaire passive en Arizona en 1945 qui disposait d'une inertie thermique suffisante⁷. Les constructions solaires passives à gain direct se caractérisent généralement par une importante surface de vitrage orientée au sud et protégée de la pénétration du rayonnement solaire en période estivale par un débord de toiture. Les parois et le sol intérieurs sont construits en matériaux massifs (brique, pierre, béton...) qui apportent une inertie thermique à la structure et régulent l'augmentation de la température intérieure provoquée par l'effet de serre⁸. Une fenêtre correctement orientée et donnant sur une pièce ayant une inertie thermique suffisante est présentée comme la technique de captage la plus élémentaire par la majorité des architectes associés à la conception bioclimatique⁹. Jean-Louis Izard affirme que « la baie vitrée constitue le capteur le plus simple et le plus efficace, à condition d'être associée à une forte inertie interne du local adjacent, et de bénéficier de systèmes d'occultation et de protection thermique nocturne¹⁰. »

1 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 27.

2 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 1 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 J. I. Yellott, « Historical and International Perspective for Passive Solar Heating and Cooling », p. 510 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 191-193.

5 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 58-59.

6 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 2 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

7 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 27.

8 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 27.

9 Entretien avec Robert « Bob » Laignelot, le 28/01/2020 à Ventenac-Cabardès ; D. Wright, « L'architecture bioclimatique », p. 68 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit.

10 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 71.

Parmi les réalisations importantes utilisant un système à gain direct, on trouve l'annexe de l'école secondaire de Saint-Georges, construite à Wallasey près de Liverpool en Angleterre par l'architecte Emslie A. Morgan en 1962¹. Malgré le climat tempéré et humide de cette région de l'Angleterre (53° nord), les mesures effectuées ont estimé que le chauffage du bâtiment était assuré à 50 % par le rayonnement solaire, à 34 % par l'éclairage électrique et à 16 % par l'occupation des élèves, bien que des mesures ultérieures aient suggéré que la part des apports solaires était supérieure². La structure du bâtiment est constituée d'un plancher épais en béton, d'un mur en brique isolé au nord et d'une façade en double vitrage orientée au sud, le second vitrage dépoli et diffusant étant positionné à 60 cm du premier afin de ménager un vide d'air entre les deux vitrages³ (*figure 40*). En 1977, ce bâtiment était encore considéré comme « la plus grande structure à chauffage solaire passif au monde et l'une des premières⁴. » Les performances de ce bâtiment ont été reconnues par de nombreux ingénieurs, comme John Yellott⁵ ou Douglas Balcomb, et même par Reyner Banham⁶, qui était pourtant hostile aux techniques solaires passives⁷. Il a été conçu antérieurement au développement de la conception bioclimatique et solaire passive et ce n'est que rétrospectivement que ces performances ont été reconnues, mesurées et diffusées. De par sa morphologie et l'abondante surface de vitrages au sud, ce bâtiment constitue un archétype des systèmes de captage direct.

-
- 1 J. E. Perry Jr., « The Wallasey School », p. 223-237 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 *Ibid.*, p. 224.
 - 3 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 31-33.
 - 4 J. D. Balcomb, « Active and Passive Solar Heating of Buildings », p. 3 in : United Nations Educational and Scientific Organization, North East London Polytechnic (éds.), *International Conference & Exhibition on Solar Building Technology. Provisional Conference Proceedings, London, July 25-29, 1977 at The Royal Institute of British Architects*, 2 vol., Paris/Londres : UNESCO/NELP, 1977. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « the largest passive solar heated structure in the world and one of the first. »
 - 5 J. I. Yellott, « Historical and International Perspective for Passive Solar Heating and Cooling », p. 510 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 6 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 278-282.
 - 7 *Ibid.*, p. 278 ; F. Lopez, *Le Rêve d'une déconnexion : De la maison autonome à la cité auto-énergétique*, Paris : La Villette, 2014, p. 193.

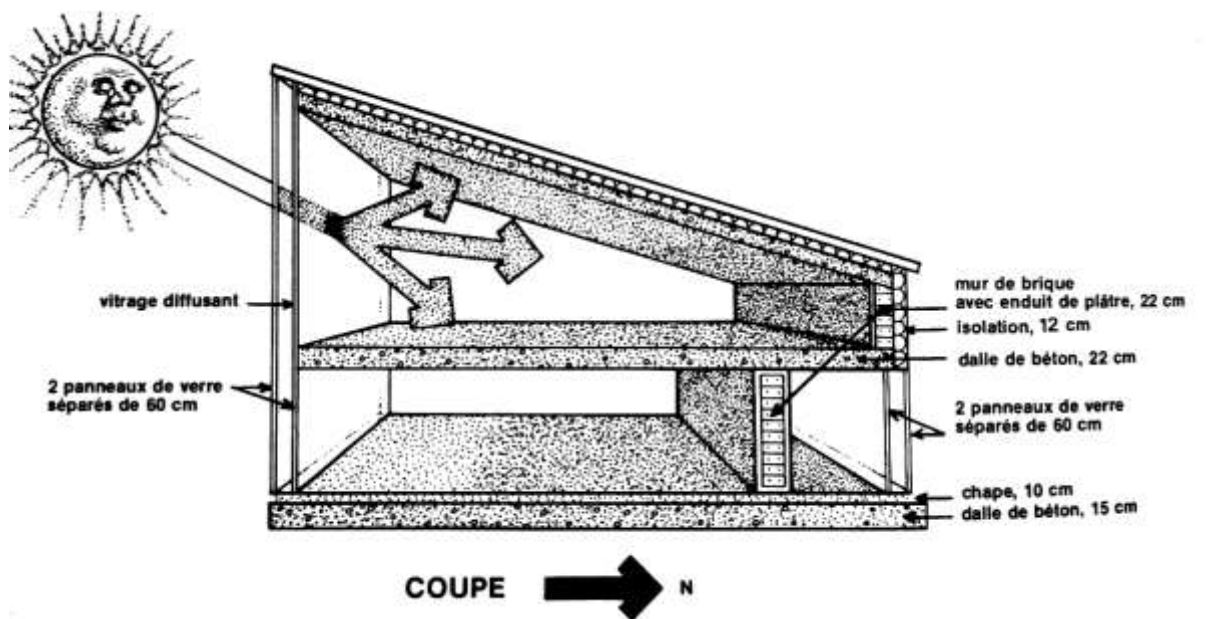


Figure 40 : Coupe schématique de l'annexe de l'école secondaire de Saint-Georges à Wallasey.
(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 32)

II.2.1.2. Améliorer la compréhension des systèmes à gain direct

L'annexe de l'école secondaire de Saint-Georges avait vraisemblablement été conçue sur des bases empiriques et sans règles de dimensionnement. Malgré cette conception intuitive, ce bâtiment avait résolu le problème crucial de l'inertie thermique soulevé par l'emploi d'un système à gain direct et déjà été observé dans les premières maisons solaires. Des matériaux massifs comme le béton et la brique sont appelés à jouer un rôle à la fois statique et thermique dans un système à gain direct et leur volume doit être déterminé en conséquence. Comme l'expliquent les ingénieurs français Michel Rubinstein et Jean-Pierre Lepoivre, « [tout] ou partie du gros œuvre d'une construction passive fait partie, par essence, du système thermique¹ » et cette caractéristique fait que « les composants de ce système thermique [viennent] se confondre avec les composants architecturaux pour former des éléments multifonctionnels² ».

1 M. Rubinstein, J.-P. Lepoivre, « Recherche scientifique et conception architecturale dans le domaine des composants », p. 402 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*

Ces éléments assurent à la fois le captage, le stockage et la restitution de la chaleur accumulée¹. On peut affirmer que la masse de matériau d'une construction équipée d'une technique de captage direct concrétise un ensemble de fonctions à la fois thermiques et statiques, en généralisant le concept de « concrétisation² » proposé par Gilbert Simondon. Selon lui, un objet technique est dit « concret » si « toutes les fonctions que remplit la structure sont positives, essentielles, et intégrées au fonctionnement de l'ensemble³. » Selon cette définition, les techniques solaires passives de captage direct apparaissent comme essentiellement concrètes, dans la mesure où l'ensemble des fonctions thermiques sont intégrées dans les mêmes éléments, qui possèdent également une fonction statique (mur, plancher...).

Cette concrétisation de plusieurs fonctions dans les mêmes éléments complexifie la conception d'un système de captage direct, en plus des problèmes d'isolation thermique, de protection et d'occultation solaire. Dès les années 1970, de nombreuses expérimentations et programmes de recherches ont été menés aux États-Unis, en Israël et en France afin d'établir des règles et des principes pour faciliter le dimensionnement des systèmes à gain direct. Au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa, Givoni a notamment étudié l'intérêt des « fenêtres considérées comme capteurs solaires⁴ ». Pour une fenêtre orientée au sud, il a expérimentalement établi que « [l'augmentation] de la température de l'air intérieur dépend du rapport entre le rayonnement solaire pénétrant par les fenêtres et l'échange de chaleur entre l'air intérieur et les murs⁵. » Pour Givoni, l'intérêt des techniques de captage direct est qu'elles permettent un chauffage instantané « sans le déphasage qui caractérise les autres systèmes de captage et de stockage, en particulier par les murs extérieurs⁶. » Ce faible déphasage peut occasionner des surchauffes et Givoni affirme que pour une pièce habitée il est nécessaire de limiter l'élévation des températures intérieures, afin de ne pas atteindre la limite supérieure de la zone de confort, ce qui diminue corrélativement la quantité de chaleur qui peut être stockée dans les matériaux massifs. Malgré cette limitation, qui tient au fait que l'espace de captage est habitable et doit rester thermiquement confortable, il affirme que « dans les bâtiments lourds en béton, briques ou pierres, la masse totale est si importante que les quantités réelles de chaleur

1 V. Arzoumanian, P. Bardou, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, Thèse 3e cycle Architecture, Unité Pédagogique d'Architecture de Marseille-Luminy, juillet 1978, p. 11. Dir. J.-L. Izard. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 35.

3 *Ibid.*, p. 35.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 401.

5 *Ibid.*, p. 402.

6 *Ibid.*

stockée peuvent être très grandes¹ » et il estime que si « l'amplitude diurne maximale de la température moyenne du bâtiment est de 5 °C, cela signifie que l'on peut stocker environ 1000 kcal par tonne de ce bâtiment². »

Bien qu'elle paraisse rigoureuse, l'estimation proposée par Givoni présuppose que toute la masse d'une construction communique directement avec le système à gain direct, ce qui en pratique n'est jamais réalisé. En effet, une pièce habitée est généralement aménagée avec du mobilier, des moquettes ou des revêtements qui constituent autant de surfaces isolantes qui limitent la surface en contact avec l'air intérieur échauffé par effet de serre. Au début des années 1980, Balcomb a ainsi mis en évidence le fait que l'inertie thermique d'une construction pouvait être augmentée ou au contraire considérablement réduite en fonction du mobilier et du choix des surfaces intérieures³, ce qui confirmait des observations déjà faites en architecture tropicale⁴. Les recherches sur le dimensionnement des systèmes à gain direct ont été poursuivies à la suite de Givoni, notamment aux États-Unis sous l'impulsion de l'architecte américain Edward Mazria qui a produit une analyse complète des systèmes à gain direct et a émis des recommandations relatives à leur conception. Ces recommandations sont présentées dans l'important manuel consacré à la conception solaire passive qu'il publie en 1979⁵. Mazria s'appuie sur des mesures de constructions existantes et sur les connaissances acquises grâce « aux bâtiments existants qui utilisent de grandes surfaces vitrées au sud pour capter le soleil d'hiver⁶ ». Il affirme que « le facteur le plus important pour le *captage* de l'énergie solaire est la superficie et l'emplacement des parois vitrées⁷. » À partir des résultats obtenus, Mazria propose des règles de dimensionnement des ouvertures en fonction du type de climat :

« Dans les climats froids (moyenne des températures hivernales comprise entre – 7 °C et – 1 °C) il faut compter de 0,19 à 0,38 m² de vitrage sud par m² de surface de plancher. Dans les climats tempérés (moyenne des températures hivernales comprise entre + 2 °C et + 7 °C) il faut compter de 0,11 à 0,25 m² de vitrage sud par m² de surface de plancher. De telles proportions de vitrages

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 J. D. Balcomb, « Heat Storage Duration », p. 48 in : J. Hayes, W. A. Kolar (éds.), *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference, September 8-12, 1981, Portland, Oregon*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1982.

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 120.

5 E. Mazria, *The Passive Solar Energy Book: A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design*, *op. cit.*

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 98.

7 *Ibid.*, p. 99.

solaires permettront un captage suffisant pour maintenir une température moyenne de + 18 °C à + 21 °C pendant la plus grande partie de l'hiver¹. »

Ces recommandations précises donnent une première estimation au concepteur pour le dimensionnement des ouvertures dans un système à captage direct. Ces valeurs peuvent paraître faibles, mais Mazria insiste sur la tendance au « surdimensionnement² » qu'il a pu observer dans la conception des systèmes à gain direct et qui est préjudiciable pour le confort intérieur.

Comme Givoni et Balcomb, Mazria insiste sur le fait que « [le] stockage et la gestion de la chaleur dans la maçonnerie d'un bâtiment constitue le problème essentiel auquel se heurte l'auteur d'un projet à apports directs³. » Pour illustrer ce problème, il présente les courbes de l'amplitude diurne des températures intérieures d'un local chauffé par un système à captage direct pour trois configurations et pour différentes épaisseurs de maçonnerie (10, 20 et 40 cm). Ces résultats provenaient d'une étude collective menée à l'Université de l'Oregon en 1976⁴. Dans le premier cas, l'aire de la zone exposée au rayonnement direct est une fois et demie supérieure à la surface des vitrages⁵, dans le deuxième cette aire est trois fois supérieure à celle des vitrages⁶, et dans le troisième celle-ci est neuf fois supérieure⁷. Dans la première configuration, il affirme que l'amplitude diurne des températures intérieures est importante (22 °C) et qu'une « augmentation de l'épaisseur de maçonnerie au-delà de 20 cm n'améliore que peu la gestion des apports solaires directs⁸ ». Il fait le même constat dans la seconde configuration, bien que l'amplitude des températures soit plus faible⁹. Dans le dernier cas, il affirme qu'une épaisseur de 10 cm de maçonnerie est suffisante et que celle-ci réduit l'amplitude des températures intérieures à 7 °C, ce qu'il estime être « acceptable¹⁰ ».

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la diffusion du rayonnement solaire dans un système de captage direct, afin d'uniformiser le stockage de la chaleur dans les éléments

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 98.

3 *Ibid.*, p. 109.

4 *Ibid.*, p. 110. Voir également : E. Mazria, « A Design Sizing Procedure for Direct Gain, Thermal Storage Wall, Attached Greenhouse, and Roof Pond Systems », p. 390-392, E. Mazria, S. Baker, F. Wessling, « Predicting the Performance of Passive Solar Heated Buildings – A Two-Year Study », p. 393-397 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

5 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 111.

6 *Ibid.*, p. 112.

7 *Ibid.*, p. 113.

8 *Ibid.*, p. 111.

9 *Ibid.*, p. 112.

10 *Ibid.*, p. 113.

de construction massifs (plancher, mur, plafond...). Ils complètent ceux obtenus par Givoni qui estimait qu'un plancher massif en béton de couleur sombre pouvait constituer un élément de stockage thermique satisfaisant¹. Les résultats montrent que dans le cas d'un plancher sombre exposé au rayonnement solaire direct et non diffusé, la température de la surface des zones insolées s'élève considérablement sans se diffuser uniformément dans l'épaisseur du plancher, ce qui limite le stockage thermique². C'est pourquoi Mazria recommande d'utiliser des couleurs sombres pour les surfaces nécessairement exposées au rayonnement solaire, comme les planchers, mais suggère d'utiliser des couleurs claires pour les autres éléments, comme le plafond, afin de réfléchir le rayonnement solaire³. Les résultats obtenus par Mazria montrent également que seuls les dix ou vingt premiers centimètres d'un matériau massif participent effectivement à l'inertie thermique dans un système à gain direct, ce qui nuance l'affirmation de Givoni qui considère que la « structure d'un bâtiment peut emmagasiner 200 kcal/°C par tonne de sa masse⁴ ». Contrairement à ce qu'affirme Givoni ce n'est pas tout le volume de matériau massif qui participe effectivement au stockage thermique, mais seulement une épaisseur de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Des mesures effectuées au début des années 1980 dans les maçonneries en terre d'un système à captage direct à Toulouse tendent à confirmer les résultats de Mazria : seuls les premiers centimètres présentaient une élévation sensible de température⁵.

Mazria a également étudié d'autres systèmes de captage direct comme les claires-voies et les lanterneaux, qui permettent un captage direct en toiture quand « il n'est pas possible ou souhaitable de capter le soleil à travers les fenêtres sud⁶ », mais qui peuvent aussi servir à distribuer la lumière naturelle. Ces systèmes ont été employés dans le but de capter le rayonnement solaire dans des pièces orientées au nord. Une claire-voie est par exemple utilisée dans la *Suncatcher House* (littéralement « Maison capteur de soleil »), qui est une construction expérimentale des architectes américains Jonathan Hammond et James Plumb réalisée en 1978 à Sacramento (38° nord). Le dimensionnement du système de claire-voie protégé par un débord de toiture permet d'admettre le rayonnement solaire uniquement en période hivernale (*figures 41 et 42*). Le stockage thermique est assuré par un ensemble de fûts remplis d'eau. Les

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 402.

2 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 114.

3 *Ibid.*, p. 116.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 390.

5 Entretien avec Joseph Colzani, le 20/06/2019 à Lavalette.

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 103.

architectes affirment que l'utilisation d'une claire-voie « augmente le rayonnement disponible de 50%¹ » et « permet un placement plus flexible de la masse thermique en dirigeant la lumière du soleil vers des zones éloignées du mur sud de la maison². » Le principe des lanterneaux et des claires-voies a été repris par Gerber pour assurer l'éclairage naturel de nombreuses constructions publiques et privées.

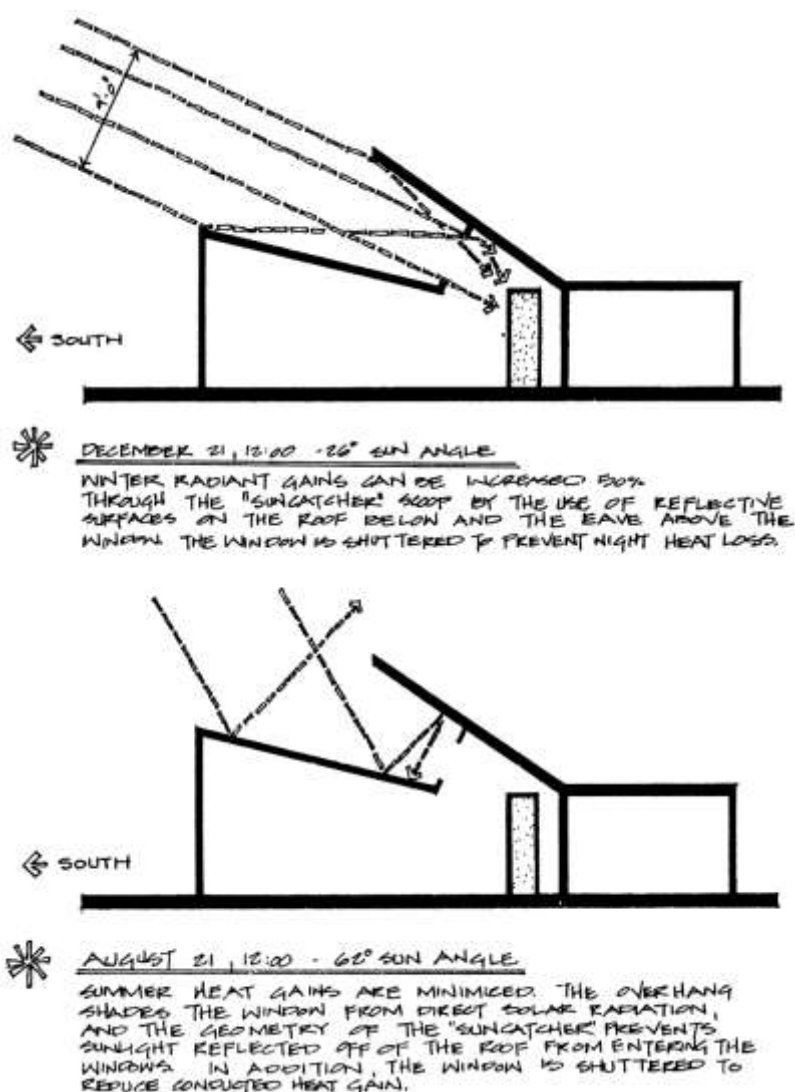


Figure 41 : Principe de claire-voie de la Suncatcher House.

(J. Hammond, J. Plumb, « The Suncatcher Tour House », p. 889 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off: Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference: January 11-13, 1979, San Jose, California*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1979)

- 1 J. Hammond, J. Plumb, « The Suncatcher Tour House », p. 888 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille).
- 2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « First, it increases available radiation by 50%; and second, it allows more flexible placement of thermal mass by directing the sunlight to areas away from the house's south wall. »



Figure 42 : Suncatcher House de J. Hammond et J. Plumb.

(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 189)

II.2.1.3. La serre, une pièce dédiée au captage direct

Un autre système de captage direct étudié non seulement par Mazria, mais par de très nombreux architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive est la serre. Connue depuis le XVII^e siècle, l'utilisation des serres s'est développée au XIX^e siècle avec la construction des serres monumentales et a conduit à des études approfondies sur leur orientation¹. La serre est, dans les principes physiques qu'elle mobilise, une extension de la fenêtre comme système de captage direct et appartient à la même lignée technique, à l'exception du fait qu'elle n'est pas conçue comme un espace habitable toute l'année et durant les périodes où l'ensoleillement est important². Elle peut également être un espace horticole et propice au jardinage, bien que les conditions microclimatiques nécessaires à la croissance des plantes

1 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 310-313.

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 75.

soient « très différentes de celles demandées à l'intérieur d'un abri pour hommes¹ » comme le rappelle l'ingénieur Robert Chareyre. Étant donné qu'elles peuvent être construites comme des structures autoportantes, les serres ont été privilégiées par les architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive pour la rénovation² (*passive solar retrofit*) et on trouve de très nombreuses réalisations de ce type en France. Une serre permet également d'assurer la fonction d'espace-tampon, comme l'explique la brochure *Construire avec le climat* :

« Au même titre qu'un garage ou qu'un cellier, [la serre] va réguler à l'intérieur du logement les variations de la température extérieure et donc jouer un rôle de sas thermique. Sans ensoleillement, pour 0°C extérieur, il fait 10°C au minimum dans une serre double vitrage³. »

Cependant, le contrôle thermique d'une serre est nettement plus complexe que dans les autres systèmes de captage direct puisqu'elle fonctionne « comme un "espace amplificateur" des oscillations thermiques extérieures⁴ » comme l'explique Izard. Une serre peut augmenter considérablement l'amplitude diurne des températures intérieures sous l'action de l'effet de serre qui tend à élever les maxima par rapport à l'extérieur. À cause de ce phénomène « d'amplification », Izard affirme que « la serre est un système à mettre en œuvre avec prudence car ses comportements sont opposés entre le jour et la nuit d'une part, l'hiver et l'été d'autre part⁵ », ce qui explique l'importance cruciale d'associer son utilisation à des matériaux massifs afin de bénéficier d'une inertie thermique suffisante. La serre illustre les antagonismes que nous avons évoqués précédemment à propos des ouvertures, à la fois source d'apports et de déperditions.

En ce qui concerne la conception des serres, certaines règles avaient été mises au point dès les années 1970 et étaient connues des architectes et des ingénieurs, comme le fait de protéger les parties est et ouest de la serre avec des murs massifs⁶ tout en ménageant des ouvertures latérales et en hauteur pour la ventilation⁷. Ces recommandations provenaient vraisemblablement de Balcomb et de l'architecte américain Bill Yanda qui a contribué à

1 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 104.

2 J. D. Balcomb, « State of the Art in Passive Solar Heating and Cooling », p. 5 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, « La Serre », op. cit., n. p.

4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 73.

5 *Ibid.*, p. 71.

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 141.

7 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

développer l'emploi des serres dans les constructions solaires passives aux États-Unis¹ comme en France². Mazria a utilisé des serres dans des opérations de rénovation³, et a proposé un certain nombre de prescriptions en vue de leur conception. S'il admet que la « nature complexe des échanges thermiques entre une serre attenante et l'habitation arrière rend difficile l'évaluation précise des dimensions et des performances d'une serre comme procédé de chauffage⁴ », il propose néanmoins les règles de conception suivantes :

« Étirez la serre le long de la façade sud délimitant les locaux que vous souhaitez chauffer. Dans les climats froids, prévoyez entre 0,65 et 1,50 m² de double vitrage sud (de serre) par m² de surface habitable (adjacente à la serre). Dans les climats tempérés, prévoyez entre 0,33 et 0,90 m² de vitrage sud par m² habitable (hors serre). Cette surface de vitrage captera suffisamment de chaleur au cours d'un jour d'hiver ensoleillé pour maintenir à la fois la serre et les pièces arrière à une température moyenne de 15 à 21 °C⁵. »

Bien que ces recommandations permettent de dimensionner approximativement la surface d'une serre, des critères de conception importants, comme l'angle d'inclinaison des vitrages, ne sont pas donnés par Mazria. Malgré la relative précision des valeurs qu'il propose, le choix de nombreux paramètres était donc laissé à l'appréciation du concepteur et ce n'est qu'au début des années 1980 que des règles pour déterminer l'angle d'inclinaison des serres en fonction du climat ont été proposées⁶. D'une manière générale, le comportement thermique des serres était considéré comme trop complexe à anticiper précisément et la conception des serres restait encore largement expérimentale durant cette période⁷. Nous reviendrons par la suite sur la fonction assurée par la serre dans les constructions bioclimatiques et sur les limites de ce système, dans la mesure où son utilisation a été considérée comme un symbole de ces constructions.

-
- 1 B. Yanda, « An Overview of Solar Construction Workshops », p. 26-28 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 2 B. Yanda, R. Fisher, *The Food and Heat Producing Solar Greenhouse: Design, Construction, Operation*, Santa Fe : John Muir, 1976, 161 p. trad. *Une Serre solaire pour chauffer votre maison et pour jardiner toute l'année*, Paris : Eyrolles, trad. de l'américain par R. Célaire, 1981, 148 p.
 - 3 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 140.
 - 4 *Ibid.*, p. 138.
 - 5 *Ibid.*, p. 138-139.
 - 6 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, Paris/Aix-en-Provence : Pyc/Édisud, 1981, p. 51-52.
 - 7 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 155.

II.2.1.4. Maximiser le rôle de l'inertie thermique dans les systèmes de captage direct

Un problème commun à l'ensemble des systèmes de captage direct est la nécessité de maximiser l'inertie thermique de la construction, ce qui a conduit certains architectes à employer des bidons ou des fûts remplis d'eau, notamment dans les serres, en plus des matériaux massifs conventionnels (terre, béton, pierre...). Comme de nombreux architectes, ingénieurs et techniciens, Mazria considère que « l'eau est plus efficace que les matériaux habituels de construction pour stocker la chaleur¹ », grâce à son importante capacité thermique massique, qui est environ cinq fois supérieure à celle du béton, et du fait qu'une masse d'eau s'échauffe uniformément par mouvements de convection². Il donne des recommandations relatives aux volumes d'eau afin d'atténuer l'amplitude des températures intérieures pour un « mur d'eau³ » placé dans une pièce et dans une serre⁴. Elles montrent que l'amplitude diurne des températures intérieures réduit à mesure que le volume d'eau utilisé augmente : on peut en déduire qu'il est toujours préférable de maximiser le volume d'eau dans une technique de captage direct. En plus de l'air, l'eau peut donc être considérée comme un matériau de construction à part entière dans les constructions bioclimatiques et solaires passives. Nous aurons l'occasion de mentionner ses très nombreuses applications dans les techniques solaires passives de chauffage et de rafraîchissement par la suite.

Étant donné les propriétés thermiques exceptionnelles de l'eau et le besoin d'inertie thermique dans les systèmes à gain direct, les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont dès le début des années 1970 généralisé l'emploi de l'eau dans les constructions dans des proportions inédites. Des fûts remplis d'eau ont été installés dans les maçonneries de nombreuses constructions solaires passives, comme celles de l'architecte David Wright situées dans l'État du Nouveau-Mexique. Ils sont généralement intégrés dans le mobilier (banquette, garde-corps...) et recouverts d'un enduit. Dans la maison *Sunscoop* construite en 1973, le muret supportant les imposants vitrages du système de captage direct « contient huit fûts métalliques de 200 litres, remplis d'eau additionnée d'anti-corrosif, qui sont entièrement

1 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 119.

2 *Ibid.*, p. 119.

3 *Ibid.*, p. 120.

4 *Ibid.*, p. 167.

recouverts de briques d'adobe¹ » et qui apportent 1,6 tonne d'eau aux 140 tonnes de la structure en brique de terre crue² (figure 43). Ce muret sert de banquette intérieure (figure 44). L'inertie thermique de la *Suncatcher House* que nous avons évoquée est aussi assurée par des bidons et des tuyaux remplis d'eau intégrés dans le mobilier³ (assises, bureau...).



Figure 43 : Maison Suncoop de D. Wright à Santa Fe.

(N. Skurka, J. Naar, *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, New York : Ballantine Books, 1976, n. p. ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 65)



Figure 44 : Intérieur de la maison Suncoop.

Le muret en allège qui sert de banquette cache huit fûts de 200 litres remplis d'eau.

(N. Skurka, J. Naar, *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, New York : Ballantine Books, 1976, n. p.)

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 67.

2 *Ibid.*, p. 69.

3 J. Hammond, J. Plumb, « The Suncatcher Tour House », p. 888 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

En France, l'architecte Michel Gerber a employé des fûts et des réservoirs d'eau pour améliorer l'inertie thermique dans ses systèmes à gain direct et notamment dans les serres de ses constructions. Dans la maison *L'Estradelle* située dans les Corbières, qui est la réhabilitation d'une ancienne bergerie achevée en 1977, il explique que « [les] masses thermiques sont les rochers et les murs en pierre, mais aussi un réservoir d'eau de 5000 litres ; cette eau provient de la récupération des eaux de pluie à partir du toit de la construction et de la serre¹. » Dans la maison des *Perdrigals*, une autre rénovation terminée en 1979 sur un site tout proche, « la façade largement vitrée capte l'énergie solaire qui tombe sur une colonne d'eau de 5 m³ qui représente un stockage rapide (plus rapide que la pierre ou le béton²) » (*figure 45*). Mais le choix de concentrer une masse d'eau dans un seul volume compact est cependant critiquable du point de vue thermique, puisque la surface d'échange avec l'air intérieur est minimale³. L'ingénieur Robert Chareyre recommande de « fractionner les masses thermiques intérieures⁴ » et affirme qu'il faut mieux employer « 5 bidons de 200 litres [plutôt] qu'un seul de 1000 litres⁵ ». Gerber a respecté cette recommandation dans une autre maison qu'il a réalisée à Ginestas dans l'Aude en 1979 : des bidons remplis d'eau sont placés dans la partie supérieure de la serre afin d'accumuler la chaleur en journée. De nuit, les bidons sont isolés de l'extérieur par un volet roulant et fonctionnent comme un « radiateur solaire⁶ » selon l'expression de Gerber (*figure 46*). Des contenants remplis d'eau ont aussi souvent été utilisés dans les techniques de captage indirect.

1 M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 65.

2 M. Gerber, « Architecture Bioclimatique dans les Corbières », p. 75 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, *op. cit.*, p. 66.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 M. Gerber, « Toward a Bioclimatic Architecture », p. 670 in : J. Hayes, W. A. Kolar (éds.), *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference*, *op. cit.*



Figure 45 : *Colonne d'eau de 5 m³ dans la maison des Perdrigals de Michel Gerber.*
 (M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », n° 325, juin-juillet 1979, p. 66)

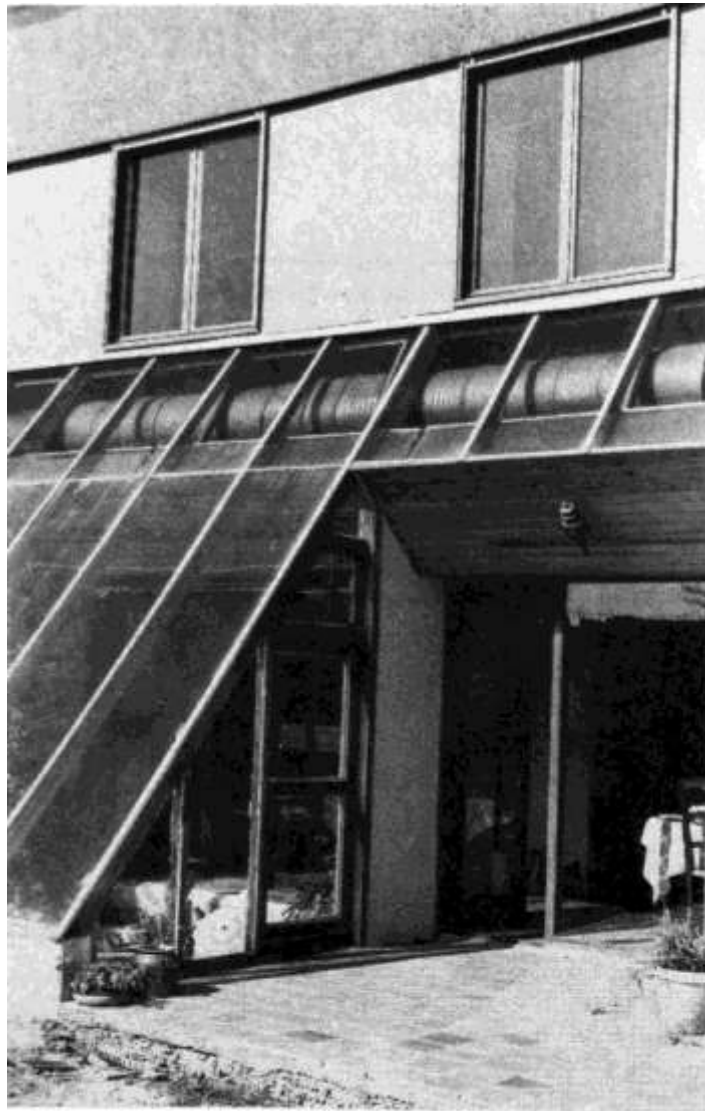


Figure 46 : « *Radiateurs solaires* » de M. Gerber en partie supérieure de la serre d'une maison à Ginestas.
 (D. Roditi, *Le Catalogue des outils solaires*, Paris : Alternative et Parallèles, 1980, p. 64)

Malgré l'abondance de leur emploi, les systèmes à gain direct ont fait l'objet de quelques critiques de la part de certains ingénieurs et architectes qui doutaient de la performance de ce type de technique solaire passive¹, et de la légitimité à l'employer dans certains climats trop ensoleillés. Dans une communication faite en 1980 et intitulée de manière polémique « Le Rôle secondaire des fenêtres sud », le chimiste Harold Hay critique ouvertement les systèmes à gain direct. Il affirme :

« Le chauffage solaire du mur sud est une réponse pratique surestimée de la part des partisans provinciaux des solutions faciles. Dans les climats nordiques, où le refroidissement est un problème mineur, le gain direct a de sérieuses limites ; dans les régions où le refroidissement est un problème majeur, le gain direct n'est pas le bienvenu². »

Hay reproche aux techniques à gain direct de ne pas être adaptées au contrôle climatique dans les climats contraignants. Cette critique est justifiée par le fait qu'il était familiarisé avec les problèmes de surchauffe posés dans les climats tropicaux et qu'il était avant tout préoccupé par le développement des techniques solaires passives de rafraîchissement et de climatisation naturelle à captage indirect, utilisant notamment la toiture des constructions. À travers cette critique, Hay veut souligner qu'il n'existe pas de « solutions faciles » et que les techniques solaires passives aussi simples soient-elles ne sont pas pour autant reproductibles dans tous les climats, où les besoins de chauffage et de rafraîchissement sont nécessairement différents et mobilisent d'autres éléments pour le contrôle climatique (toiture, végétation...).

Un autre problème des systèmes à gain direct découvert à la même période concerne le contrôle de la luminosité et des apports de lumière naturelle, qui peuvent être source de nuisances pour l'habitant. Ce point est mentionné par Gerber, dont les réalisations à partir des années 1980 prennent particulièrement en compte le contrôle de la lumière naturelle, notamment par l'utilisation de lanterneaux. En 1982, il affirme :

« Le gain direct, système solaire passif le plus largement utilisé, peut poser un problème de confort visuel si on néglige la composante lumineuse de l'énergie solaire (intensité, reflet).

1 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 77.

2 H. R. Hay, « The Secondary Role of South Windows », p. 58 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille). Traduction personnelle, citation originale : « South-wall solar heating is an overemphasized convenience-response from provincial advocates of easy solutions. In northern climates, where cooling is a minor problem, direct gain has serious limitations; in regions where cooling is a major problem, direct gain is unwelcome. »

Après nos premières réalisations des *Perdrigals* et de Ginestas, nous nous sommes rendu compte que la pénétration d'une grande intensité lumineuse à travers les ouvertures sud pouvait être source de certains désagréments, surtout dans nos régions méditerranéennes. La façon dont on va amener et diriger la lumière dans un bâtiment est un élément important de l'architecture et la préoccupation énergétique doit composer avec ces demandes de l'habitabilité¹. »

Cette critique concerne l'utilisation des systèmes à gain direct dans les climats caractérisés par un ensoleillement important. Des critiques analogues ont été formulées par Izard à l'égard des serres et de leur emploi dans les climats très ensoleillés comme le climat méditerranéen. Il estime que ce mode de captage « semble être plus adaptée aux climats où domine le rayonnement diffus et où le rayonnement terrestre est moins intense². » Le problème de la multiplication des serres indépendamment du climat sera également évoqué par Izard et plus tardivement par Georges et Jeanne-Marie Alexandroff³.

L'ensemble de ces critiques ont pu conduire les concepteurs à privilégier des systèmes de captage indirect, où la chaleur produite par le rayonnement solaire est transmise à l'espace par conduction, convection ou rayonnement selon la progression « soleil → masse → espace⁴ ». Dans ces systèmes, la fonction du matériau qui assure le captage et la transmission de la chaleur est cruciale. Ces techniques permettent un meilleur contrôle des apports solaires, mais peuvent être en contrepartie plus complexes à concevoir, à construire et à comprendre.

II.2.2. Les systèmes de captage indirect

II.2.2.1. Les recherches sur les systèmes de captage indirect à faible inertie

Les systèmes de captage indirect (dits aussi à « gain indirect ») se caractérisent par le fait que l'énergie thermique n'est pas directement captée dans un espace, mais est d'abord accumulée dans un ou plusieurs matériaux, avant d'être transmise par convection, conduction

-
- 1 M. Gerber, « Utilisation de l'énergie solaire : lumière et chaleur », p. 253 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 75.
 - 3 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 155.
 - 4 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28.

et rayonnement vers l'espace à chauffer. La plupart des systèmes de captage indirect utilisent plusieurs de ces modes de transmission de la chaleur, notamment la convection et le rayonnement dans l'infrarouge lointain. Selon cette définition, un simple mur massif non isolé et suffisamment exposé au rayonnement solaire constitue une forme très primitive de système de captage indirect pour le chauffage. En 1972, les architectes du Groupe A.B.C. ont ainsi imaginé un système de captage indirect pour le climat méditerranéen, composé d'un simple mur massif équipé de lames horizontales pivotantes afin de contrôler les apports solaires¹. Mais selon Chareyre, un simple mur bien exposé ne constitue pas véritablement un système de captage, puisque le rendement moyen de ce type de système est très faible et varie théoriquement entre 8 et 14 %². Ceci explique qu'un mur massif, bien que correspondant aux critères d'un système indirect dans la mesure où celui-ci transmet toujours vers l'intérieur une part même infime de l'énergie thermique qu'il accumule, peut être considéré comme un système de protection et non de captage dans les climats tempérés. Protection et captage indirect peuvent être pensés comme deux comportements thermiques antagonistes, qui vont notamment dépendre de la surface extérieure, de l'épaisseur et des matériaux qui composent l'élément exposé.

On peut catégoriser les systèmes à gain indirect en deux groupes : les systèmes de captage indirect à faible inertie thermique et ceux à forte inertie, on parle alors de « murs capteurs³ ». Nous aborderons les techniques de captage direct avec inertie dans un second temps, dans la mesure où leur invention a vraisemblablement été déduite des systèmes à faible inertie qui constituent la lignée technique principale. Un des premiers systèmes de captage indirect est vraisemblablement issu des recherches menées par le chimiste français Félix Trombe (1906-1985), qui est une figure iconique et internationalement reconnue des recherches sur les applications de l'énergie solaire⁴, notamment grâce au fameux mur Trombe qui a été très largement diffusé⁵. Il est à l'origine de multiples brevets et ses recherches couvrent à la fois les applications directes de l'énergie solaire pour les basses et les hautes températures. Dès le début

1 Groupe A.B.C., « Conception d'une architecture et d'un urbanisme adaptés au milieu méditerranéen », *Options méditerranéennes*, n°13, juin 1972, p. 94-102. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 54-55.

3 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 75-82.

4 Sur Félix Trombe et l'importance de ses recherches, voir : P. Teissier, « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo », p. 181-219 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, op. cit.

5 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 249-263 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

des années 1950, Trombe a expérimenté des systèmes de refroidissement par rayonnement de grande longueur d'onde, ainsi que des capteurs solaires pour le chauffage nommés « récupérateurs à air chaud¹ », au laboratoire de Mont-Louis dans les Pyrénées-Orientales où il s'installe en 1949. Ces capteurs sont formés d'une plaque métallique sombre située derrière un caisson vitré, qui est lui-même positionné en façade et percé de fentes en partie inférieure et supérieure afin de réchauffer l'air intérieur de la pièce à chauffer uniquement par convection naturelle². Le principe de ce système est présenté dans un brevet déposé par Trombe en 1956 avec le CNRS et intitulé « Dispositifs pour la climatisation naturelle des habitations », où il est appliqué pour le chauffage d'une maison de plain-pied³. Ce dispositif utilise un principe déjà breveté en 1881 par le naturaliste américain Edward S. Morse (1838-1925) pour le chauffage des habitations à l'aide de capteurs vitrés positionnés en façade⁴ (*figure 47*). Bien que Trombe n'ait vraisemblablement jamais eu connaissance de l'invention de Morse, l'antériorité de son invention a cependant été contestée⁵, et l'utilisation de l'expression « mur Morse/Trombe » par certains auteurs doit être signalée.

Ce système redécouvert par Trombe a été progressivement affiné. En 1958, Trombe et Charles Henry la Blanchetais détaillent le principe de leur « récupérateur à air chaud » lors d'un colloque international organisé à Mont-Louis sur les *Applications de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*⁶. Leur approche des échanges thermiques, notamment des phénomènes d'échauffement et de refroidissement des surfaces, s'inscrit indirectement dans la continuité de celle des microclimatologues. Ils estiment par exemple que la température de l'air « n'est qu'un reflet affaibli de la température du sol⁷ » et insistent sur l'importance du choix des types de surface dans les systèmes de captage indirect. Ils détaillent des mesures

1 *Ibid.*, p. 253.

2 *Ibid.* ; P. Teissier, « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo », p. 181-201 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, op. cit.

3 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 253 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

4 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 197-200.

5 J. I. Yellott, « Historical and International Perspective for Passive Solar Heating and Cooling », p. 510 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Sur la climatisation naturelle des maisons. A) Généralités et méthodes de chauffage par le rayonnement solaire », p. 653-668 in : Centre National de la Recherche Scientifique (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, Montlouis, 23-28 juin 1958*, [1ère éd. 1961], Paris : Centre National de la Recherche Scientifique, 1976. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

7 *Ibid.*, p. 657.

effectuées avec les « récupérateurs à air chaud » lors d'expérimentations menées au laboratoire de Mont-Louis en décembre 1957, qui mettent en évidence qu'un capteur à simple vitrage de 10 m² permet d'élever la température d'un local inoccupé de 75 m³ de 12 à 14 °C en moyenne¹. Ils affirment que près de 80 m² de ces capteurs ont déjà été installés à Mont-Louis².

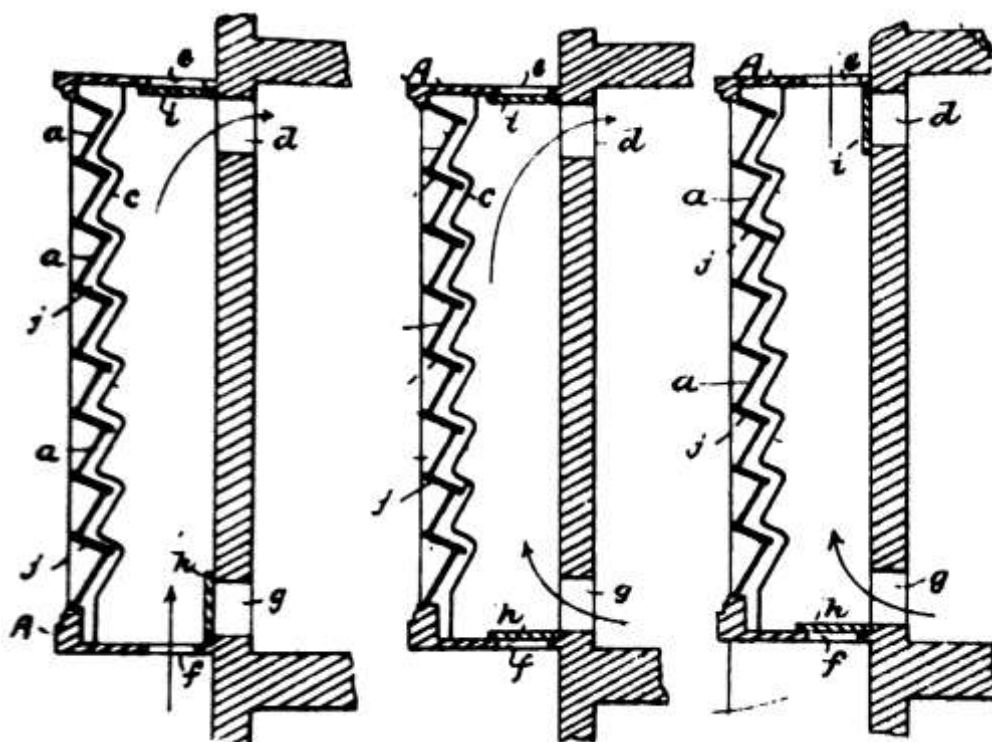


Figure 47 : Capteur inventé par E. S. Morse et breveté en 1881.

(K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1980, p. 198)

En 1961, lors d'un important congrès international consacré aux *Sources nouvelles d'énergie*, Trombe et La Blanchetais développent les applications possibles de ce système pour le chauffage « des habitations dans les pays à ciel clair³ », ces régions étant caractérisées « par de grands ensoleillements, un air très sec et une grande variation de température entre le jour et la nuit⁴. » Ils considèrent que l'utilisation d'un système de captage indirect à faible inertie est

1 *Ibid.*, p. 666.

2 *Ibid.*, p. 667.

3 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 110 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 6, Solar Energy : III, New York : United Nations, 1964. (Archives Nations Unies – en ligne)

4 *Ibid.*

profitable dans ce type de climat, afin de transférer rapidement l'air échauffé dans le capteur vers l'espace à chauffer¹. Ils évoquent des expérimentations faites à Mont-Louis avec des capteurs composés de plusieurs plaques de tôle exposées au rayonnement solaire derrière un vitrage. Leurs résultats montrent que la température de l'air à l'intérieur des capteurs augmentait rapidement de 14 à 38 °C au contact d'une seule plaque et de 14 à 47 °C avec plusieurs plaques parallèles². Ils proposent d'installer ces capteurs en façade et « en dessous de la pièce à chauffer³ » afin de profiter de l'élévation naturelle de l'air échauffé (*figure 48*).

La construction du four solaire d'Odeillo-Font-Romeu (42° nord) à quelques kilomètres de Mont-Louis dès l'année 1962 a été l'occasion de tester ce système de captage indirect à faible inertie. Il est intégré au mur-rideau des façades est, sud et ouest du four solaire, conçu en collaboration avec l'ingénieur Henri Vicariot. Ce « mur-rideau chauffant⁴ » est composé d'une tôle noire en inox recouverte d'un vitrage et placé en allège : l'air de la pièce est censé circuler derrière la tôle selon un mouvement descendant, puis devant celle-ci selon un mouvement ascendant afin de réchauffer la pièce sous l'effet du rayonnement solaire⁵ (*figure 49*). Grâce à cette chicane, ce système de chauffage possède l'avantage de ne pas être réversible : en période nocturne ou peu ensoleillée, l'air peut se refroidir par convection au contact du vitrage suivant un mouvement descendant, mais celui-ci aura tendance à stagner au fond du capteur, ce qui bloque l'entretien de ce phénomène de refroidissement et limite l'abaissement de la température intérieure⁶. Afin de limiter les surchauffes, la face arrière de la tôle présente une surface réfléchissante et la plaque de tôle peut être manuellement retournée en été afin de réfléchir le rayonnement solaire et limiter l'échauffement de l'air.

1 *Ibid.*, p. 111.

2 *Ibid.*, p. 121.

3 *Ibid.*, p. 113.

4 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 255-256 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

5 R. Peyturaux, *L'Énergie solaire*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1968, p. 97.

6 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 113 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

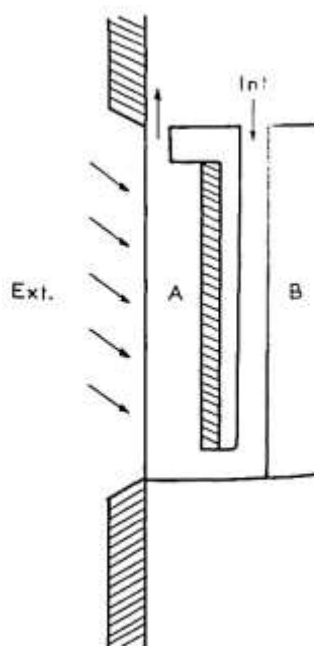


Figure 48 : Schéma du capteur de F. Trombe.

(F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 114 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 6, Solar Energy : III, New York : United Nations, 1964)

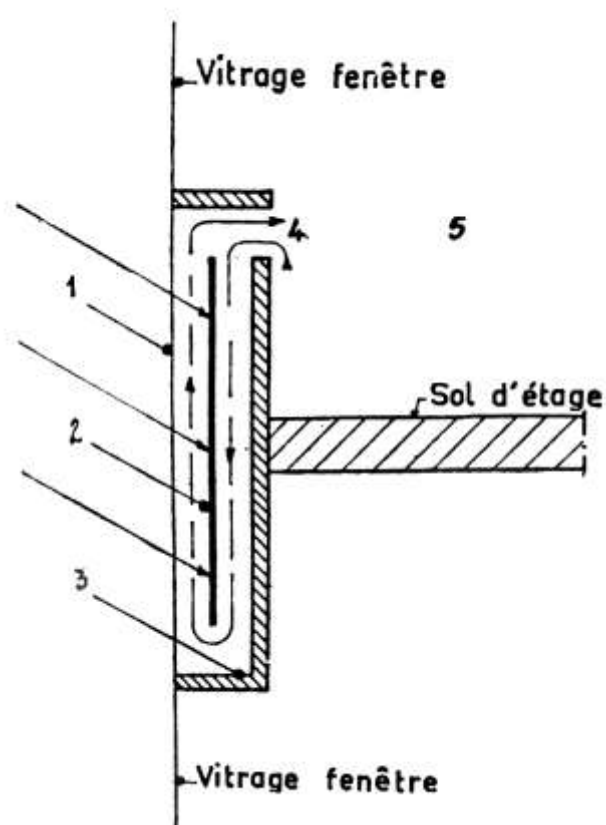


Figure 49 : Schéma du « mur-rideau chauffant » du four solaire d'Odeillo-Font-Romeu.
(R. Peyturaux, *L'Énergie solaire*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1968, p. 97)

Cette technique est conçue pour exploiter le plus complètement possible le principe de la convection naturelle (souvent nommé thermosiphon ou thermocirculation), qui désigne « le mouvement d'un fluide liquide ou gazeux (air, eau...) dû à la gravité et à l'échauffement différentiel de ce fluide, par exemple par contact avec un matériau de température différente¹ ». Ce phénomène intervient dans l'intégralité des techniques solaires passives et est particulièrement exploité dans les systèmes de captage indirect conçus pour maximiser la convection naturelle de l'air sous l'action de l'effet de serre. Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide provient de la différence de température, donc de pression, entre deux points du fluide. Ce phénomène se distingue nettement de la convection forcée où le mouvement de convection est produit ou accéléré par un système moteur extérieur, comme un ventilateur, une pompe mais aussi le vent². Trombe était passionné de spéléologie et auteur d'ouvrages de référence sur le sujet. Il aurait découvert l'effet de la thermocirculation lors de ses explorations souterraines : ce phénomène expliquerait selon lui la différence de température entre des cavernes proches, qui ne dépendrait pas de leur orientation mais de la position de leurs ouvertures qui modifierait les mouvements convectifs³. C'est notamment à travers le phénomène de convection naturelle qu'il aborde les « climats souterrains⁴ » et les effets de « thermique et de météorologie souterraines⁵ » dans son *Traité de spéléologie*. En somme, les capteurs que Trombe a mis au point reproduiraient en miniature les phénomènes thermiques qu'il a observés dans les climats souterrains.

Bien qu'il ait été conçu pour exploiter la convection naturelle de l'air, le « mur-rideau chauffant » n'aurait cependant jamais totalement fonctionné selon Jean-François Robert, ingénieur au four solaire d'Odeillo-Font-Romeu⁶. Les raisons de ce dysfonctionnement seraient multiples. D'une part, les températures des deux faces du capteur composé d'une simple feuille d'inox sont sensiblement égales, ce qui provoquerait un mouvement ascendant et non descendant de l'air à l'arrière du capteur. D'autre part, les entrées et les sorties d'air du système de captage sont situées à la même hauteur et trop proches l'une de l'autre⁷ : il en résulte que la

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 24.

2 *Ibid.*

3 Entretien de Marion Chauvin-Michel avec Georges et Jeanne-Marie Alexandroff retranscrit in : M. Chauvin-Michel, *Architectures solaires et politiques énergétiques en France de 1973 à 1985*, op. cit., p. 246. Voir également : P. Bouet, « Le mur Trombe », note 15, p. 253-254 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

4 F. Trombe, *Traité de spéléologie*, Paris : Payot, (coll. Bibliothèque scientifique), 1952, p. 92-127.

5 *Ibid.*, p. 92.

6 Entretien avec Jean-François Robert, le 23/04/2020 (à distance).

7 *Ibid.*

différence de température entre ces deux points est très faible, voire nulle, et que la dépression créée dans le capteur par l'air échauffé sous l'effet du rayonnement solaire, même intense, n'entraîne qu'un faible mouvement convectif. Bien que cette disposition ait été présentée comme « tout à fait rationnelle¹ » par Trombe, le fait que ce système n'ait jamais fonctionné illustre les difficultés généralement rencontrées lors du développement de nombreuses techniques solaires passives et la complexité d'anticiper précisément les phénomènes thermiques qu'elles exploitent.

Peu après la réalisation du « mur-rideau chauffant », Trombe et son équipe se sont orientés vers des systèmes de captage à inertie thermique importante, aboutissant par la suite au mur Trombe. Cependant, le principe du captage indirect à faible inertie a connu d'autres développements indépendants aux États-Unis entre les années 1960 et les années 1970, sous la forme des « capteurs à air² ». On trouve des exemples fonctionnels et aboutis de ces systèmes de captage indirect à faible inertie dans des constructions situées à Santa Fe, au Nouveau-Mexique³. Ce système a été repris en France, comme dans la maison de l'architecte Georges Wursteisen construite en 1979 à Cabestany dans les Pyrénées-Orientales⁴. Cette construction comporte une très importante surface de capteurs à air sur sa façade sud, composés d'un simple vitrage enchâssé entre des montants en aluminium qui recouvrent une feuille de tôle ondulée de couleur noire mate (*figure 50*). De par la grande hauteur des capteurs qui couvrent les deux étages de la construction, le phénomène de thermosiphon est considérablement favorisé et crée une différence de température importante entre l'entrée d'air en bas des capteurs et la sortie d'air chauffée située quatre mètres plus haut, alors que l'entrée et la sortie d'air étaient quasiment au même niveau dans le « mur-rideau chauffant ». Des éléments manœuvrables permettent de contrôler l'apport de chaleur par l'intermédiaire de trappes placées à l'extérieur et de clapets à l'intérieur. En fonctionnement d'hiver, les trappes sont fermées, et les clapets en partie basse et haute sont ouverts en journée afin de réchauffer l'air intérieur de la construction ; en été, les trappes extérieures sont ouvertes et les clapets intérieurs restent fermés, pour permettre de ventiler les parois de la construction et d'évacuer l'air chaud des capteurs selon le

1 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 113 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

2 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 68-69.

3 Entretien avec Georges Wursteisen, le 18/06/2019 à Cabestany.

4 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, op. cit., F 65. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

principe de la cheminée solaire (*figure 51*). Ce système simple et facile d'entretien est toujours en fonctionnement aujourd'hui et il est considéré comme particulièrement performant par l'architecte¹. Bien que marginal à l'époque, l'emploi de ce type de capteurs à air est aujourd'hui encouragé par différents ingénieurs². En France, le principe des capteurs à air a aussi été popularisé durant les années 1980 avec l'invention de la fenêtre ventilée par Jean-François Miquel³, et de la fenêtre pariétodynamique par l'ingénieur Jacques Paziaud.



Figure 50 : *Maison de G. Wursteisen à Cabestany.*
(photo Clément Gaillard, le 18 juin 2019)

-
- 1 Entretien avec Georges Wursteisen, le 18/06/2019 à Cabestany.
 - 2 Entretien avec Michel Raoust, le 21/02/2020 à Paris.
 - 3 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 37-38.

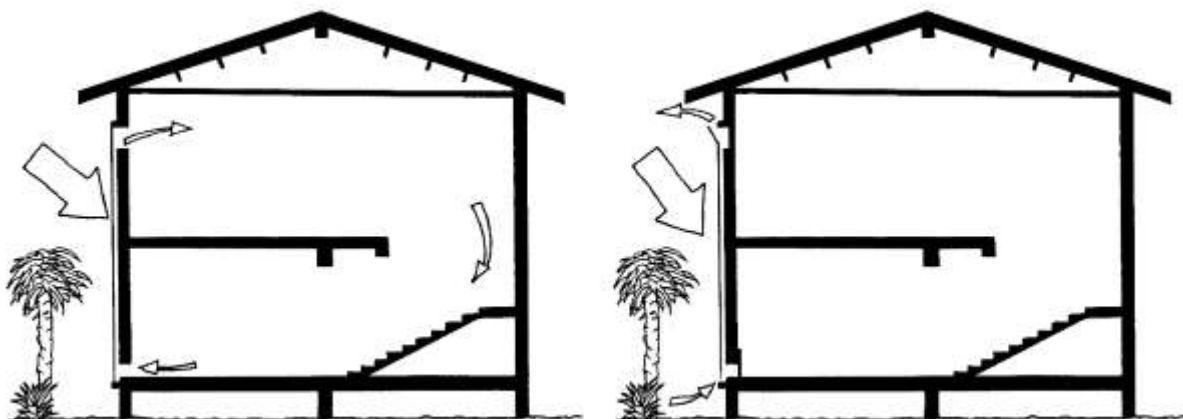


Figure 51 : Coupe schématique de la maison de G. Wursteisen avec le capteur à air en fonctionnement d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).
(schéma Clément Gaillard, décembre 2021)

II.2.2.2. Un système de captage indirect à forte inertie : le cas du mur Trombe et de ses évolutions

Le développement des systèmes de captage indirect à faible inertie a connu une évolution majeure avec l'intégration d'une inertie thermique importante, dans le but de déphaser les apports de chaleur vers l'intérieur pour mieux les répartir dans le temps. En parallèle de la construction du « mur-rideau chauffant » au four solaire d'Odeillo-Font-Romeu, Trombe et son équipe font construire à proximité du four solaire un ensemble de petites habitations entre 1963 et 1967¹. Ces prototypes leur servent à mener des expérimentations avec des murs capteurs à forte inertie thermique. Ils testent d'abord des murs capteurs fabriqués à partir de radiateurs peints en noir, remplis d'eau et placés derrière un double vitrage² (figure 52), mais ils en viennent à privilégier l'utilisation d'épais murs porteurs en béton munis de fentes en partie basse et haute, et c'est sous cette forme que le mur Trombe sera très largement diffusé par la suite à partir du prototype de 1967³ (figure 53). Ce choix de réaliser « un mur

1 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 256 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

2 Entretien avec Jean-François Tricaud, le 18/10/2019 à Odeillo-Font-Romeu ; J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, op. cit., F 52. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) ; B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 129.

3 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 257 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

capteur-accumulateur¹ » selon l'expression de Mazria, s'explique d'abord par la volonté d'accumuler l'énergie thermique produite par effet de serre grâce à l'inertie thermique du béton, dont la température de surface peut atteindre 60 °C². À la différence du « mur-rideau chauffant » et des autres systèmes de captage indirect à faible inertie, le mur Trombe est susceptible de prolonger l'action de l'effet de serre dans le temps et peut entretenir le phénomène de convection naturelle malgré la baisse des apports solaires :

« L'énergie est captée entre une double couverture sélective (double vitrage, par exemple) et la surface absorbante d'un mur de maçonnerie lourde qui s'échauffe [...]. Il s'établit ainsi une thermocirculation convective naturelle qui s'amorce dès le début de l'insolation de la façade et se poursuit efficacement durant deux à trois heures après l'arrêt des apports solaires suivant la quantité d'énergie reçue dans la journée et les conditions climatiques extérieures³. »

L'autre originalité de ce système, par rapport aux autres techniques à faible inertie expérimentées précédemment par Trombe, est qu'il est conçu pour transmettre une importante quantité de chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde avec un certain déphasage. La recherche d'un déphasage thermique à partir du milieu des années 1960 constitue un changement important dans l'approche du chauffage solaire développée par Trombe. En effet, les communications qu'il donne à la fin des années 1950 et au début des années 1960 à propos du chauffage des habitations sont assez nettement critiques des effets des matériaux massifs employés à l'extérieur. En 1958, il recommande par exemple d'éviter l'action « des masses thermiques de matériaux communiquant avec l'extérieur⁴ » et en 1961 il affirme qu'il est déconseillé d'employer le béton « comme écran thermique ou comme paroi⁵ ». La mise au point d'un mur capteur en béton à forte inertie constitue un changement important : Trombe a manifestement pris conscience des effets positifs du déphasage thermique pour le chauffage

1 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 40.

2 *Ibid.*, p. 133.

3 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.3 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Sur la climatisation naturelle des maisons. A) Généralités et méthodes de chauffage par le rayonnement solaire », p. 661 in : Centre National de la Recherche Scientifique (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*, op. cit. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

5 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 120 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

solaire des habitations dans les climats tempérés. Il a aussi spécialement étudié la séparation des fonctions au sein du mur Trombe, puisqu'il affirme que le verre agit comme paroi et « barrière thermique¹ », tandis que le béton assure la fonction de stockage thermique². Dès lors, celui-ci permet un déphasage important dans la transmission de la chaleur, en complément des apports convectifs immédiats :

« Une autre partie de l'énergie est transmise par conduction à travers le matériau de stockage et se manifeste, avec un déphasage qui est fonction principalement de la nature et de l'épaisseur du mur, par une élévation de température de sa surface intérieure. L'énergie est alors restituée au volume à chauffer par convection-conduction dans l'air et rayonnement vers les autres parois. La durée moyenne d'insolation durant la "période de chauffage" (1^{er} octobre-20 mai) est de l'ordre de 10 heures. L'épaisseur et le matériau du mur doivent donc être choisis de façon à ménager un déphasage de l'ordre de 12 heures³. »

La prise en compte des phénomènes de convection naturelle d'une part, et de déphasage thermique d'autre part, vont faire l'objet d'ajustements dans le dimensionnement du mur Trombe. Dans sa version de 1967 (*figure 54*), il se compose d'un mur massif de béton banché de granulats lourds de 60 cm d'épaisseur, recouvert d'une peinture acrylique noire mate et percé de minces fentes horizontales régulièrement espacées entre elles et éloignées de 3,50 m entre la rangée supérieure et inférieure⁴. L'ensemble est placé à 12 cm derrière des châssis double vitrage et forme une surface verticale de captage de 48 m² pour 76 m² de surface habitable, soit 0,16 m² de capteur par m³ de volume habitable et plus de 61 tonnes de béton⁵. Le reste de la construction est en ossature légère isolée et recouverte d'un bardage bois, l'appoint de chauffage étant réalisé par un système électrique. Elle a été conçue en collaboration avec l'architecte Génard⁶.

1 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *Architectural Design*, op. cit., p. 652.

2 *Ibid.*

3 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.3 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 *Ibid.*, p. XV.6-XV.8.

5 *Ibid.*, p. XV.6-XV.7.

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 41.

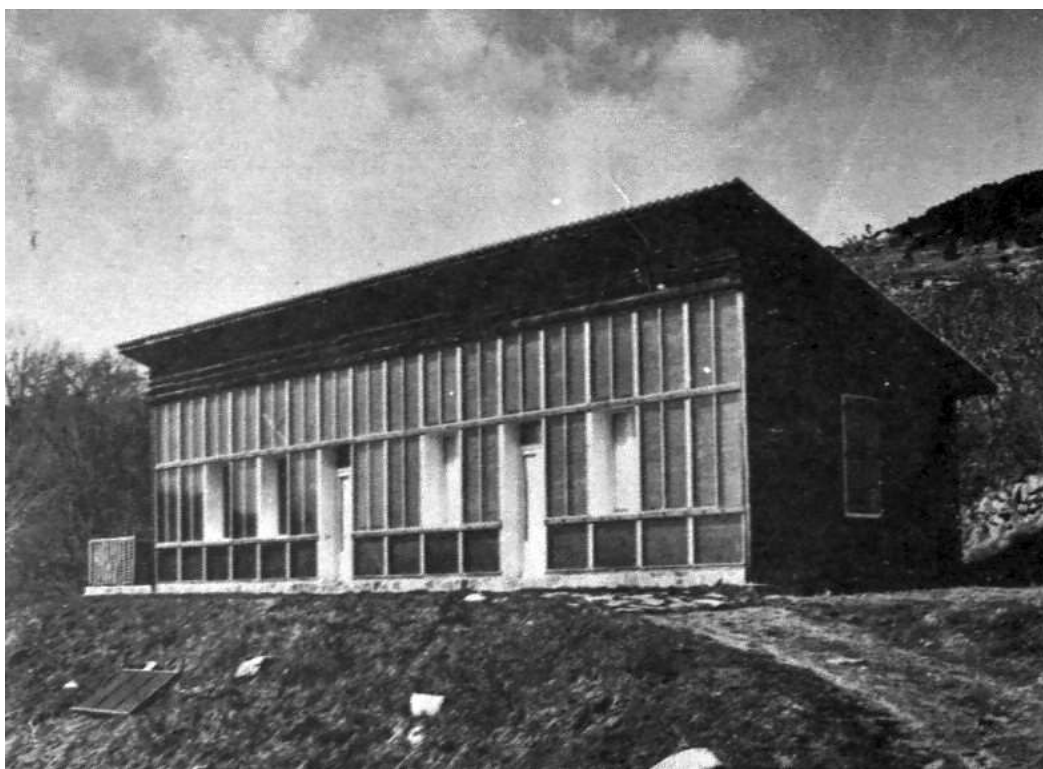


Figure 52 : Prototype conçu par F. Trombe de maison équipée d'un mur capteur fabriqué à partir de radiateurs peints en noir.

(J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, Paris : CNRS/COMES/PIRDES, 1979, n. p.)

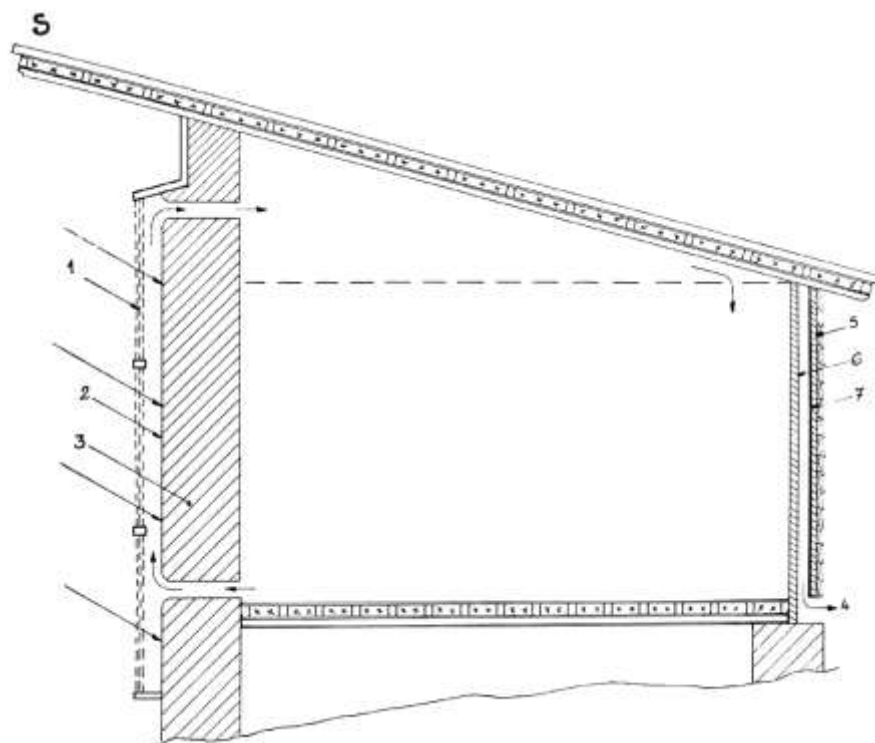


Figure 53 : Coupe du mur Trombe.

(P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 257 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris : La Découverte, 2020)



Figure 54 : *Maison à mur Trombe de 1967.*
(photo Clément Gaillard, le 18 octobre 2019)

En 1967, l'architecte Jacques Michel (1925-1997), ancien élève de Le Corbusier¹, est nommé par le directeur du CNRS « pour effectuer une étude économique et architecturale des maisons solaires² » en collaboration avec Trombe. Soucieux de développer « une véritable architecture solaire³ » et animé du projet « corbuséen⁴ » d'une « conception climatique⁵ » et industrielle qui serait « au service de l'humain⁶ », Michel propose de décliner le mur Trombe comme un élément préfabriqué et de le simplifier. Il l'emploie dans une réalisation à Chauvency-le-Château (Meuse) en 1969, et l'intègre à un prototype d'habitat préfabriqué

1 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 256-257 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

2 J. Michel, « Les Maisons solaires », *Techniques & Architecture*, « Façades – Dossier "maisons solaires" », n° 300, septembre-octobre 1974, p. 113

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

présenté en 1973¹. Michel et Trombe déposent un nouveau brevet en France en juin 1971², qui apporte des modifications importantes au mur Trombe, notamment l'ajout de trappes extérieures en partie supérieure des vitrages, afin de ventiler le mur en été pour limiter l'élévation de température et la quantité de chaleur accumulée dans la masse de béton. Cette évolution est importante : initialement conçue pour le chauffage des habitations, cette technique devient un système complet, susceptible d'exploiter la convection naturelle de l'air pour le chauffage et pour la ventilation, bien que les performances effectives de la ventilation d'un mur aussi massif n'aient à notre connaissance jamais été mesurées. Ce brevet sera complété par la suite³.

Michel met en œuvre cette nouvelle version du mur Trombe, désormais présentée comme le « mur Trombe-Michel », sur les façades est, sud et ouest dans un ensemble de trois habitations accolées conçues pour Trombe et deux de ses collègues et achevées en 1974 à proximité du four solaire (*figure 55*). En plus d'intégrer les modifications apportées par le nouveau brevet, l'épaisseur des murs de béton est réduite de 60 à 37 cm, le rapport entre la surface du mur et le volume habitable est ramené à 0,1 et différentes peintures mates (vert, bleu et rouge) sont employées pour l'extérieur des murs Trombe-Michel. Ces couleurs étaient susceptibles d'être esthétiquement mieux acceptées que le noir mat du premier mur Trombe et permettaient de tester leur absorptivité au rayonnement solaire ainsi que leur incidence sur les performances thermiques du mur. Cette réalisation a vraisemblablement permis de fixer une règle de dimensionnement des murs Trombe, suivant une formule donnée indépendamment du climat : un mètre carré de mur Trombe pour dix mètres cubes de volume habitable à chauffer⁴. Cette règle, facilement mémorisable, a sans doute contribué à la diffusion du mur Trombe et à son succès.

1 *Ibid.* ; P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 256-257 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, *op. cit.*

2 J. Michel, « Les Maisons solaires », *Techniques & Architecture*, « Façades – Dossier "maisons solaires" », *op. cit.*, p. 113

3 *Ibid.*, p. 114.

4 Entretien avec Jean-François Tricaud, le 18/10/2019 à Odeillo-Font-Romeu ; Colin Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *Architectural Design*, « Solar Energy in Housing », vol. XLIII, n°10, 1973, p. 653.

Communiquées à partir de 1973, les performances du mur Trombe de 1967 ont été rapportées lors de différentes conférences en France et aux États-Unis entre 1975¹ et 1976². Elles sont considérées comme très bonnes dans le climat froid, d'altitude et très ensoleillé d'Odeillo-Font-Romeu, assimilé à un « climat méditerranéen³ », où il assure entre 60 et 70 % des besoins de chauffage en fonction des années. Elles sont plus faibles, quoique toujours significatives, dans un climat moins ensoleillé comme celui de Chauvency-le-Château où elles n'assurent que 35 à 45 % des besoins de chauffage⁴. Ces performances doivent cependant être relativisées puisqu'aucune indication n'est donnée sur l'occupation des habitations, ni sur les habitudes des habitants qui influent considérablement sur ces résultats. Les comportements thermiques du mur Trombe de 1967 et du mur Trombe-Michel de 1974 ont été soigneusement comparés grâce à une instrumentation réalisée à l'aide de thermocouples pour les températures de l'air, des surfaces et des masses, d'anémomètres à fil chaud pour l'écoulement d'air, et de pyrhéliomètres pour l'intensité du rayonnement solaire⁵.

Ces mesures confirment les bons rendements de ce système qui se situent entre 32 et 40 %⁶, ce qui est bien supérieur aux valeurs calculées *a priori* par d'autres auteurs⁷. Cependant, elles mettent en évidence certaines limites du mur Trombe. Les mesures de conduction à travers l'épaisseur du mur montrent que le déphasage pour une épaisseur de 60 cm est de 14 à 16 heures, ce qui est considéré comme trop long, tandis qu'il est de 9 à 10 heures pour une épaisseur de 37 cm, ce qui est considéré comme trop court. Trombe et ses collègues en concluent que « des épaisseurs de l'ordre de 40 à 45 cm seraient mieux adaptées⁸. » D'autres problèmes sont apparus

-
- 1 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Some Performance Characteristics of the CNRS Solar House Collectors », p. 366-367 in : *Solar Use Now - A Resource for People: Extended Abstracts. 1975 International Solar Energy Congress and Exposition July 28-August 1, 1975, University of California, Los Angeles, California, USA*, Washington : Energy Research & Development Administration, 1975. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Some Performance Characteristics of the CNRS Solar House Collectors », p. 201-222 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 3 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.1 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 4 *Ibid.*
 - 5 *Ibid.*, p. XV.8-XV.10.
 - 6 *Ibid.*, p. XV.25.
 - 7 R. Chareyre, *La Maison autonome, op. cit.*, p. 59.
 - 8 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.19 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

à partir des mesures effectuées sur le mur Trombe-Michel de 1974, qui montrent que la température de la surface intérieure est « notablement inférieure à celle du mur de 1967 en dépit de la diminution de l'épaisseur¹ », alors que c'est « théoriquement l'inverse qui devrait se produire². » Trombe et ses collègues en déduisent que ce comportement thermique aberrant provient d'un défaut de séchage des murs en béton et que pendant cette période de séchage, qui peut durer plusieurs années, « le matériau ne possède pas ses caractéristiques thermiques définitives³. » À cause de ce problème de séchage qui n'avait pas été anticipé, mais qui peut être résolu par l'emploi de techniques sèches en préfabrication, les performances mesurées du mur Trombe-Michel apparaissent nettement inférieures à celles du mur Trombe de 1967⁴. Comme pour de nombreuses autres techniques solaires passives, l'instrumentation et les mesures effectuées *a posteriori* sur le mur Trombe-Michel ont permis de mettre en évidence des phénomènes thermiques qui avaient été ignorés ou mal anticipés lors de la conception.



Figure 55 : « Maisons des ingénieurs » de 1974 équipées de murs Trombe-Michel.
(photo Clément Gaillard, le 18 octobre 2019)

-
- 1 *Ibid.*
 - 2 *Ibid.*
 - 3 *Ibid.*
 - 4 *Ibid.*

Malgré ces résultats contrastés, le mur Trombe s'est largement diffusé en Europe et aux États-Unis. Nous reviendrons sur les conditions de cette diffusion, bien que nous ayons évoqué l'attrait technique de ce système (simplicité, dimensionnement...). Cette diffusion est allée de pair avec l'émergence de critiques à l'égard de cette technique de captage direct à forte inertie. Balcomb souligne deux défauts principaux du mur Trombe en 1978 : son coût élevé et son encombrement¹. Des évolutions ont été envisagées dès la fin des années 1970 pour pallier ces défauts. Afin de diminuer son encombrement, l'ingénieure Mária Telkes (1900-1905) a proposé en 1978 de remplacer le béton par un matériau à changement de phase (mélange eutectique à partir de sel de Glauber²), encapsulé dans une mousse à structure polyédrique assurant également une fonction d'isolant³. Étant donné la propriété de ce type de matériau à changement de phase, qui permet d'accumuler et de restituer une quantité d'énergie thermique vingt fois supérieure à celle du même volume de béton lors de ses changements d'état, les mêmes propriétés de capacité thermique de 42 cm de béton du mur Trombe pourraient ainsi être réalisées avec seulement 2,5 cm de ce matériau, d'où un gain important de poids et d'encombrement⁴. Cette proposition d'évolution est cependant restée théorique, à cause des contraintes et du manque de fiabilité des matériaux à changement de phase.

D'autres évolutions ont cependant été concrètement réalisées, notamment afin de limiter les coûts engendrés par l'emploi du béton en grande quantité. L'architecte Wayne Nichols a par exemple employé des réservoirs étanches en béton armé empilés les uns sur les autres, afin de réaliser des « murs Trombe chargés d'eau⁵ » (« water-loaded Trombe walls ») de 25 cm d'épaisseur. Bien que les performances soient satisfaisantes, Nichols a estimé que la masse d'eau installée était beaucoup trop faible pour assurer un stockage thermique suffisant⁶. La construction de murs Trombe en maçonnerie, que ce soit en parpaing de béton ou en brique de terre crue ou cuite, moins coûteux que le béton banché mais moins performant, constitue une autre évolution qui doit être signalée⁷. Ces évolutions permettaient parfois de contourner les

1 J. D. Balcomb, « State of the Art in Passive Solar Heating and Cooling », p. 7 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 Un mélange est dit eutectique s'il fond et se solidifie à température constante et de manière uniforme.

3 M. Telkes, « Trombe Wall with Phase Change Storage Material », p. 283-287 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 *Ibid.*, p. 284.

5 J. D. Balcomb, « State of the Art in Passive Solar Heating and Cooling », p. 7 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 *Ibid.*

7 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 175.

brevets qui avaient été déposés en France, mais aussi aux États-Unis en 1974¹ par Trombe et Michel².

II.2.2.3. Le système *Drumwall* de Baer, une lignée technique indépendante

D'autres systèmes de captage indirect à forte inertie ont été développés, notamment aux États-Unis, parallèlement aux recherches de Trombe. C'est le cas du système *Drumwall* (littéralement « mur-tambour ») mis au point par l'architecte Steve Baer, vraisemblablement à la fin des années 1960, et commercialisé par Zomeworks. Stephen C. « Steve » Baer (1938-) est un inventeur américain ayant reçu une formation en mathématique et en physique aux États-Unis ainsi qu'en Suisse³. Il est devenu une figure importante de la contre-culture aux États-Unis au milieu des années 1960 du fait de ses préoccupations politiques et énergétiques⁴. Baer est considéré comme un des représentants les plus importants de l'architecture solaire passive⁵ et a contribué aux développements de nombreuses techniques par l'intermédiaire de Zomeworks, entreprise qu'il a fondée et dont il occupe encore aujourd'hui le poste de directeur de la recherche⁶.

Une de ses inventions les plus notables est le *Drumwall*, qui est un système de mur capteur-accumulateur constitué d'un ensemble de bidons métalliques de 200 litres remplis d'eau, insérés horizontalement dans un châssis et exposés derrière un simple vitrage en façade sud⁷ (*figure 56*). Étant donné l'importante amplitude des températures qu'ils subissent, ils ne sont remplis qu'à 98 % afin de prévenir la dilatation thermique de l'eau⁸. Leur face extérieure est peinte en noire, pour maximiser l'absorption du rayonnement solaire, tandis que leur face intérieure est peinte en blanc afin de réfléchir la lumière naturelle⁹ (*figure 57*). L'attrait de ce système tient à son faible coût et aux très bonnes qualités thermiques de l'eau, dont les mouvements de convection naturelle assurent une répartition homogène de la chaleur dans les

1 US Patent 3,832,992.

2 H. R. Hay, « Roof Mass and Comfort », p. 25 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 114.

4 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, Marseille : Parenthèses, 2014, p. 148-154.

5 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 45.

6 M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit., p. XIII.

7 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 61.

8 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 39.

9 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 62.

contenants¹. Une contrainte du *Drumwall* concerne le risque de corrosion des bidons, qui peut être résolu par l'utilisation de bidons en métal plutôt qu'en zinc et recouverts d'un film plastique, ou par l'adjonction d'un produit anticorrosif à l'eau². Comme le mur Trombe, il a le désavantage d'obstruer presque intégralement les ouvertures orientées aux sud. Ce système est cependant considéré comme très efficace, relativement simple à mettre en œuvre et très peu coûteux³. Il a connu de nombreuses déclinaisons et a été utilisé pour assurer le chauffage de locaux d'un volume important, comme les bureaux et l'entrepôt du monastère bénédictin de Pecos (35° nord), au Nouveau-Mexique, construits en 1976⁴ (figure 58). Il a été commercialisé par Zomeworks sous la forme de plans de montage qui ont été largement diffusés⁵.



Figure 56 : Drumwall dans la maison de S. Baer à Corrales.
(C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, Marseille : Parenthèses, 2014, p. 66, photographie de J. Naar)

-
- 1 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 119.
 - 2 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 97.
 - 3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 64.
 - 4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 72-73.
 - 5 Archives personnelles de Georges Wursteisen – Cabestany.

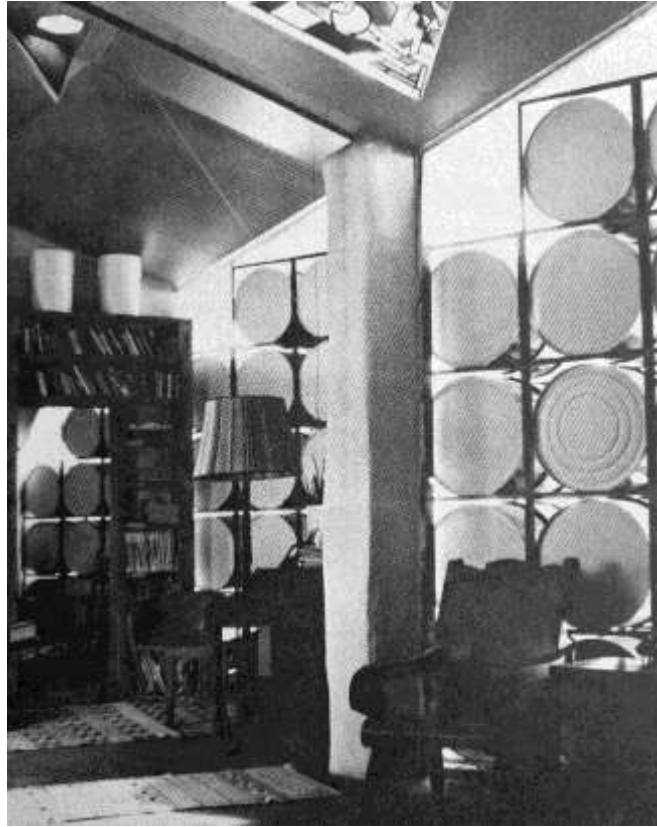


Figure 57 : Face intérieure du Drumwall dans la maison de S. Baer à Corrales.
(B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, p. 131)



Figure 58 : Détail du système Drumwall intégré en allège dans la façade sud des bureaux du monastère bénédictin de Pecos.
(S. Baer, « Some Passive Solar Buildings with a Focus on Projects in New Mexico », *Presentation for the Albuquerque Chapter of the AIA*, January 15, 2009)

Baer estime que le système *Drumwall* est efficace « pour des latitudes comprises entre 30° et 45°¹ ». Il a été utilisé pour la première fois dans la maison personnelle de Baer achevée en 1971 et située à Corrales (35° nord), dans l'État du Nouveau-Mexique² (figures 56 et 57). Cette construction utilise 90 bidons répartis sur quatre façades, soit un poids total de 19 tonnes d'eau, qui s'ajoutent à la masse de la dalle en béton et des cloisons intérieures en terre crue³, pour une surface de capteurs totale utile de 24 m². Le *Drumwall* y est associé à un système d'isolation mobile extérieur constitué de panneaux légers isolants recouverts d'aluminium sur leurs deux faces⁴. Chaque panneau est suffisamment léger pour être abaissé et relevé de l'intérieur à l'aide d'une manivelle⁵ (figure 59). En position ouverte, pendant les périodes de chauffage, les panneaux assurent la fonction de réflecteur et réfléchissent une partie du rayonnement solaire reçu par le sol vers le *Drumwall* afin d'améliorer le rendement du système, qui varie entre 60 et 70 %⁶. En position fermée, durant les périodes nocturnes ou peu ensoleillées, ces panneaux sont conçus pour isoler le *Drumwall* de l'extérieur et minimiser ses déperditions thermiques. Baer estime que ce système couvre 75 % des besoins de chauffage de sa maison et que la température intérieure varie en moyenne entre 17 et 21 °C en hiver⁷. D'épais rideaux en toile permettent de moduler l'apport de chaleur vers l'intérieur⁸. Le système est cependant réversible pendant les périodes de surchauffe : les panneaux peuvent être fermés en journée pour limiter les apports solaires et ouverts de nuit, afin de refroidir le *Drumwall* vers l'extérieur⁹. Baer rapporte que les températures intérieures en été varient autour de 22 °C et n'excèdent pas 24 °C¹⁰. Le système *Drumwall* a également fait l'objet d'une instrumentation¹¹, moins aboutie que celle effectuée sur le mur Trombe, afin de mesurer l'évolution des températures intérieures sur plusieurs jours.

Le *Drumwall* inventé par Baer est présenté comme « un mur Trombe en eau¹² » par certains architectes français, qui sous-entendent que cette technique serait une évolution du mur

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 71. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 58-64.

3 *Ibid.*, p. 62.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*, p. 62-63.

8 *Ibid.*, p. 61.

9 *Ibid.*, p. 63.

10 *Ibid.*

11 S. Baer, « Corrales Residence », p. 200 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

12 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 58.

Trombe. Baer a effectivement cherché à améliorer les performances des systèmes de captage indirect à forte inertie, en intégrant les qualités thermiques de l'eau déjà reconnues par les recherches sur les murs capteurs à eau menées à partir de 1946 au MIT¹, tout en minimisant les contraintes qu'elle impose² (étanchéité, plomberie, fuite, risque de gel...). Cependant, il ne semble pas que le *Drumwall* puisse être considéré comme une évolution de mur Trombe en toute rigueur. Lorsque Baer présente la genèse de ses recherches, il se réfère à celles menées par John Yellott et Harold Hay à l'Université de Phoenix sur l'isolation mobile et les toitures-bassins³, sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre consacré aux techniques de rafraîchissement. Les recherches de Yellott et Hay sur les toitures-bassins ont inspiré d'autres techniques de captage indirect en toiture pour le chauffage des habitations, notamment le système des « bassins de comble⁴ » (« *attic ponds* »), développé dans l'État du New Hampshire, au nord-est des États-Unis.

Le système *Drumwall* a donc été pensé comme une transposition en façade des principes mobilisés dans les toitures-bassins, et notamment du système d'isolation mobile, indispensable dans le climat rigoureux de Corrales. Les panneaux isolants ont aussi la fonction de réflecteurs : ils améliorent considérablement le rendement de captage du *Drumwall* et permettent d'utiliser cette technique à des latitudes plus basses, où l'exposition des façades sud est moindre en hiver et serait défavorable à l'utilisation d'un mur Trombe⁵. Le développement du système *Drumwall* appartient donc à une lignée technique nettement distincte de celle du mur Trombe, bien qu'il puisse être présenté comme une de ses évolutions *a posteriori*. Malgré les différences entre ces deux systèmes et leurs origines distinctes, on peut noter des hybridations entre le mur Trombe et le *Drumwall* : en France, certaines réalisations associent un mur Trombe construit en parpaing de ciment avec des réflecteurs mobiles et des panneaux isolants issus du système *Drumwall*, afin d'en améliorer le rendement et de limiter ses déperditions nocturnes⁶ (*figure 60*).

1 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 139-141.

2 *Ibid.*, p. 61.

3 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 24.

4 T. Maloney, « Four Generations of Waterwall Design », p. 489 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) ; K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 206-208.

5 J. D. Balcomb, R. D. McFarland, « A Simple Empirical Method for Estimating the Performance of a Passive Solar Heated Building of the Thermal Storage Wall Type », p. 382 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 56-61.

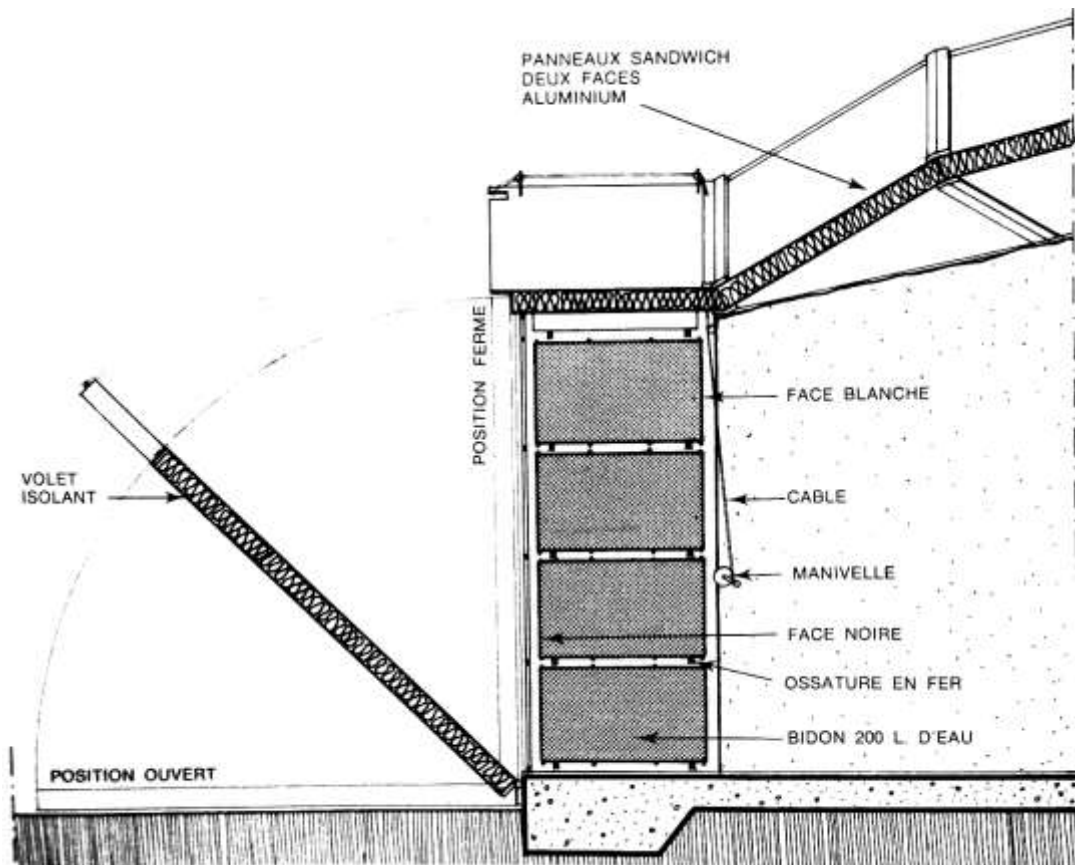


Figure 59 : Coupe du Drumwall dans la maison de S. Baer à Corrales.
(P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 61)



Figure 60 : Construction en Vendée équipée d'un mur Trombe et de panneaux isolants et réflecteurs empruntés au système Drumwall.
(J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 59)

II.2.2.4. L'importance des recherches de Balcomb au Los Alamos Scientific Laboratory pour l'évolution des techniques de captage indirect

Dès le milieu des années 1970, les performances des systèmes indirects évoqués précédemment ont été comparées entre elles et à celles d'autres techniques de chauffage solaire passif à gain direct, au laboratoire d'énergie solaire de Los Alamos (Los Alamos Scientific Laboratory ou LASL), situé dans l'État du Nouveau-Mexique aux États-Unis (35° nord) et sous la direction de l'ingénieur Balcomb¹. De nombreuses cellules-tests équipées des principaux systèmes à gain direct et indirect connus à l'époque (serre, mur Trombe, *Drumwall*...) ont été construites et testées dans ce laboratoire à la fin des années 1970, faisant du LASL le principal centre de recherche scientifique sur les techniques solaires passives. La méthode développée par Balcomb et son équipe consistait à croiser les résultats des performances de ces prototypes et ceux mesurés sur des constructions réelles instrumentées², avec ceux obtenus par des simulations thermiques dynamiques calculées sur ordinateur³. Le laboratoire de Los Alamos disposait en effet de puissants supercalculateurs pour l'époque. Ils étaient nécessaires pour effectuer des simulations thermiques dynamiques au pas de temps horaire conçues par les mathématiciens et physiciens du laboratoire, pour les 8 760 heures d'une année complète. Ils réalisaient ce calcul en moins de vingt secondes⁴. Le laboratoire de Los Alamos était le seul à disposer d'outils aussi performants au service des recherches sur les techniques solaires passives.

Le LASL a eu une influence considérable sur l'évolution de nombreuses techniques solaires passives à partir de la fin des années 1970. Le but des recherches menées par Balcomb et son équipe était de constituer une base de données des performances de différents systèmes pour différents climats à partir de ces tests, mesures et simulations, afin de développer des règles de conception pour le dimensionnement des techniques solaires passives⁵. Le LASL a été une référence internationale sur ce sujet durant les décennies 1970 et 1980 et les méthodes de calcul

-
- 1 J. D. Balcomb, R. D. McFarland, S. W. Moore, « Passive Testing at Los Alamos », p. 602-609 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 2 R. D. McFarland, J. D. Balcomb, « The Effect of Design Parameter Changes on the Performance of Thermal Storage Wall Passive Systems », p. 54-60 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 3 J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation as a Design Tool », p. 238 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 4 *Ibid.*, p. 240.
 - 5 *Ibid.*, p. 239.

qui y ont été développées à la fin des années 1970¹ ont été réutilisées dans de nombreux pays jusqu'au milieu des années 1980². À partir des tests, des mesures et des simulations thermiques dynamiques, Balcomb et son équipe ont entre autres proposé de déterminer l'épaisseur optimale du mur Trombe, qu'ils fixent à 30 cm, bien qu'ils estiment qu'une épaisseur plus importante permette de réduire l'amplitude des températures intérieures³. Ils ont également confirmé l'importance de l'isolation nocturne des vitrages ainsi que la faible performance des simples vitrages pour les techniques solaires passives⁴.

L'influence des recherches de ce laboratoire est perceptible à travers une évolution tardive du mur Trombe. Elle a consisté à supprimer les fentes supérieures et inférieures du mur et à privilégier des teintes claires pour sa surface extérieure dans certains climats : ces modifications ont abouti au « mur thermique⁵ » ou « mur Trombe non-ventilé⁶ » (*unvented Trombe wall*), qui est un mur massif recouvert d'un vitrage simple ou double. Ces modifications ont été apportées à la suite des expérimentations menées au laboratoire de Los Alamos et communiquées en 1978. Deux prototypes de murs Trombe y avaient été construits, l'un muni des fentes comme le système original, et un autre qui en était dépourvu⁷. Les mesures ont établi que la « thermocirculation est utile si la pièce a besoin de chaleur pendant la journée, sinon elle a tendance à surchauffer la pièce⁸ », et que l'amplitude des températures intérieures était supérieure dans le modèle original de mur Trombe, d'où un inconfort potentiel⁹. Il a été conclu de ces tests que l'apport par convection naturelle était seulement bénéfique pour chauffer l'air intérieur en matinée ainsi qu'en journée dans les climats froids¹⁰, mais qu'il était superflu dans les climats plus tempérés qui bénéficient généralement d'un ensoleillement important durant la période hivernale.

1 J. D. Balcomb, R. D. McFarland, « A Simple Empirical Method for Estimating the Performance of a Passive Solar Heated Building of the Thermal Storage Wall Type », p. 377-389 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 234-237.

3 J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation as a Design Tool », p. 243-244 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 *Ibid.*, p. 242.

5 Entretien avec Samuel Descombe, le 17/10/2019 à Treilles.

6 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

7 J. D. Balcomb, R. D. McFarland, S. W. Moore, « Passive Testing at Los Alamos », p. 605 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

8 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « thermocirculation is useful if the room needs heat during the day, otherwise it tends to overheat the room ».

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

À partir de ces résultats, la suppression des fentes du mur Trombe, et par la même des contraintes qu'elles imposaient (clapets anti-retour, empoussiérage...) a été considérée comme sans incidence sur ses performances dans les climats ensoleillés¹. Ces recommandations ont été reprises par Mazria et ont été largement diffusées². On trouve des exemples de murs thermiques en France intégrés en façade sud dans certaines réalisations de Robert Célaire et de Gerber (*figure 61*). Gerber a également conçu des murs thermiques sous la forme de baies vitrées qui recouvrent des murs massifs de 50 à 70 cm, aboutissant à une solution qui alterne captage direct et indirect³. D'autres évolutions ont été apportées au mur Trombe, par exemple par l'architecte Douglas Kelbaugh dans sa maison du New Jersey (40° nord), dans un climat encore différent⁴, ainsi que par Jacques Michel en France qui a employé des blocs creux alvéolés posés horizontalement afin de multiplier la surface de captage selon « l'effet Francia⁵ ». À travers ces exemples, on peut affirmer que certaines techniques solaires passives ont évolué dans un intervalle de temps très faible, notamment sous l'impulsion des recommandations émises par le LASL, mais aussi grâce aux retours critiques qui ont été faits sur leurs performances.



Figure 61 : Murs thermiques (en blanc) dans une construction conçue par M. Gerber.
(photo Clément Gaillard, le 17 octobre 2019)

-
- 1 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.
 - 2 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 133.
 - 3 M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 65.
 - 4 D. Kelbaugh, « Kelbaugh House », p. 121 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 5 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, *op. cit.*, p. 54.

Parmi ces évolutions, le souhait d'optimiser le captage et le stockage de l'énergie thermique a conduit certains architectes, ingénieurs et inventeurs à dissocier les fonctions de captage, stockage et distribution de cette énergie. Alors que dans le mur Trombe, comme dans l'ensemble des techniques de captage indirect, les fonctions de « captage, stockage, restitution, commande et régulation [...] sont localisées dans la façade verticale sud de la construction et sont pratiquement indissociables¹ », ces fonctions ont été assignées à des éléments distincts dans les systèmes de captage isolé, dans le but d'améliorer le contrôle et les performances générales des techniques solaires passives. En reprenant la notion simondonienne de « concrétisation² », on peut affirmer que les fonctions concrétisées dans un même élément de captage direct ou indirect ont été dissociées dans la perspective d'une amélioration de ces techniques, aboutissant aux systèmes de captage isolé nécessairement moins concrets, mais considérés comme plus performants.

II.2.3. Les systèmes de captage isolé

II.2.3.1. Améliorer les performances des systèmes de captage direct et indirect

Le développement des systèmes de captage isolé doit s'expliquer par la volonté d'améliorer les performances des techniques évoquées précédemment, par le recours à la convection forcée plutôt qu'à la convection naturelle de l'air ou de l'eau, dans le but d'assurer le stockage de l'énergie thermique dans un espace dédié, généralement situé en dessous de l'espace habitable. Les phénomènes physiques à l'œuvre dans les systèmes de captage isolé sont identiques à ceux évoqués précédemment³ : seule la répartition des fonctions change avec ces systèmes. Les systèmes de captage isolé se caractérisent par une séparation spatiale des éléments assurant la fonction de captage (le capteur) généralement doté d'une inertie thermique minimum, et de ceux assignés à la fonction de stockage, l'ensemble étant raccordé par un circuit d'air (gaine, plénum...) ou plus rarement d'eau. Ces fonctions sont alors assurées par des éléments spécifiques. La redistribution en plusieurs éléments des fonctions primitivement confondues et concrétisées dans un même élément dans les techniques de captage direct et

1 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.4 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 35.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 40.

indirect a induit de nouveaux problèmes, ainsi que de nouvelles possibilités que nous allons examiner.

Nous avons déjà évoqué la différence entre convection naturelle et convection forcée. Du point de vue physique, les courants fluides à l'origine des échanges thermiques par convection naturelle sont dus « uniquement aux différences de températures¹ », alors que dans la convection forcée, ils « peuvent être produits par une action extérieure² », par l'action d'une pompe, d'un ventilateur, mais aussi du mouvement naturel des masses d'air à l'échelle atmosphérique, ce qui fait que le vent appartient à la catégorie de la convection forcée³. Du point de vue des architectes, ingénieurs et inventeurs, l'intérêt d'utiliser la convection forcée dans les techniques solaires passives réside dans sa capacité à accélérer les transferts d'énergie thermique entre les surfaces et les fluides, dans le but d'améliorer notablement le rendement de ces techniques⁴. Dans les techniques de captage à air, qui ont été les plus utilisées, le rendement est limité par la très faible capacité thermique de l'air⁵, et le faible débit produit par la convection naturelle. Le recours à la convection forcée permet d'augmenter le débit d'air dans les systèmes afin d'améliorer les échanges convectifs avec les surfaces⁶. C'est pourquoi dans certaines constructions solaires passives des serres ont été équipées de systèmes actifs d'extraction de l'air chaud, afin de transférer l'énergie thermique à un autre espace ou de le stocker dans une masse de matériau. De petits ventilateurs ont été employés dans certaines versions du mur Trombe, par exemple celle construite par Bruce Hunn à Los Alamos aux États-Unis⁷, pour les mêmes raisons.

Nous sommes ici à la limite des techniques solaires passives, qui par définition sont dépourvues de systèmes moteurs extérieurs étant donné que « l'énergie thermique circule par des moyens naturels⁸ ». Cependant, le recours temporaire ou périodique à la convection forcée

1 Ch. Bory, *Énergétique. Tome 1. Les Échanges de chaleur par convection (1ère partie)*, Paris : Bordas/Mouton, (coll. Études Supérieures), 1968, p. 7.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* Ce choix s'explique également par le fait que le coefficient de convection utilisé dans les calculs thermiques assimile la convection forcée produite par un appareil mécanique et celle produite par le vent.

4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 43.

5 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, *op. cit.*, p. 94 ; B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 304.

6 R. Chareyre, *La Maison autonome*, *op. cit.*, p. 62.

7 J. D. Balcomb, « Active and Passive Solar Heating of Buildings », p. 4 in : United Nations Educational and Scientific Organization, North East London Polytechnic (éds.), *International Conference & Exhibition on Solar Building Technology*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles).

8 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) (Traduction personnelle).

dans certaines techniques solaires passives par l'intermédiaire de systèmes moteurs de faible puissance a été toléré, voire encouragé afin d'en améliorer les performances, dans la mesure où la distribution de la chaleur restait assurée par rayonnement, conduction et convection naturelle, à la différence des techniques solaires actives qui nécessitent l'emploi d'éléments moteurs pour l'intégralité des transferts thermiques. La motivation technologique d'amélioration des performances des techniques solaires passives a donc parfois primé sur la motivation éthique qui faisait rejeter les systèmes moteurs alimentés par des énergies non renouvelables. Ces techniques solaires passives partiellement motorisées ont parfois été nommées « hybrides¹ », pour les différencier des techniques solaires exclusivement passives. Leur utilisation a été assez répandue, et la majorité des techniques de captage à air isolé appartiennent à la catégorie des systèmes hybrides.

En plus d'améliorer le rendement, le recours à la convection forcée permettait également de résoudre un problème crucial relatif à la mise en place d'un stockage prolongé, afin d'assurer le chauffage des habitations grâce à l'énergie solaire sur plusieurs jours ou semaines. La limite principale à l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage domestique dans les climats tempérés tient au fait que les périodes où cette énergie est la plus abondante et les périodes où les besoins de chauffage des habitations sont maximums coïncident rarement², d'où l'intérêt de stocker cette énergie sous forme thermique en prévision des besoins futurs. La recherche d'un stockage inter-journalier et inter-saisonnier a préoccupé l'ensemble des acteurs ayant participé au développement des applications domestiques de l'énergie solaire : l'une des premières maisons solaires construites au MIT en 1939 utilisait un système actif de capteurs à eau, ainsi qu'un réservoir d'une contenance de plus de 65 000 litres entouré d'une importante isolation³, afin de bénéficier d'un stockage thermique permettant d'assurer une certaine autonomie de chauffage (*figure 62*).

1 M. J. Holtz, W. Place, R. C. Kammerud, « A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems », p. 283 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off, op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat, op. cit.*, p. 403.

3 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology, op. cit.*, p. 202.

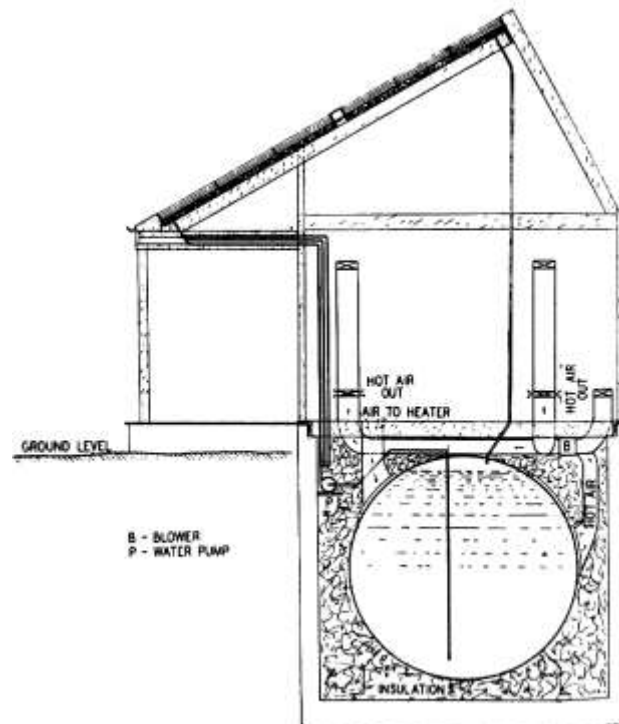


Figure 62 : Coupe de la première maison solaire du MIT et du réservoir d'eau chaude de 65 000 litres.
(K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1980, p. 202)

II.2.3.2. Stocker l'énergie solaire par convection naturelle : le cas des systèmes à air en boucle fermée

Nous avons mentionné le fait que l'inertie thermique du sol a été considérée comme une « ressource¹ » par certains acteurs de la conception solaire passive et bioclimatique. Dans cette perspective, certains architectes et ingénieurs comme Givoni ont imaginé « capter le rayonnement solaire au printemps et en été, sous la forme d'énergie thermique² » et stocker cette énergie dans le sol pendant plusieurs mois en prévision des besoins de chauffage en hiver. Givoni estime qu'un « système de stockage de l'énergie solaire à long terme dans le sous-sol³ » est envisageable, dans la mesure où « [la] capacité calorifique de la terre est très grande⁴ », bien que sa conductivité soit faible. L'importante masse de matériaux constituée par le sol d'une construction, une dalle ou un radier possède l'avantage de ne pas encombrer la surface habitable,

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 136.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 403.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

d'offrir un volume de stockage souvent très supérieur aux murs massifs et permet, en théorie, de diffuser uniformément l'énergie thermique qui y est stockée à travers l'espace habitable par conduction, convection et rayonnement. Mais l'air échauffé ayant tendance à s'élever sous l'effet de la convection naturelle, la possibilité d'utiliser le sol et le radier d'une construction comme espace de stockage ne pouvait être résolu que de deux manières : par l'emplacement du système de captage en dessous de l'espace de stockage, donc en dessous de la construction, afin de profiter des effets de la convection naturelle de l'air ; ou par le recours à la convection forcée, afin de transférer l'énergie thermique captée vers cet espace par l'intermédiaire d'un fluide mis en mouvement. Les deux solutions ont été développées, bien qu'en pratique la seconde ait été privilégiée de par sa simplicité.

Qu'il mobilise la convection naturelle ou forcée, le développement des systèmes de captage isolé a largement bénéficié des recherches de la première moitié du XX^e siècle sur le stockage thermique dans les techniques solaires actives, dont les historiens Butti, Perlin¹ et Barber² ont retracé l'histoire. C'est notamment dans ce contexte que la technique des capteurs à air associés au stockage dans un volume de pierre a été développée au milieu des années 1940 par l'ingénieur américain George O. G. Löff (1913-2009), enseignant à l'Université du Colorado et figure importante des recherches sur les applications domestiques de l'énergie solaire. À la différence des recherches sur les techniques solaires actives menées au MIT, Löff est persuadé que l'utilisation de l'eau pour le captage et le stockage de l'énergie solaire n'est pas une évidence et revient à étendre le modèle du chauffe-eau solaire pour le chauffage des habitations³. Il propose de développer le chauffage solaire sur de nouvelles bases en utilisant l'air plutôt que l'eau, car il estime qu'un système à air pourrait plus facilement compléter les chauffages à air pulsé déjà installés dans de nombreuses habitations de l'époque⁴. Malgré ses mauvaises propriétés thermiques, l'utilisation de l'air permet également d'éliminer certains inconvénients des systèmes à eau, notamment les risques de gel et de corrosion⁵.

En 1944, Löff et ses collaborateurs présentent un capteur à air conçu pour maximiser les échanges thermiques entre les surfaces et l'air⁶. Il est composé d'une série de lames en verre

1 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 200-217.

2 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 96-149.

3 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 203.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 205.

6 *Ibid.*, p. 203.

partiellement noircies disposées les unes au-dessus des autres¹ (figure 63). Le rendement de ce système varie entre 30 et 65 % en fonction de la vitesse de l'air et du nombre de lames de verre². Il permet d'élever la température de l'air jusqu'à 80 °C et assure un quart des besoins de chauffage dans la maison personnelle de Löf située à Boulder, dans le Colorado, où il est expérimenté pour la première fois³. Souhaitant améliorer les performances de son système, Löf va mettre au point la technique de stockage de pierre (*rockbed*) adaptée aux systèmes à air, en installant 6 tonnes de roche sous le radier de sa maison à travers lequel l'air chaud est soufflé par de petits ventilateurs pour stocker et déstocker la chaleur⁴. Ce système a par la suite encore été amélioré par Löf et s'est diffusé : il a notamment été repris par l'ingénieur Peter van Dresser⁵, qui a testé des volumes de stockage de pierres, de galets et de sable pour la réhabilitation d'une petite maison traditionnelle en terre crue (*adobe*) située à Santa Fe et achevée en 1958⁶.

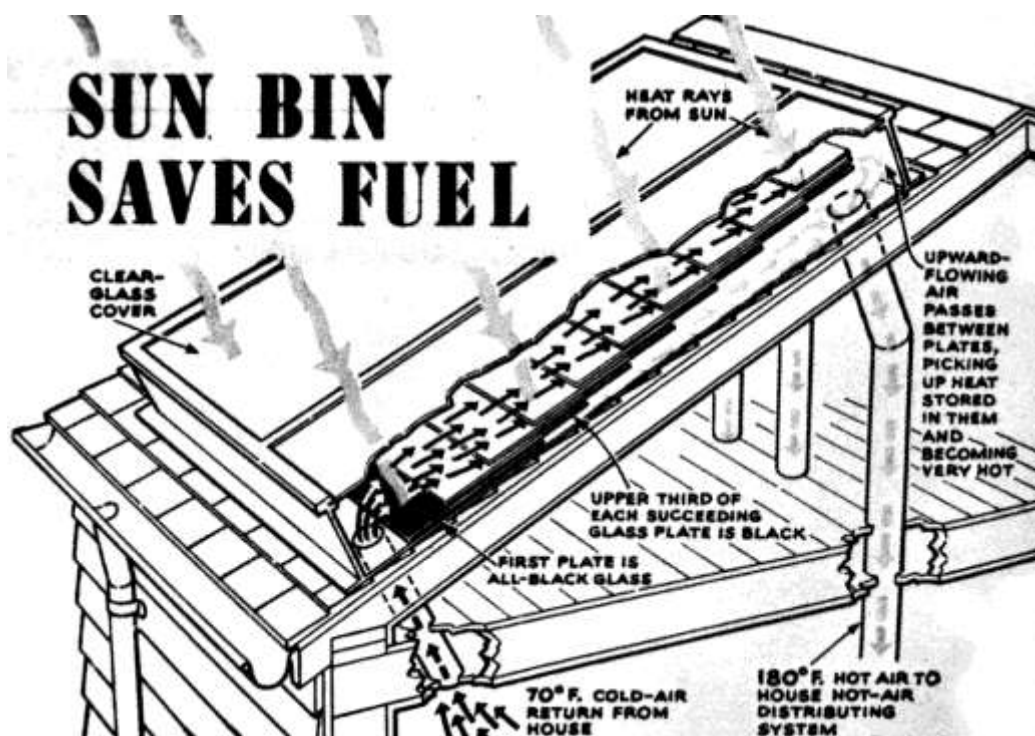


Figure 63 : Publicité pour le capteur à air conçu par G. O. G. Löf.
(K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1980, p. 204)

- 1 *Ibid.*, p. 205 ; B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 22.
- 2 *Ibid.*, p. 22.
- 3 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit., p. 205.
- 4 *Ibid.* ; B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 33-34.
- 5 A. Denzer, *The Solar House: Pioneering Sustainable Design*, op. cit., p. 183-184.
- 6 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 83.

Dans le système mis au point par Löff, l'association des capteurs à air et du stockage de pierre repose sur la convection forcée, comme toute technique solaire active, mais constitue une lignée technique originale qui se distingue des autres systèmes actifs utilisant l'eau. Cette lignée a rapidement évolué puisque les éléments mis au point par Löff ont été repris et modifiés afin de fonctionner de manière passive. Baer a notamment décomposé le système de Löff pour l'adapter aux contraintes de la convection naturelle, en plaçant les capteurs en dessous du volume de stockage et non plus au-dessus. Il a mené à partir du milieu des années 1960 différentes expérimentations avec des capteurs à air et des stockages de pierre pour le chauffage de constructions à *Drop City*, une célèbre communauté alternative de la contre-culture située dans le sud du Colorado¹. Les constructions chauffées avec cette technique doivent alors être surélevées ou situées sur une butte afin de profiter de l'élévation naturelle de l'air, ce qui constitue une contrainte topographique importante. En 1967, Baer a testé des capteurs à air fabriqués avec des matériaux récupérés qui fonctionnent sur le principe des cheminées solaires, puisqu'ils sont ouverts et servent à chauffer l'air extérieur² (*figure 64*). Ce système de capteur à boucle d'air ouverte est une hybridation entre différentes lignées techniques, mais constitue une première tentative d'adaptation du système mis au point par Löff aux exigences de la convection naturelle.

Mais le fait que ce système fonctionne en boucle ouverte ne permet pas de stocker une grande quantité d'énergie thermique. Conscient de cet inconvénient, Baer a mis au point au début des années 1970 un système dit « à boucle d'air fermée et stockage de pierre³ » (« *air-loop rock storage system* ») qui fonctionne intégralement sur le principe de la convection naturelle de l'air (*figure 65*). La première mise en œuvre du système à boucle d'air fermée est la maison de Paul Davis située à Corrales, au Nouveau-Mexique, et construite en 1972 sur une pente orientée au sud, à proximité de la maison de Baer⁴ (*figure 66*). L'air s'échauffe dans le capteur d'une surface totale de 30 m², s'élève par convection naturelle et traverse un stockage fait de pierres pour y transmettre une part de l'énergie thermique qu'il véhicule. Après s'être refroidi au contact des pierres, l'air retourne au capteur et le cycle se répète tant que la

1 Sur les expérimentations de Steve Baer et d'autres figures importantes de la contre-culture voir : A. Kirk, « Alloyed: Countercultural Bricoleurs and the Design Science Revival », p. 305-336 in : D. Kaiser, W. P. McCray (éds.) *Groovy Science: Knowledge, Innovation, and American Counterculture*, Chicago/Londres : University of Chicago Press, 2016.

2 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 67-69.

3 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 144.

4 *Ibid.*

température du capteur est supérieure à celle du stockage. L'apport d'air chaud utilisé pour le chauffage de l'habitation située au-dessus du stockage est contrôlé par des registres et suit le même mouvement convectif naturel¹ (figure 67). Le volume de stockage est composé de 32 m³ de gros galets (« *cobble* ») répartis sur une profondeur d'un peu plus d'un mètre sous le plancher du porche situé au sud de la construction². Au milieu de l'après-midi, la température des galets peut s'élever au-dessus de 30 °C alors même que la température extérieure est négative. Ce système, additionné aux autres techniques solaires passives employées dans cette construction (gain direct, claire-voie...) contribue à environ 75 % des besoins de chauffage de cette maison³.



Figure 64 : Capteur à air fabriqué à partir de vitres récupérées pour le chauffage d'un dôme à Drop City.
(Centre de Création Industrielle/Centre Georges Pompidou, *Énergies libres !*, Paris : CCI/Centre Georges Pompidou, 1976, p. 34.)

1 *Ibid.* En ventilation, un registre est un clapet permettant de régler le débit d'un fluide.

2 *Ibid.*, p. 145.

3 *Ibid.*, p. 144.

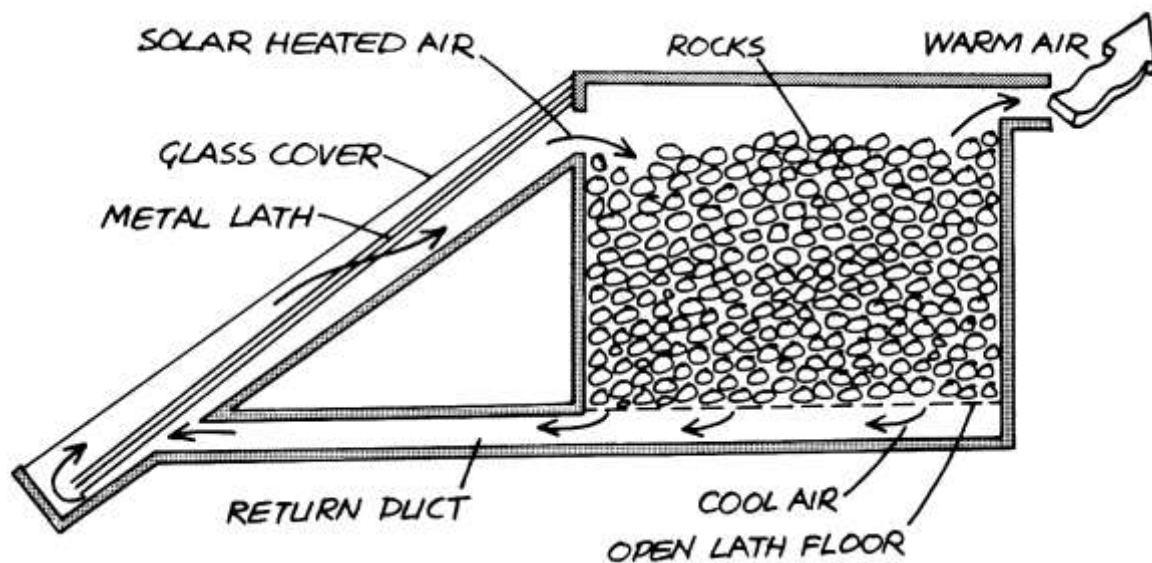


Figure 65 : Principe de thermosiphon du système à boucle d'air fermée et stockage de pierre.
 (B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville :
 Cheshire Books, 1976, p. 144)

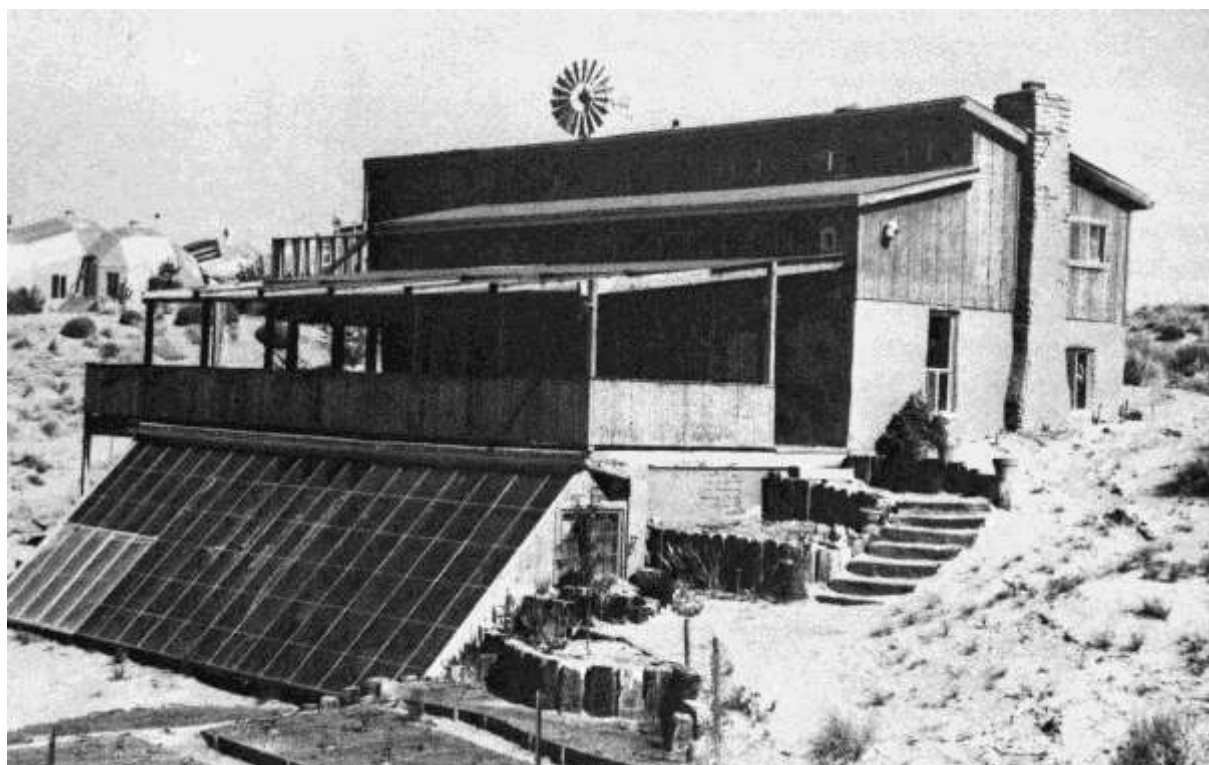


Figure 66 : Maison de P. Davis à Corrales conçue par S. Baer et équipée d'un système à thermosiphon.
 (B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville :
 Cheshire Books, 1976, p. 144)

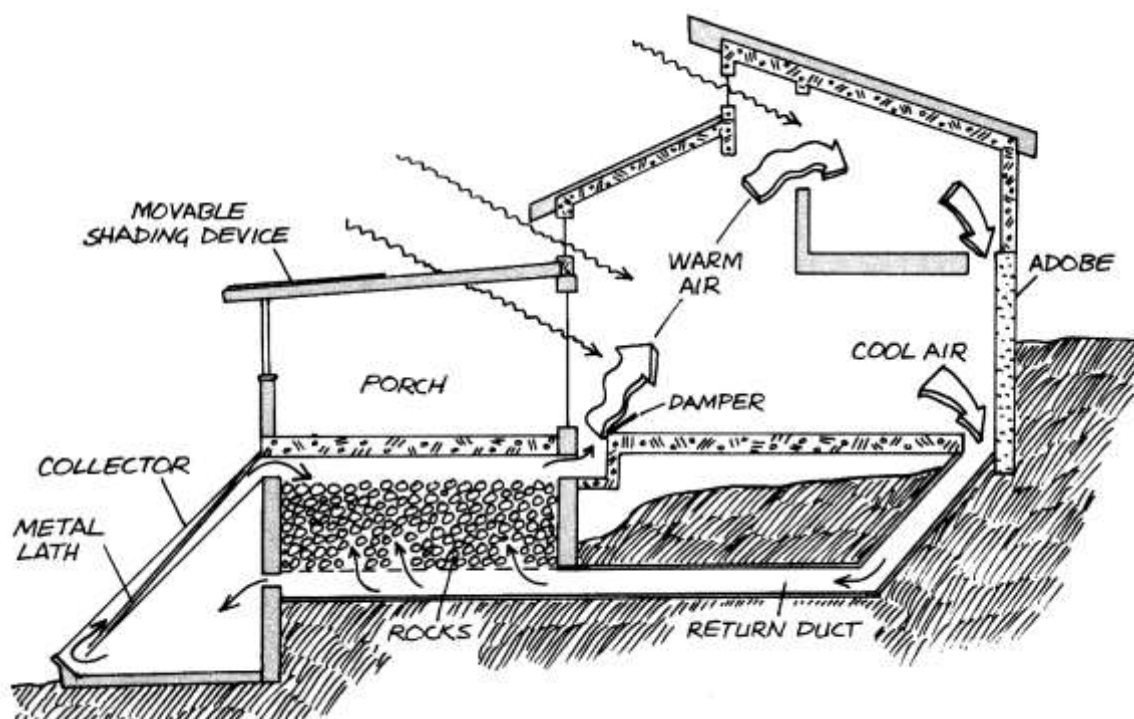


Figure 67 : Coupe de la maison de P. Davis à Corrales.

(B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, p. 145)

Bien qu'il regrette de ne pas avoir placé le stockage sous la construction elle-même plutôt que sous le porche, afin de profiter des déperditions thermiques pour le chauffage de sa maison, Paul Davis s'estime satisfait de ce système. Il affirme en 1976 :

« L'esthétique naturelle de la maison thermosiphon produit le sentiment d'être dans un endroit chaud plutôt que dans un endroit chauffé. Sa simplicité, dépendant des principes scientifiques les plus évidents et n'ayant pas de pièces susceptibles de casser, pas de plomberie susceptible de fuir, en fait un système idéal pour le non-mécanicien¹. »

Malgré ce succès, Baer relate dans son ouvrage *Sunspots* qui présente l'essentiel de ses expérimentations que les performances de ce système étaient considérées comme mauvaises

1 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 40-45 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « The natural aesthetic of the thermosiphon house produces a sense of being in a warm place rather than a warmed place. Its simplicity, depending on the most obvious of scientific principles and having no parts to break, no plumbing to leak, make it an ideal system for the non-mechanic. »

par Balcomb et les chercheurs du laboratoire de Los Alamos, qui s'appuyaient sur des simulations thermiques effectuées sur ordinateur¹. Il évoque également les sarcasmes d'autres ingénieurs, qui considéraient que pour être efficace la taille des capteurs d'un tel système devrait atteindre la hauteur de l'*Empire State Building* (381 m), alors que Baer avait obtenu des résultats très encourageants avec des capteurs d'à peine quatre mètres de long. Rappelant les bons résultats obtenus durant ses expérimentations et dans la maison de Paul Davis où chaque mètre carré de capteur collecte plus de 1000 kJ² (soit environ 270 Wh), Baer en déduit que les résultats obtenus par ces ingénieurs étaient incorrects et que leurs jugements négatifs tenaient au fait qu'ils étaient dans l'incapacité de dimensionner un tel système à partir de simples simulations³.

Ces critiques pointaient indirectement une difficulté inhérente à l'emploi de ce système, et à de nombreuses autres techniques solaires passives de captage isolé, qui est de minimiser la résistance à l'écoulement de l'air et les turbulences qu'elle engendre⁴. La prise en compte de ces phénomènes est déterminante pour la conception du volume de stockage et le calibre des pierres employées dans ce type de système doit être scrupuleusement étudié, afin de minimiser les pertes de charge pour un débit d'air élevé⁵. Baer est à l'origine des principales recherches expérimentales pour améliorer ce système⁶. Il a déduit des règles de dimensionnement qui ont été communiquées dès le milieu des années 1970⁷ et qui ont permis à d'autres architectes de poursuivre ses expérimentations⁸. Afin de minimiser les pertes de charge qui restaient mal connues pour un tel système à la fin des années 1970⁹, Mazria recommande l'utilisation de galets qui ne dépassent pas la grosseur du poing¹⁰. Cette règle a généralement été respectée.

Malgré ces difficultés et ces problèmes de conception, on trouve l'emploi de lits de galets pour le stockage de la chaleur en sous-sol dans de nombreuses maisons solaires passives dès la fin des années 1970, aux États-Unis comme en France. Le physicien et ingénieur français Pierre Lavigne (1935-2017), figure importante de la conception bioclimatique et auteur d'une

1 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 66.

2 *Ibid.*, p. 67.

3 *Ibid.*, p. 66.

4 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 144.

5 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 68, 106.

6 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 144.

7 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 72.

8 W. S. Morris, « Natural Convection Solar Collector », p. 596-601 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

9 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 40.

10 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 146.

thèse de référence sur le sujet au début des années 1980¹, a employé ce système dans plusieurs réalisations construites en 1977 aux Adrets, en Isère² (figure 68). L'une d'elles fonctionne sur le même principe que la maison de Paul Davis et les coupes transversales des deux constructions sont très semblables (figure 69). La construction conçue par Lavigne utilise 35 tonnes de galets situés sous le radier de la maison³. Les performances du système à boucle d'air fermée et stockage de pierre ont été largement reconnues, puisque certains architectes ont affirmé qu'il était « sans doute le système passif ayant le meilleur rendement⁴ ».



Figure 68 : Maison aux Adrets conçue par P. Lavigne et équipée d'un système à thermosiphon.
(J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 195)

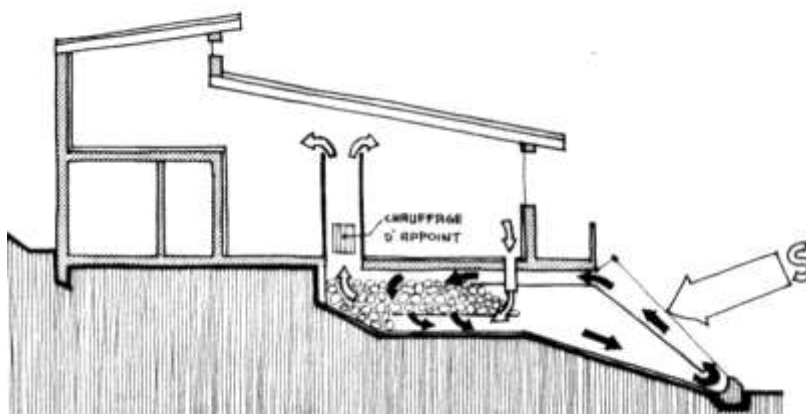


Figure 69 : Coupe de la maison conçue par P. Lavigne, similaire à celle de P. Davis.
(J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, Paris : CNRS/COMES/PIRDES, 1979, n. p.)

-
- 1 P. Lavigne, *Énergie, climat, confort thermohygrométrique, soleil et architecture*, 2 vol., Thèse de doctorat en architecture, Unité Pédagogique d'Architecture de Grenoble, 187 + 257 p. Dir. Inconnu. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, op. cit., F 33. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 3 J.-P. Ménard, M. Coiffait, « Panorama des constructions solaires françaises », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 66, op. cit. p. 51.
 - 4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 103. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

Baer a aussi poursuivi les recherches initiées par Löff sur l'optimisation des capteurs à air, afin de mieux comprendre les phénomènes thermiques qui y sont à l'œuvre pour les adapter aux contraintes de la convection naturelle, notamment la faible vitesse de l'air. Il a mené de nombreuses expérimentations avec des feuilles de métal déployées dans toute la largeur du capteur, qui forment un grillage qui multiplie la surface de contact avec l'air et maximise les échanges thermiques¹. Il a pu en déduire les règles suivantes :

« Le capteur doit avoir une grande surface à travers laquelle transférer la chaleur vers le flux d'air à écoulement lent. Nous avons constaté que plusieurs couches de lames en métal déployé fonctionnent bien à cet effet. Le canal d'écoulement à l'intérieur du capteur doit avoir une grande section transversale, de sorte que même à des vitesses lentes suffisamment d'air se déplace pour transporter la chaleur². »

En adaptant le principe du capteur à air et du stockage de pierre aux exigences de la convection naturelle, Baer a introduit de nombreuses modifications dans le système mis au point par Löff. D'autres ingénieurs et architectes ont développé de nouveaux types de capteurs à air et à eau en suivant la même démarche que Baer, entre la fin des années 1960 et le début des années 1980. Certains manuels consacrent de longs développements à tous les systèmes de captage isolé qui ont été imaginés, que ce soit à partir de certaines techniques solaires actives ou de chauffe-eau solaires modifiés³ (*figure 70*). L'exemple du système à boucle d'air fermée mis au point par Baer montre que le développement des techniques solaires passives de captage isolé s'est confronté à de nombreuses difficultés liées à l'emploi de la convection naturelle, ce qui explique que certains ingénieurs et architectes aient parfois privilégié la convection forcée.

1 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 71.

2 *Ibid.*, p. 67. Traduction personnelle, citation originale : « The collector should have a great deal of surface area through which to transfer heat to the slow flowing air stream. We have found that multiple layers of expanded metal lath work well for this purpose. The flow channel within the collector should have a large cross section so that even at slow velocities enough air moves to transport the heat. »

3 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 148-207.

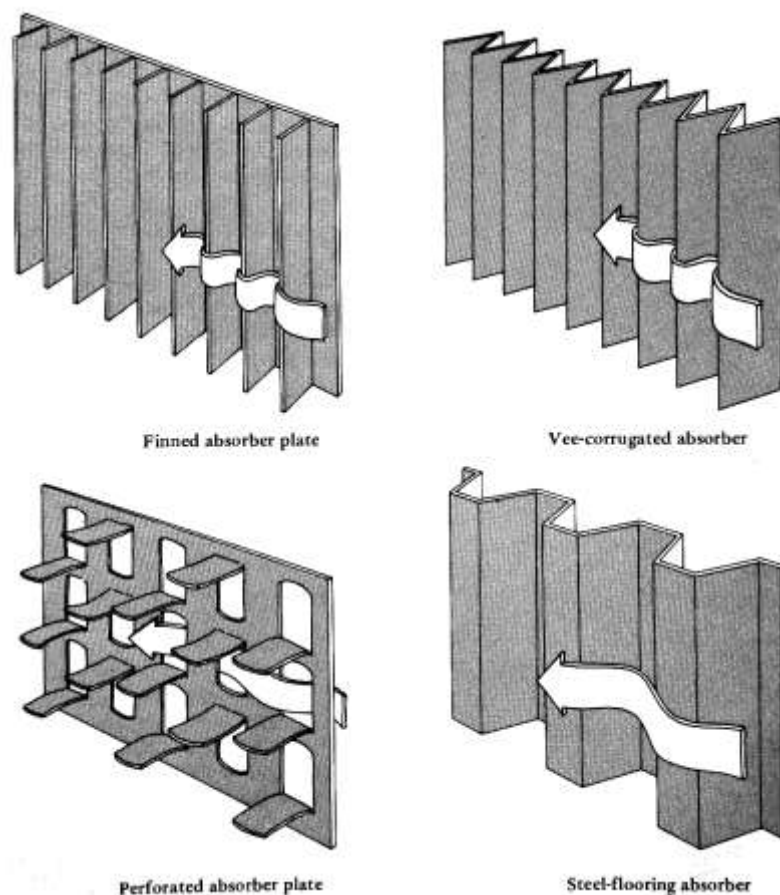


Figure 70 : Exemples de capteurs à air.

(B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, p. 169)

II.2.3.3. Stocker l'énergie solaire grâce à la convection forcée

Malgré son efficacité, le système de chauffage à boucle d'air fermée développé par Baer est techniquement et architecturalement très contraignant, puisqu'il oblige à concevoir l'intégralité de la construction en fonction du phénomène de convection naturelle, ce qui interdit d'emblée de placer le volume de stockage en dessous du niveau des capteurs. Le recours à la convection forcée dans les techniques solaires dites « hybrides¹ » s'explique par le souhait de s'affranchir des contraintes techniques imposées par la convection naturelle, afin de maximiser

1 M. J. Holtz, W. Place, R. C. Kammerud, « A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems », p. 283 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off, op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

les possibilités de stockage thermique. Ces techniques ont essentiellement servi à compléter les techniques solaires passives à gain direct déjà présentées.

Un exemple de réalisation qui associe des techniques solaires passives et hybrides est la maison de Douglas et Sara Balcomb située à Santa Fe, dans l'État du Nouveau-Mexique et construite en 1975 dans un quartier dénommé « First Village¹ » regroupant des maisons solaires expérimentales (*figure 71*). La morphologie de la construction suit les recommandations évoquées précédemment : la façade nord forme un angle arrondi, tandis qu'au sud une serre de 6 mètres de haut couvre toute la hauteur de la construction, mais est protégée par d'épais murs aux orientations est et ouest. L'ensemble de la construction bénéficie d'une isolation très performante². Dans cette réalisation, la serre fonctionne à la fois comme un système de captage direct et isolé : elle est couplée au mur massif intérieur en brique de terre crue (*adobe*) de 35 cm, qui transmet la chaleur avec un certain déphasage aux pièces adjacentes³, tandis que l'air échauffé qu'elle génère est aspiré en partie supérieure par deux gaines aspirantes et conduit aux deux stockages de galet de 25 tonnes chacun situés juste en dessous du plancher. Ils forment un total de 18 m³ de roche et transmettent la chaleur accumulée par conduction, rayonnement et convection naturelle dans l'espace habitable⁴ (*figures 72 et 73*). En plus de produire un bon niveau de confort, Sara Balcomb estime que ce système de stockage génère un chauffage continu de la construction pendant au moins trois jours nuageux, ce qui constitue un bon niveau d'autonomie dans ce climat parfois rigoureux⁵. L'ensemble de ces systèmes ainsi que les apports internes très importants permettent d'assurer 80 % des besoins de chauffage⁶. Cette construction est par ailleurs rafraîchie grâce à l'importante inertie thermique et la possibilité d'évacuer l'air chaud naturellement stratifié par une large ouverture en partie supérieure, pour ventiler par effet de cheminée⁷.

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 78.

2 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 150-154.

3 S. Balcomb, « The Solar Consumer – Living in a Glass House », p. 778 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 *Ibid.* ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 78.

5 *Ibid.*

6 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 78.

7 S. Balcomb, « The Solar Consumer – Living in a Glass House », p. 778-779 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)



Figure 71 : Maison de D. et S. Balcomb à Santa Fe.
(Popular Science, vol. 209, n° 6, décembre 1976)

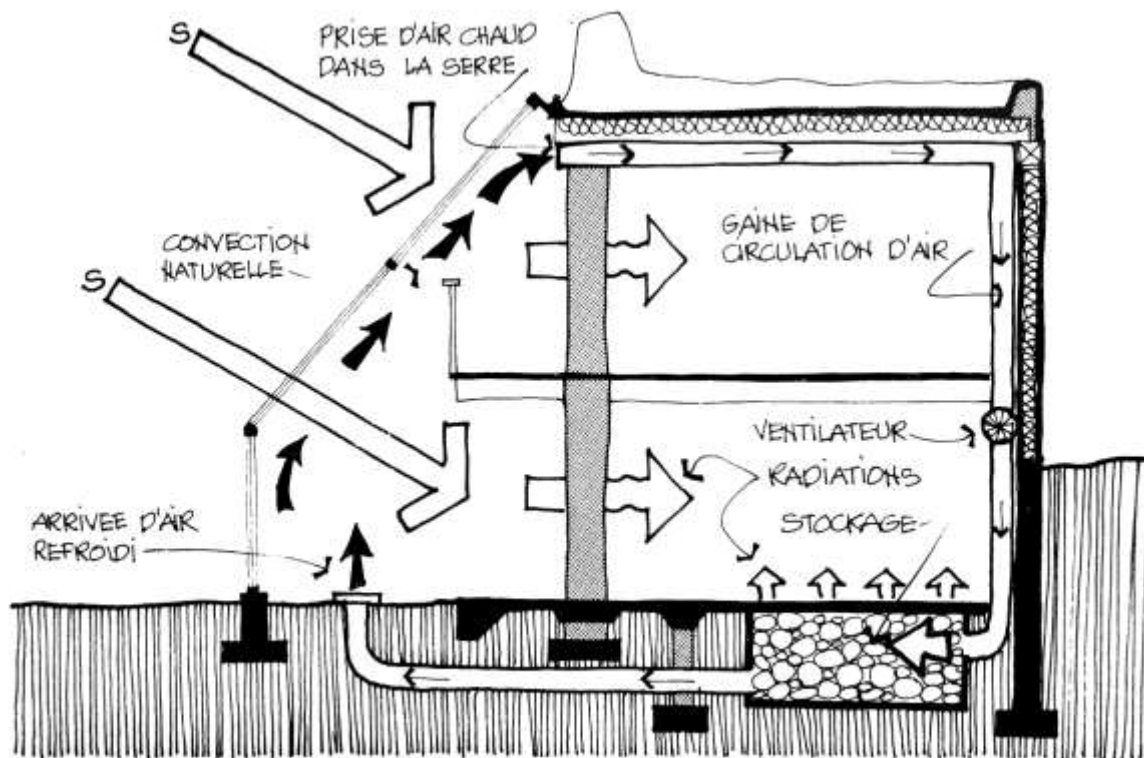


Figure 72 : Coupe de la maison de D. et S. Balcomb.
(P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 78)

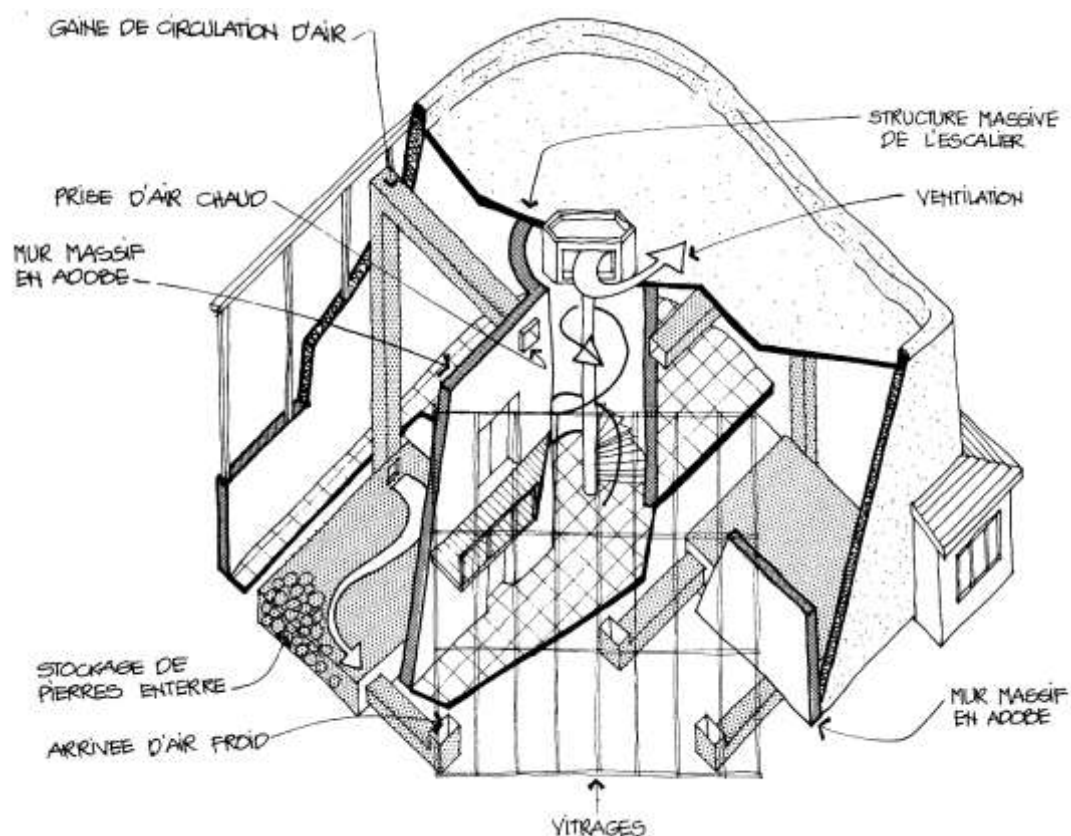


Figure 73 : Axonométrie de la maison de D. et S. Balcomb, d'après le numéro de décembre 1976 de *Popular Science*.

(P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 78)

En France, il existe des réalisations analogues qui associent des techniques solaires passives et hybrides. C'est le cas d'une maison construite durant l'été 1976 par Laignelot à Montlaur (43° nord) dans les Corbières, sur un site particulièrement exposé aux vents d'est (cers) et d'ouest (marin¹). Par souci de protection, la façade nord est partiellement enterrée, tandis que les façades est et ouest sont protégées par des espaces-tampons² (figure 74). D'une surface bien plus modeste que la maison de Balcomb évoquée précédemment, cette petite maison d'environ 65 m² dispose sur la façade sud inclinée à 65° par rapport à l'horizontale d'un système de captage direct (une serre de 6 m²), au-dessus duquel est intégrée une série de capteurs à air d'une surface totale de 16 m², associés à un stockage dans un lit de galets de 13

1 R. Laignelot, « L'Expérience d'un architecte habitant sa propre maison solaire », p. 73 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) ; J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 94.

2 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 95.

tonnes situé sous le radier de la construction¹ (figure 75). Laignelot explique ce choix par le fait qu'il était à l'époque méfiant de la performance des systèmes passifs, notamment des risques de surchauffe en été². Les capteurs à air sont fabriqués en tôle ondulée par souci d'économie et une partie de la surface de captage intègre un chauffe-eau solaire. L'air échauffé qu'ils produisent est aspiré dans la partie supérieure des capteurs, pour ensuite être soufflé sous une grille située en dessous du lit de galets, afin de répartir uniformément l'air chaud et limiter les pertes de charge³. Le transfert de la chaleur vers le lit de galets est assuré par un thermostat différentiel, qui actionne l'aspiration lorsque la température des capteurs est sensiblement supérieure à celle du stockage⁴. Ce dernier fonctionne à la manière d'un « plancher chauffant⁵ », comme dans la maison de Balcomb. Laignelot affirme que ce système permet de maintenir la température intérieure à 18 °C pour une température extérieure de 5 ou 6 °C durant une période ensoleillée, l'appoint de chauffage durant les périodes moins favorables étant fourni par une cheminée et un chauffage électrique⁶. Il permettrait une économie d'au moins 65 % et de près de 80 % en demi-saison⁷.



Figure 74 : Angle nord-ouest de la maison conçue par B. Laignelot à Montlaur.
(J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 97)

1 *Ibid.*, p. 96.

2 R. Laignelot, « L'Expérience d'un architecte habitant sa propre maison solaire », p. 73-74 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 *Ibid.*, p. 74.

4 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 97.

5 R. Laignelot, « L'Expérience d'un architecte habitant sa propre maison solaire », p. 74 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 *Ibid.*

7 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 97.

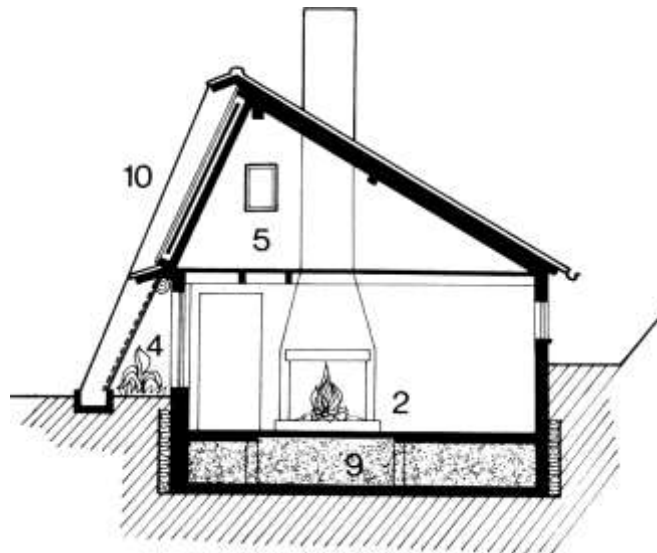


Figure 75 : Coupe de la maison conçue par B. Laignelot à Montlaur.
(J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 96)

L'association de techniques solaires hybrides afin d'améliorer les performances des techniques passives a été contemporaine de nombreuses tentatives souvent infructueuses pour améliorer les systèmes de stockage. En France, certains architectes comme Cordier ont essayé d'utiliser directement le sol comme stockage thermique, dans le prolongement des recommandations de Givoni. Ces tentatives n'ont pas été concluantes dans la mesure où la distribution de l'air chaud est apparue comme considérablement plus complexe dans un volume compact, malgré la multiplication des gaines de distribution et l'utilisation de galets à l'interface entre les bouches de soufflage et le sol¹. Dans la continuité des recherches de l'ingénieure américano-hongroise Mária Telkes menées dès la fin des années 1940, l'utilisation de matériaux à changement de phase, capable de restituer leur chaleur latente de fusion par cristallisation et ainsi d'optimiser le stockage de l'énergie thermique dans les éléments de construction, a été expérimentée dans certaines techniques². Des matériaux à changement de phase comme la paraffine ont effectivement été utilisés dans quelques rares constructions à la fin des années 1970³, aboutissant à des résultats médiocres et des développements qui se sont limités à l'époque à des applications expérimentales.

Depuis les premiers systèmes de captage direct, jusqu'aux complexes associations de techniques solaires hybrides et passives, nous avons suivi dans ces chapitres le développement

1 Entretien avec Jean-Pierre Cordier, le 22/05/2019 à Toulouse.

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 80.

3 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 191.

des principaux systèmes de chauffage qui seront mis en œuvre dans les constructions bioclimatiques et solaires passives dès le début des années 1970. Au terme de cette analyse, nous sommes en mesure de présenter une synthèse de l'évolution des techniques solaires passives de chauffage que nous avons présentées (*figure 76*), selon un principe de répartition des lignées techniques déjà utilisé par l'économiste Jean-Louis Maunoury à partir des travaux de Simondon¹. Nous avons réparti leur évolution en fonction du temps et du mode principal de stockage de la chaleur qu'elles utilisent (faible inertie, forte inertie et stockage massif). Nous avons distingué les emprunts indirects de principes déjà existants à des techniques antérieures sans qu'ils soient revendiqués, et les évolutions directes lorsqu'une technique est pensée et présentée comme l'évolution d'un système préexistant. Ce diagramme illustre donc les différentes lignées des techniques solaires passives de chauffage. Il montre les principales recherches sur les capteurs à air menées entre la fin du XIX^e siècle et le milieu du XX^e siècle, et l'intégration progressive d'une importante inertie thermique dans les techniques de captage direct et indirect, qui aboutit avec l'invention du mur Trombe qui a ensuite connu des évolutions.

Si les techniques solaires passives de chauffage ont concentré l'essentiel des expérimentations dans les zones climatiques tempérées et froides, à la même période de nombreuses techniques de rafraîchissement et de refroidissement conçues pour les climats de type méditerranéen et plus généralement pour l'ensemble des climats des latitudes plus basses ont aussi été développées, souvent à partir de recherches menées en zone tropicale. Nous avons évoqué précédemment le fait que certaines techniques conçues pour le chauffage des locaux, comme le mur Trombe, ont connu des évolutions afin de favoriser le refroidissement des éléments par ventilation. Mais à la différence des techniques que nous allons évoquer dans les parties suivantes, le mur Trombe n'a pas été initialement conçu comme une technique de rafraîchissement et ces évolutions ne servaient qu'à limiter l'élévation de température du mur durant les périodes de surchauffe. La conception des techniques passives de rafraîchissement repose sur des bases très différentes, puisqu'elles doivent être conçues pour favoriser la déperdition et la dissipation de l'énergie thermique vers l'extérieur², ce qui suppose la résolution de problèmes plus spécifiques que dans les techniques de chauffage qui fonctionnent essentiellement sur le principe du captage et de l'accumulation de l'énergie solaire.

-
- 1 J.-L. Maunoury, *La Genèse des innovations. La Création technique dans l'activité de la firme*, Paris : PUF, (coll. Bibliothèque d'économie contemporaine), 1968, p. 143-155.
 - 2 M. J. Holtz, W. Place, R. C. Kammerud, « A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems », p. 283 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

MODE DE STOCKAGE DE LA CHALEUR

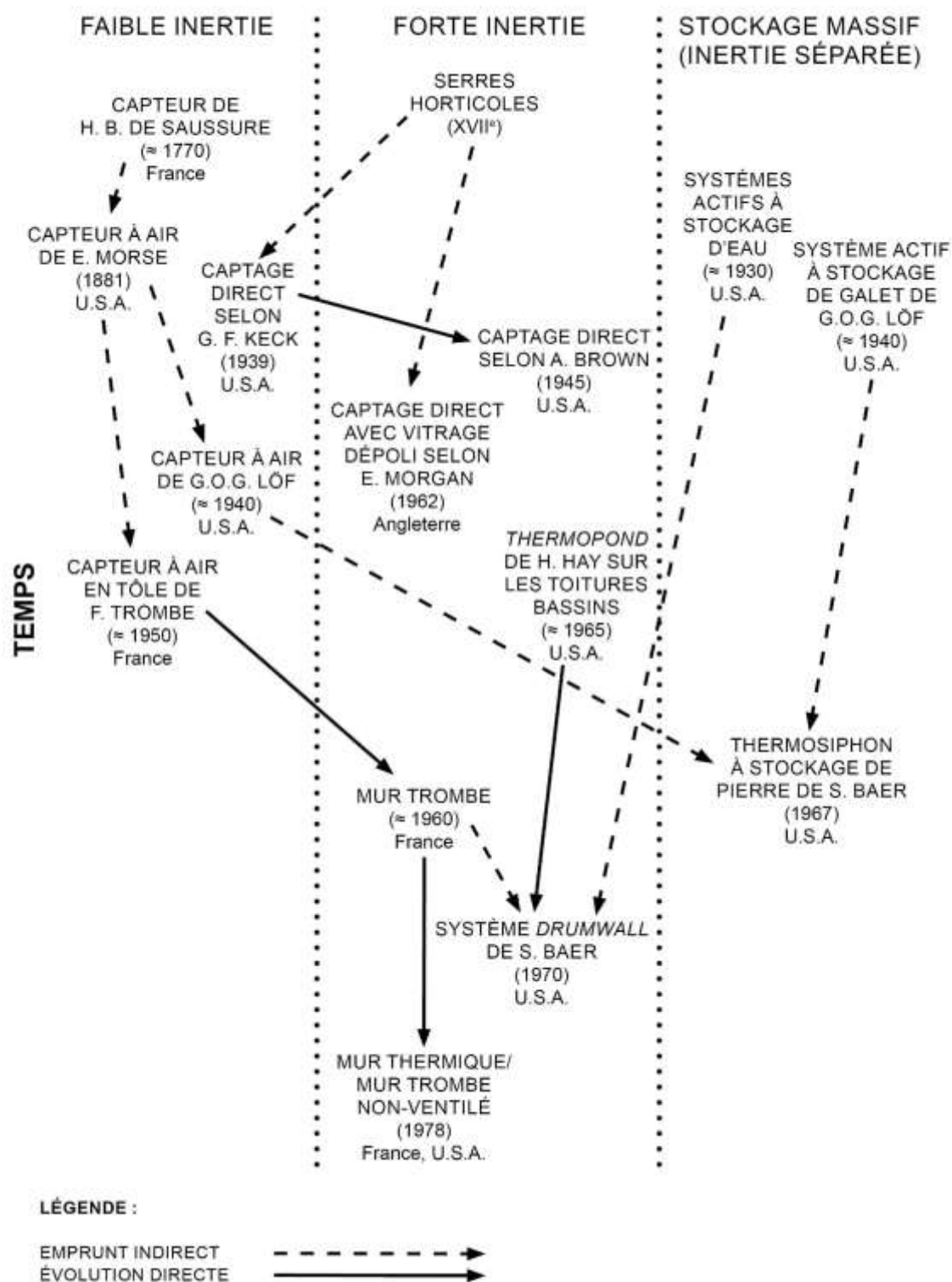


Figure 76 : Schéma des principales lignées techniques des techniques solaires passives de chauffage.
(schéma Clément Gaillard, novembre 2021)

II.3. Les techniques passives de rafraîchissement et leurs évolutions

À la différence des techniques solaires passives de chauffage dont il était possible d'établir une classification à partir du mode de captage et de l'emplacement de l'inertie, les techniques passives de rafraîchissement mobilisent différents éléments d'une construction et sont moins facilement identifiables à travers un système décomposable en sous-ensembles. Nous employons le terme générique de rafraîchissement (*cooling*) afin d'englober à la fois la sensation physique de rafraîchissement, qui peut être provoquée par une vitesse de l'air suffisamment élevée, ainsi que le phénomène physique de refroidissement qui concerne plus directement les matériaux et les surfaces d'une construction, mais dont l'action est déterminante sur la sensation physiologique de fraîcheur. Ce terme est également moins ambigu que celui de « climatisation », dont le sens est aujourd'hui associé au rafraîchissement des locaux, alors que de nombreux acteurs de la conception solaire passive l'ont utilisé pour désigner à la fois le chauffage et le rafraîchissement. Trombe affirme par exemple en 1961 que « [climatiser] une maison consiste à modifier le climat qu'elle présente naturellement pour rendre son habitat plus supportable et même agréable à l'homme¹ ». L'ingénieur Roubinet écrit en 1968 que climatiser consiste à « créer un climat artificiel, indépendant des conditions extérieures² » et Bardou et Arzoumanian emploient encore indifféremment ce terme pour le rafraîchissement ou le chauffage en 1978 et parlent de « climatisation d'hiver³ ». En ce qui nous concerne, nous utiliserons donc le terme de « climatisation » afin de qualifier un système susceptible de répondre à la fois à l'ensemble des besoins de rafraîchissement et de chauffage d'une construction.

À la différence des applications de l'énergie solaire pour le chauffage, une multitude de phénomènes physiques peuvent intervenir dans la production d'un rafraîchissement : ils peuvent dépendre directement du rayonnement solaire (évaporation, effet de cheminée...) ou indirectement des effets climatiques et microclimatiques que celui-ci engendre (vents, brises, alternance jour/nuit...). Malgré la diversité de ces phénomènes, on peut définir assez

1 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 113 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

2 M. Roubinet, *La Climatisation*, op. cit., p. 5.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 52.

précisément une technique passive de rafraîchissement en reprenant la définition donnée en 1979 par Michael Holtz, Wayne Place et Ronald Kammerud :

« Le refroidissement passif implique la décharge d'énergie par couplage sélectif du système aux parties les plus froides de l'environnement. Si les conditions environnementales sont correctes, ce flux d'énergie se produira par des moyens naturels. Les dissipateurs environnementaux (*environmental sinks*) possibles pour la chaleur du système sont le ciel, l'atmosphère et le sol¹. »

Les auteurs de cette définition emploient le terme anglais « *sink* » traduisible par « puits » ou « déversoir », mais qui dans ce contexte peut être traduit par « dissipateur » puisqu'il concerne un système thermique. Cette définition insiste sur le fait que les facteurs et éléments d'un climat sont déterminants dans l'action de dissipation, donc de rafraîchissement. On peut en déduire que l'emploi de certaines techniques passives de rafraîchissement est étroitement limité à des climats et des microclimats déterminés dont il sera nécessaire de préciser la nature. Par exemple, le rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde ne peut fonctionner que dans des conditions hygrométriques déterminées :

« Dans le refroidissement vers le ciel, le rayonnement du système traverse l'atmosphère et se dissipe dans l'espace extra-atmosphérique. Du point de vue environnemental, c'est le mode de refroidissement le plus "pur", car aucune énergie déchargée depuis le système n'apparaît dans le microclimat local. Le refroidissement radiatif du ciel fonctionne bien dans les environnements avec un ciel clair, et a le potentiel de refroidir le système en dessous de la température de l'air ambiant². »

Mise à part la protection des constructions suivant les dispositions que nous avons évoquées précédemment qui permettent d'en limiter l'échauffement, les principaux

-
- 1 M. J. Holtz, W. Place, R. C. Kammerud, « A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems », p. 286 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off, op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille). Traduction personnelle, citation originale : « Passive cooling involves the discharge of energy by selective coupling of the system to the cooler parts of the environment. If the environmental conditions are correct, this energy flow will occur by natural means. Possible environmental sinks for heat from the system are the sky, atmosphere, and ground. »
 - 2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « In sky cooling, radiation from the system passes through the atmosphere and dissipates into outer space. Environmentally, it is the "purest" mode of cooling, since none of the energy discharged from the system appears in the local microclimate. Radiative sky cooling works well in environments with clear skies, and has the potential to cool the system below the ambient air temperature. »

phénomènes physiques susceptibles de produire un rafraîchissement sont essentiellement la convection naturelle et forcée, le rayonnement de grande longueur d'onde, le changement de phase de l'eau (évaporation) et éventuellement la conduction à travers le sol ou un matériau massif¹. Le recours à la convection naturelle et forcée concerne essentiellement les problèmes de ventilation naturelle, dont l'essentiel des travaux provient des recherches en zone tropicale. Si elle est rarement présentée comme une technique de rafraîchissement, son utilisation est cependant cruciale dans l'ensemble des constructions bioclimatiques et solaires passives, même dans les climats froids et tempérés, et a posé de nombreux problèmes qui ont été résolus durant la période qui nous intéresse. Nous aborderons dans un premier temps les recherches menées sur la ventilation naturelle pour le rafraîchissement, qui peut être produite par l'action des vents ou des brises selon une orientation favorable, mais également sous l'effet des différences de températures au sein d'une même construction (effet de cheminée). Dans un second temps, nous aborderons le développement des techniques utilisant le rayonnement de grande longueur d'onde, ainsi que l'évaporation pour le refroidissement des constructions. Enfin, nous étudierons dans un dernier temps le développement des techniques d'isolation mobile à des fins de refroidissement et même de climatisation naturelle des habitations.

II.3.1. Rafraîchissement et refroidissement par ventilation naturelle

II.3.1.1. La ventilation naturelle, une notion équivoque

Si l'expression de « ventilation naturelle » désigne assez justement l'ensemble des techniques que nous allons évoquer dans cette partie, elle regroupe cependant des phénomènes assez distincts. Comme l'explique Givoni, « [les] flux d'air qui traversent un bâtiment sont provoqués par la présence d'un gradient de pressions² », qui provient soit de « l'action des vents³ », soit du « gradient de température entre l'air intérieur et l'air extérieur⁴ », bien qu'en pratique ces deux phénomènes puissent se combiner. Ces flux existent soit sous l'action d'une convection forcée, produite par les vents ou les brises, soit sous l'action d'une convection naturelle, suivant une différence de température à l'échelle du microclimat de la construction.

1 *Ibid.*

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 295.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

Dreyfus, dont l'ouvrage sur la ventilation date de 1960 et reste encore aujourd'hui une référence pour certains professionnels¹, donne une définition assez claire de ces différentes notions :

« [II] faut faire une distinction entre le vent, donnée météorologique du lieu, et la vitesse de l'air au voisinage immédiat ou à l'intérieur des constructions, vitesse qui est conditionnée par l'environnement immédiat et la forme de la construction, le parti architectural et la forme des ouvertures. Par ventilation, on entend plus précisément les déplacements d'air à l'intérieur d'une construction. Lorsque la ventilation se fait en l'absence de tout dispositif mécanique, on parle de ventilation naturelle. La ventilation naturelle peut être due, soit au vent, soit à l'effet de cheminée, lequel vient de la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid. La ventilation due au vent est dite transversale lorsque le vent entre dans la construction par une façade et sort par la façade opposée. C'est là le mode de ventilation le plus important dans la pratique². »

L'utilisation de la ventilation naturelle comme une technique de contrôle thermique et de rafraîchissement n'est cependant pas partagée par l'ensemble des ingénieurs de l'époque, qui présentent généralement la ventilation comme une exigence sanitaire. Les ouvrages professionnels du milieu du XX^e siècle traitant du conditionnement d'air abordent très rapidement les problèmes de ventilation naturelle sous l'angle de l'infiltration et du renouvellement d'air, avec les problèmes de préchauffage de l'air neuf posés par le débit de ce renouvellement d'air³. La ventilation suivant un débit minimum de renouvellement d'air s'explique avant tout par des nécessités hygiéniques⁴ (CO₂, humidité...), mais les techniques et les dispositions que nous allons présenter dans ce chapitre ont été conçues pour servir la fonction physiologique de rafraîchissement pour les habitants et celle de refroidissement de la structure construite en période nocturne. Elles reposent sur une approche radicalement différente des phénomènes aérauliques puisque la valeur significative pour quantifier les effets de la ventilation pour le rafraîchissement n'est pas le débit d'air en volumes par heure, mais sa vitesse et la répartition de son écoulement dans le volume habitable, qui a fait l'objet d'études approfondies dès les années 1950⁵. Le potentiel de la ventilation naturelle pour le

1 Entretien avec David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 149.

3 A. Missenard, R. Cadiergues, *Le Chauffage, la ventilation, le conditionnement d'air*, 2e éd., Paris : Eyrolles, (coll. Traité du bâtiment), 1956, p. 28-30.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 276-282 ; D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelle*, op. cit., p. 99.

5 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 282.

rafraîchissement a été compris par des acteurs au contact des problèmes posés par le contrôle thermique dans les climats chauds, et particulièrement dans les climats chauds et humides. C'est le cas de Dreyfus, de Maxwell Fry et de Jane Drew, d'Otto Koenigsberger ou de Baruch Givoni, à qui l'on doit l'essentiel des recherches sur ces sujets et la mise au point des connaissances qualitatives fondamentales relatives aux phénomènes de ventilation naturelle.

Suivant les conditions vestimentaires des individus considérés, la température et l'humidité absolue, une vitesse de l'air plus ou moins élevée au voisinage de la peau produit une sensation de rafraîchissement par convection et évaporation¹. Ces phénomènes physiologiques de régulation thermique ont été étudiés très précisément par Givoni, qui possède initialement une formation de médecin². Du point de vue physiologique, il affirme en 1969 que « [la] vitesse de l'air nécessaire pour atteindre le confort augmente avec la température de l'air³ » mais qu'au-delà de 35 °C, qui est la température superficielle de la peau⁴, « une augmentation de la vitesse de l'air élève l'apport de chaleur convective⁵ ». Il en déduit que dans les climats chauds « le facteur vitesse de l'air semble intervenir, beaucoup plus comme accélérateur des pertes par évaporation que par son influence sur les pertes par convection⁶ ». Dans les régions chaudes et humides, Givoni considère qu'il faut « obtenir une vitesse de l'air supérieure à 2 m/s⁷ », en utilisant « les vents dominants pour déclencher ce mouvement d'air⁸ ».

Sur ce point Givoni s'oppose à Dreyfus qui estime à partir de son expérience en zone tropicale qu'une vitesse aussi élevée n'est jamais réalisée en pratique, « même dans une construction conçue en fonction d'une ventilation optima⁹ ». Il affirme qu'à partir d'une vitesse de 0,5 m/s la sensation de rafraîchissement devient appréciable¹⁰. Par comparaison, Dreyfus rappelle que la vitesse nécessaire au renouvellement d'air acceptable d'une construction n'excède pas 0,10 m/s, ce qui correspond à des « conditions d'air calme¹¹ », bien différentes de celles « qu'il faudra réaliser si l'on veut obtenir une amélioration réelle du confort¹² ». En reprenant la notion de température résultante que nous avons évoquée précédemment, il

1 *Ibid.*, p. 42-46.

2 *Ibid.*, p. 37-117.

3 *Ibid.*, p. 283.

4 *Ibid.*, p. 43.

5 *Ibid.*, p. 283.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 34.

7 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 289.

8 *Ibid.*

9 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 150.

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*, p. 151.

12 *Ibid.*

considère d'une manière générale que lorsque « la vitesse de l'air augmente, les autres éléments du confort restant les mêmes, la température résultante tend à diminuer¹ ». Ces débats relatifs à la vitesse de l'air concernent la ventilation naturelle directe, conçue pour produire une sensation physiologique de rafraîchissement, ce qui suppose que le flux d'air soit capté par des éléments spécifiques (imposte, ouvrant persienné...) pour être dirigé vers les habitants (*figure 77*). Les dispositifs à lames orientables et manipulables, comme les persiennes et les jalousies, qui permettent un bon contrôle de la direction du flux d'air, ont été particulièrement étudiés en architecture tropicale pour le contrôle de la ventilation naturelle (*figure 78*).

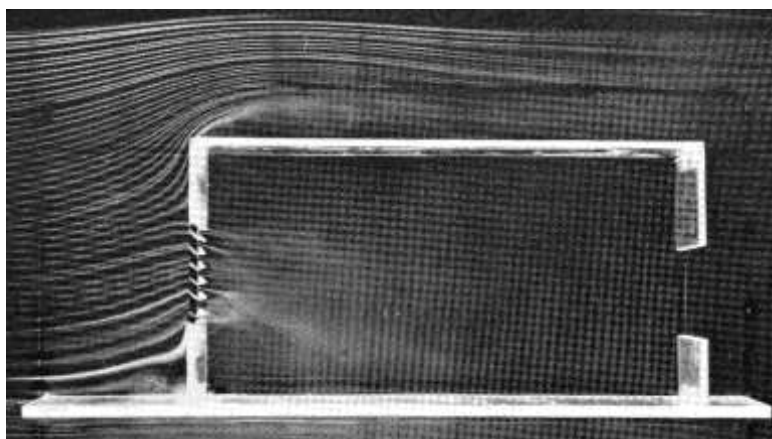


Figure 77 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur dirigé par des stores vénitiens faite au Texas Engineering Experiment Station.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 111)

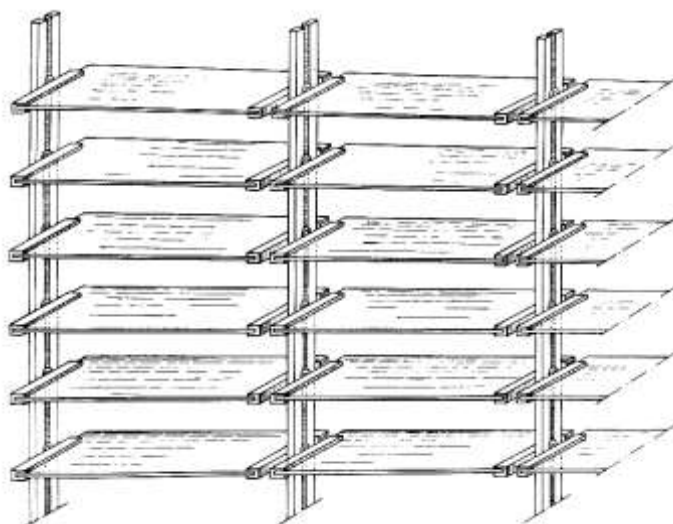


Figure 78 : Dispositif à lames orientables pour la ventilation.
(J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical. La Protection des constructions contre la chaleur. Problèmes de ventilation*, Paris : Eyrolles, 1960, p. 163)

1 *Ibid.*, p. 38

La vitesse de l'air est tout aussi importante lorsque la ventilation naturelle est conçue pour agir sur le refroidissement d'une structure, soit pour accélérer ses déperditions thermiques en période nocturne, soit pour contenir son échauffement en journée¹. La différence de température entre l'air intérieur et extérieur est également déterminante puisque les échanges convectifs sont essentiellement fonction de cette différence. À partir des connaissances déjà établies en thermique, Dreyfus rappelle que « les échanges par convection entre une paroi et l'air ambiant sont pratiquement proportionnels à l'écart de température entre la surface de la paroi et l'air² ». Cette caractéristique des échanges convectifs limite l'utilisation de la ventilation pour le refroidissement de la structure construite à certains climats ou à certaines périodes de l'année, lorsque l'amplitude diurne des températures est suffisamment importante : le but est que « l'air traversant la construction soit le plus froid possible³. » Bien que la ventilation naturelle puisse à la fois assurer les fonctions de rafraîchissement et de refroidissement, elles correspondent généralement à des types de climats ou à des périodes différentes. Comme l'explique Ayoub, l'utilisation de la ventilation pour le rafraîchissement concerne principalement les zones tropicales humides, où l'amplitude diurne des températures est faible, ce qui explique que « la ventilation s'adresse directement à l'individu, c'est-à-dire aux zones du local où il vit⁴. » La fonction de la ventilation est différente dans les zones arides et sèches, où l'amplitude diurne des températures est plus importante et permet que les « maçonneries perdent, la nuit, les calories accumulées le jour [...] par la convection dans l'air frais du soir⁵. »

Quand il est possible, le recours à la convection forcée est considéré comme le moyen le plus simple pour abaisser la température intérieure de l'air et des parois d'une construction. À la différence du rafraîchissement, la ventilation en vue du refroidissement d'une structure implique que le flux d'air soit le plus possible amené au contact des éléments de construction massifs, dont il est nécessaire d'éliminer l'énergie thermique accumulée en journée⁶. Comme Ayoub, Dreyfus insiste sur la nécessité d'avoir une vitesse de l'air élevée et un flux d'air dirigé au contact des parois intérieures, mais ses observations en zone tropicale ont montré qu'il « ne

1 *Ibid.*, p. 23 ; B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 284-288.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 151.

3 *Ibid.*

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 134.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 74.

semble pas que la convection forcée puisse accroître d'une façon notable la quantité de chaleur cédée à l'air ambiant par la construction¹. » À partir d'un rapide calcul, pour un petit local dont les températures des surfaces intérieures sont supérieures de 5 °C à celle de l'extérieure, il estime que cette vitesse doit être « de l'ordre de 0,50 m/s ou plus, au moins en certains points du local² ». Une vitesse aussi élevée permet d'assurer environ soixante renouvellements d'air complets par heure³. Selon ses calculs, Dreyfus estime que les vitesses nécessaires au rafraîchissement et au refroidissement sont comparables, à l'exception du fait que le flux d'air est dirigé soit vers les habitants, soit vers les parois massives. Il conclut :

« [Les] conditions de ventilation permettant d'abaisser la température résultante intérieure, et celles permettant de maintenir la température de l'air intérieur sensiblement égale à celle de l'air extérieur et, simultanément, de refroidir d'une façon efficace les parois intérieures d'une construction aux heures fraîches, sont du même ordre de grandeur⁴. »

II.3.1.2. Ventilation naturelle et problèmes d'orientation : l'apport de Givoni

La ventilation naturelle par le captage des vents ou des brises pendant les périodes favorables pour le rafraîchissement est un problème complexe qui dépend du type de climat et de microclimat où est située la construction. Dreyfus considère que le vent « est la donnée météorologique la plus variable⁵ » et qu'il « varie, à la fois, en direction et en vitesse⁶ », bien qu'en règle générale celui-ci soit « plus faible la nuit que dans la journée⁷. » En réalité, si la variabilité du vent « est considérable à l'échelle de la minute⁸ », elle est cependant « remarquablement faible à l'échelle de la journée et surtout du mois⁹ » selon les climatologues de l'époque, si bien qu'il est possible d'obtenir sur une série suffisamment longue des informations sous forme de « roses des vents¹⁰ », qui représentent la direction prédominante des vents mensuellement ou annuellement, à l'échelle du climat régional ou local. Certains

1 *Ibid.*, p. 151.

2 *Ibid.*, p. 152.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical, op. cit.*, p. 155.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 Ch-P. Péguay, *Précis de climatologie, op. cit.*, p. 268.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

architectes ont effectivement fait usage de roses des vents¹. En ce qui concerne les brises et les autres vents locaux qui dépendent étroitement du climat local et du microclimat, leur captage a aussi été recherché pour la ventilation naturelle. Gerber signale par exemple l'utilisation du cers et des vents marins afin d'assurer « toutes les combinaisons de ventilations croisées² » dans ses constructions localisées à Treilles, par l'intermédiaire de petites ouvertures basses et hautes situées dans les façades est et ouest.

Le principal problème à résoudre pour favoriser la ventilation naturelle concerne l'orientation de la construction par rapport à la direction des vents et des brises, qui doivent être suffisamment fréquents pendant les périodes favorables au rafraîchissement. Givoni a mené les principales études sur ce problème au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa en 1962³. Il part du principe communément admis « que pour obtenir les conditions de ventilation optimales, il faut disposer les fenêtres d'entrée directement face au vent, toute déviation de cette direction entraînant une réduction de la vitesse de l'air intérieur⁴. » Cette règle intuitive est particulièrement contraignante et peut entrer en contradiction avec les choix d'orientation relatifs à l'ensoleillement. L'étude de Givoni réalisée en soufflerie a apporté des éléments importants à même de résoudre cet antagonisme entre différentes exigences d'orientation. Il résume en ces termes ses résultats :

« L'étude a démontré que dans une pièce possédant deux fenêtres sur ses parois opposées, où l'entrée d'air fait face directement au vent extérieur, le principal flux d'air s'écoule en ligne droite de l'entrée vers la sortie [...]. Lorsque le vent a une incidence de 45° sur la fenêtre d'entrée de la même pièce, la plus grande partie du volume d'air s'anime d'un mouvement turbulent, tournant autour de la pièce, augmentant ainsi le flux d'air le long des murs et dans les angles⁵. »

Il en déduit « que les meilleures conditions de ventilation sont réunies lorsque le flux d'air doit changer de direction à l'intérieur de la pièce, et surtout lorsque le flux se déplace directement de l'entrée à la sortie⁶. » Ce résultat est important dans la mesure où il permet de faciliter la

1 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., p. 18.

2 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 32 ; M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 65-67.

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 303.

4 *Ibid.*, p. 303.

5 *Ibid.*, p. 304.

6 *Ibid.*

résolution de l'antagonisme entre l'orientation en fonction des vents dominants ou de l'ensoleillement : l'étude de Givoni permet de faire varier l'orientation de la façade d'une construction de près de 90°, celle-ci pouvant s'éloigner de 45° de part et d'autre de la direction des vents dominants. Pour un vent dominant de direction ouest, l'orientation optimale d'une façade du point de vue de la ventilation naturelle pourra être au sud-ouest jusqu'au nord-ouest, la protection solaire étant de surcroît plus facilement réalisable pour ces orientations¹. Givoni affirme que ces « conclusions sont d'une grande importance pratique dans les régions où la direction des vents dominants est de secteur ouest ou est² », ces orientations étant « les plus difficiles à protéger du point de vue de l'ensoleillement³. » Elles seront effectivement abondamment reprises et appliquées par la suite.

Ces problèmes d'orientation sont indissociables de ceux relatifs au dimensionnement et au positionnement des ouvertures en vue de réaliser une ventilation transversale. Les principales recherches sur ce sujet datent du début des années 1950 et proviennent du Texas Engineering Experiment Station⁴. Les études en soufflerie menées par ce centre de recherche ont notamment mis en évidence les effets de l'inertie des masses d'air et le rôle de l'aménagement intérieur, plus particulièrement des cloisons perpendiculaires à la direction du flux d'air, dans la réalisation d'une ventilation transversale satisfaisante⁵ (*figure 79*). Parmi les recommandations relatives à l'aménagement intérieur et à la hauteur des ouvertures en fonction du type de pièce à ventiler (chambre, bureau...), les résultats les plus intéressants qui ont été déduits des recherches du Texas Engineering Experiment Station concernent la proportion entre la surface de l'ouverture d'entrée au vent et celle de sortie sous le vent. Dans le cas d'une ventilation transversale, les ingénieurs de ce centre de recherche ont observé qu'il était possible d'accélérer sensiblement la vitesse de l'air à l'intérieur de la construction par effet Venturi⁶. Si le flux d'air traversant la construction est maximal lorsque les surfaces des ouvertures d'entrée et de sortie sont égales (*figure 80*), il est possible d'augmenter sa vitesse maximale en prévoyant

1 *Ibid.*, p. 305.

2 *Ibid.*, p. 304.

3 *Ibid.*

4 W. W. Caudill, J. M. Rowlett, W. E. Scott, *et al.*, « Architecture in the Wind Tunnel », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, *op. cit.*, p. 170-178.

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 102-110.

6 *Ibid.*, p. 104.

que l'ouverture de sortie, située sous le vent, soit largement plus grande que l'ouverture d'entrée, située face au vent¹ (*figure 81*). Résumant ces recherches, Ayoub écrit :

« Pour obtenir le maximum de vitesse de l'air à l'intérieur d'une pièce, il faudra que l'ouverture soit plus grande à la sortie qu'à l'entrée. Ainsi, pour une même ouverture à l'entrée, la vitesse à l'intérieur d'une pièce est d'autant plus grande que la surface de sortie est plus importante. Cette règle est fondamentale². »

Cette règle a très largement circulé et est évoquée par tous les acteurs préoccupés par les problèmes de ventilation naturelle³. Elle est précisée par Dreyfus, qui affirme à partir de ses observations que « la vitesse de l'air dans la pièce sera plus élevée lorsque les orifices de sortie, c'est-à-dire les ouvertures qui se trouvent sur la façade opposée au vent, auront une surface égale à une fois et demie celle des orifices d'entrée⁴. »

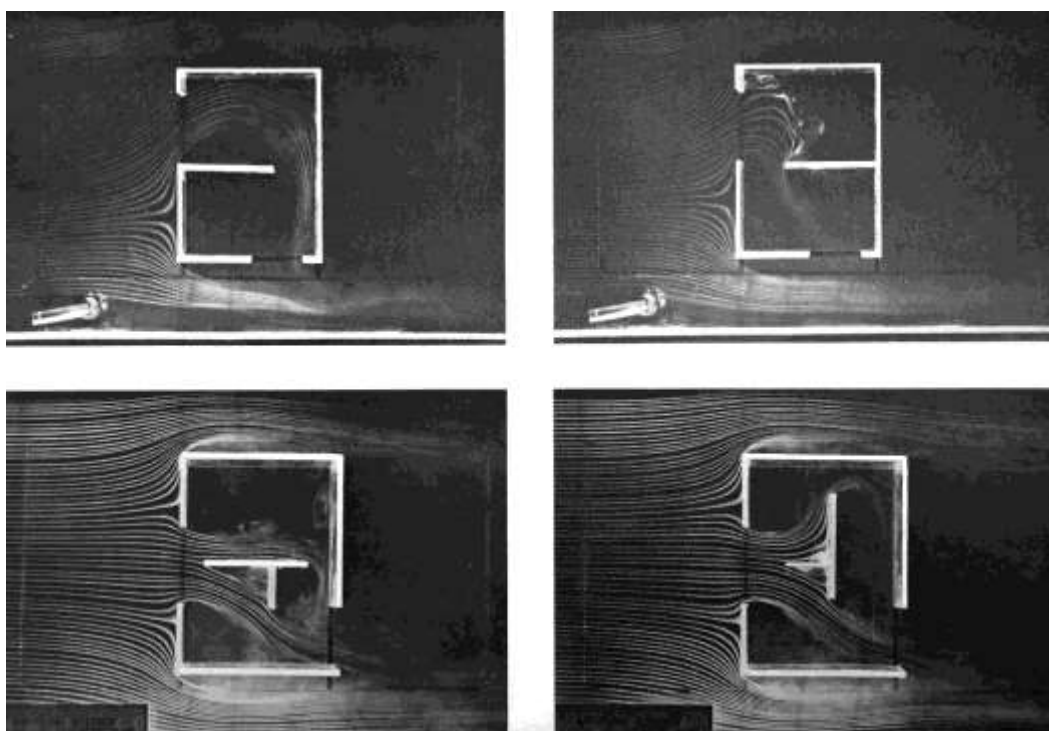


Figure 79 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur en fonction de l'aménagement faite au Texas Engineering Experiment Station.

(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 107)

-
- 1 W. W. Caudill, J. M. Rowlett, W. E. Scott, *et al.*, « Architecture in the Wind Tunnel », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, *op. cit.*, p. 174 ; V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 105.
 - 2 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 135.
 - 3 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 24/06/2019 à Paris.
 - 4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 185.

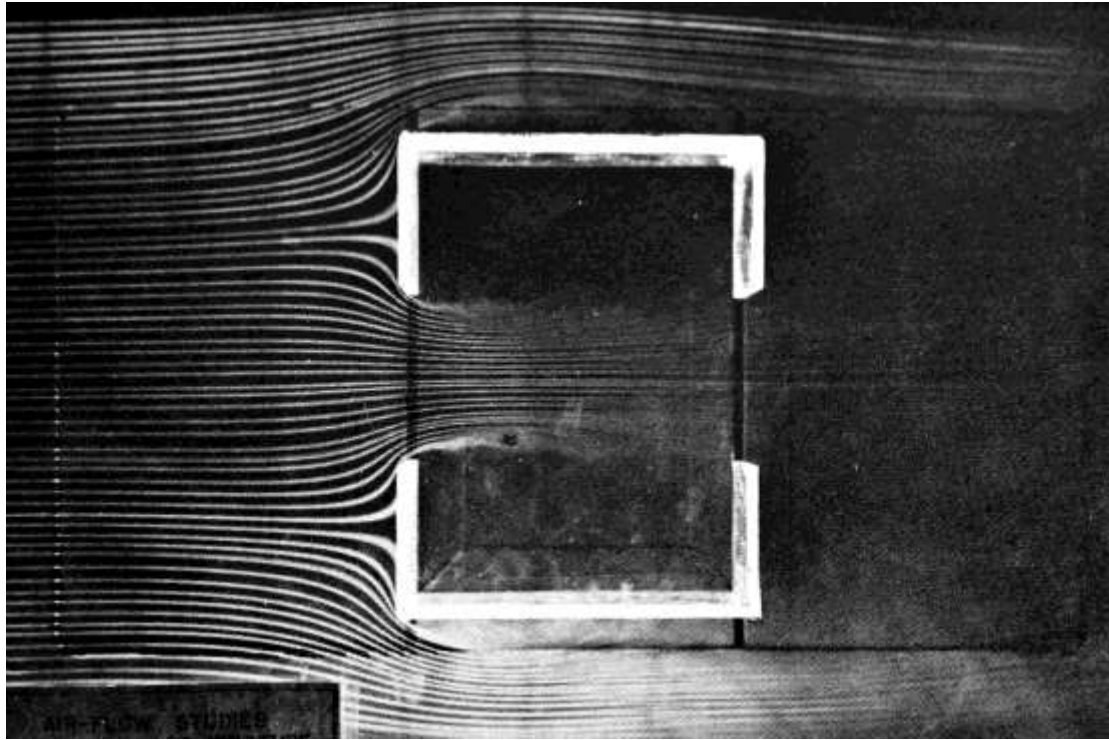


Figure 80 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur pour des ouvertures de même taille faite au Texas Engineering Experiment Station.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 105)

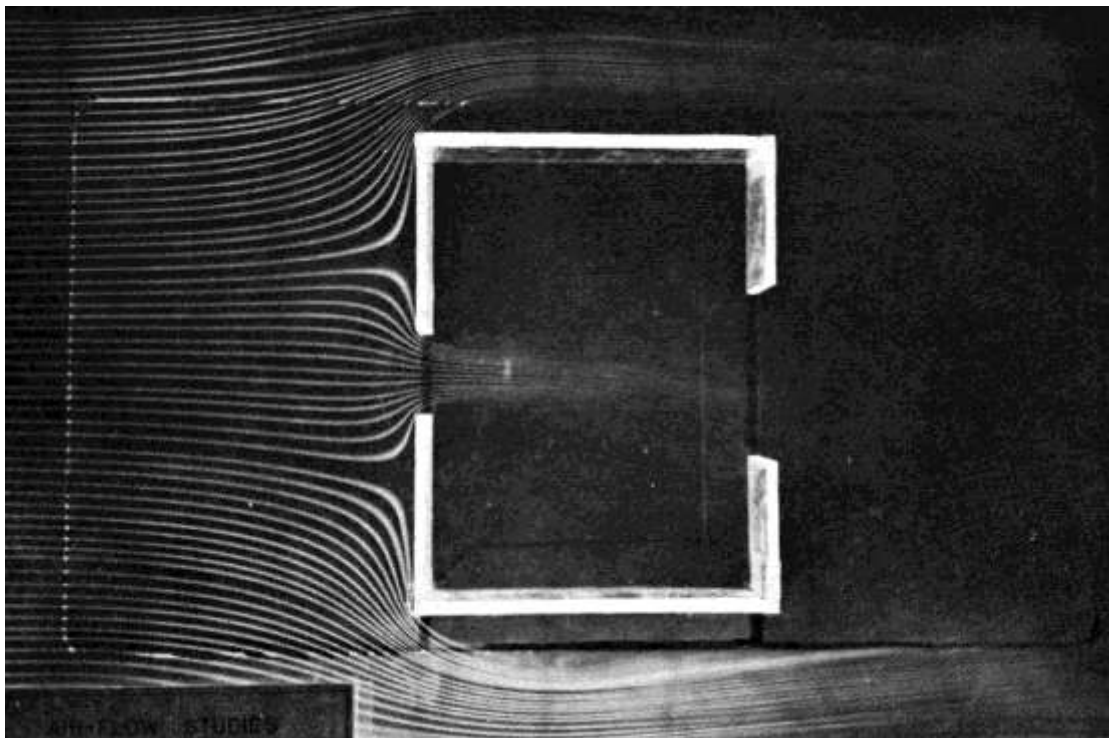


Figure 81 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur pour des ouvertures d'entrée plus petites que des ouvertures de sortie faite au Texas Engineering Experiment Station.
(V. Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, p. 105)

Indépendamment de ces travaux, l'architecte égyptien Hassan Fathy était parvenu aux mêmes conclusions sur l'intérêt de l'agrandissement des ouvertures de sortie pour l'amélioration de la ventilation naturelle en observant des murs brise-vent percés¹. Cet exemple montre que des recherches indépendantes ont néanmoins pu aboutir à des résultats convergents. Givoni a mené des expérimentations assez poussées sur le positionnement et le dimensionnement des ouvertures afin d'étudier plus précisément la distribution de la vitesse de l'air à l'intérieur des locaux pour différentes configurations en 1962². Les résultats qu'il a obtenus à partir de simulations en soufflerie ont permis d'affiner la compréhension du phénomène d'accélération de la vitesse de l'air en ventilation naturelle. Il a notamment mesuré la vitesse de l'air à différents points d'une maquette d'un local de plan carré ventilé transversalement, avec des ouvertures de différentes tailles et pour un vent de face et oblique³. Ces mesures ont été reportées sur des schémas qui représentent la vitesse de l'air intérieur en pourcentage de la vitesse extérieure moyenne et pour différents points du local (*figure 82*). Givoni donne les conclusions suivantes :

« [La] vitesse moyenne intérieure dépend essentiellement de la taille de la plus petite ouverture. Par contre, les dimensions relatives de l'entrée et de la sortie ont un effet prononcé sur la vitesse maximale qui, dans la plupart des cas augmente avec le rapport des dimensions de l'entrée sur la sortie. [...] En définitive la combinaison d'une petite entrée et d'une grosse sortie a pour résultat un flux d'air concentré limité à un étroit secteur de la pièce⁴. »

Ces résultats complexifient sensiblement, sans les contredire, ceux obtenus au Texas Engineering Experiment Station au début des années 1950, dans la mesure où la règle énoncée précédemment donne en définitive « une faible modification de vitesse moyenne globale⁵ » et a tendance à concentrer les vitesses maximales de l'air « à proximité de la fenêtre d'entrée⁶ ».

1 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Égypte : Gourni*, op. cit., p. 93-94.

2 B. Givoni, « Basic Study of Ventilation Problems in Hot Country in Housing in Hot Country », *Research Report to Ford Foundation*, Haïfa : Building Research Station, 1962, n. p. ; B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 303-318.

3 *Ibid.*, p. 306-307.

4 *Ibid.*, p. 307.

5 *Ibid.*, p. 307.

6 *Ibid.*

Les résultats de cette étude importante pour la compréhension des phénomènes de ventilation naturelle ont vraisemblablement été utilisés dans la conception en zone tropicale¹.

Givoni était particulièrement préoccupé par les problèmes d'orientation posés par les exigences de ventilation naturelle. Un autre résultat important qu'il a obtenu à la même période concerne les possibilités de ventilation des locaux bénéficiant de deux ouvertures situées sur la même façade et dans lesquelles il est impossible de produire une ventilation transversale. Selon la même procédure que celle évoquée précédemment, il a obtenu des vitesses de l'air très satisfaisantes grâce à l'emploi de balcons et de saillies verticales extérieures placées entre les deux fenêtres (*figure 83*). Il estime que « [lorsque] les deux fenêtres sont équipées de projections verticales, les vitesses intérieures s'élèvent à un niveau comparable à celui qui existe dans les pièces bien ventilées transversalement surtout avec un vent oblique sur le mur². » Ces résultats sont particulièrement importants puisqu'ils montrent « qu'il est possible d'apporter une grande amélioration dans la ventilation des bâtiments dont les pièces n'ont qu'une seule exposition à l'extérieur³ », à condition que l'angle entre le mur et la direction du vent soit « compris entre 20° et 70°⁴. » Dans la continuité directe des expérimentations menées au Texas, il a également étudié les effets de l'aménagement intérieur, et l'influence de la hauteur et des types d'ouvertures en vue de réaliser une ventilation adaptée à chacune des pièces⁵ (chambre, séjour...). En étudiant l'emploi de balcons et de saillies verticales pour la ventilation naturelle des locaux bénéficiant d'une mono-orientation, Givoni a indirectement contribué aux recherches déjà menées en architecture tropicale sur les éléments architecturaux conçus pour favoriser la ventilation et le refroidissement des structures. Certains éléments avaient été développés dans ce contexte, comme les doubles toitures ventilées ou les « toits parasols⁶ » utilisés par Ayoub pour la protection et le refroidissement des toitures en zone tropicale (*figure 84*), dont on trouve déjà des exemples dans l'architecture traditionnelle⁷.

1 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, op. cit., p. 123-124.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 310.

3 *Ibid.*, p. 310.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 312-315.

6 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 133.

7 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, [1ère éd. 1972], Paris : Dunod, (coll. Aspects de l'urbanisme), trad. de l'anglais par A. M. Meistersheim et M. Schlumberger, 1977, p. 128-129.

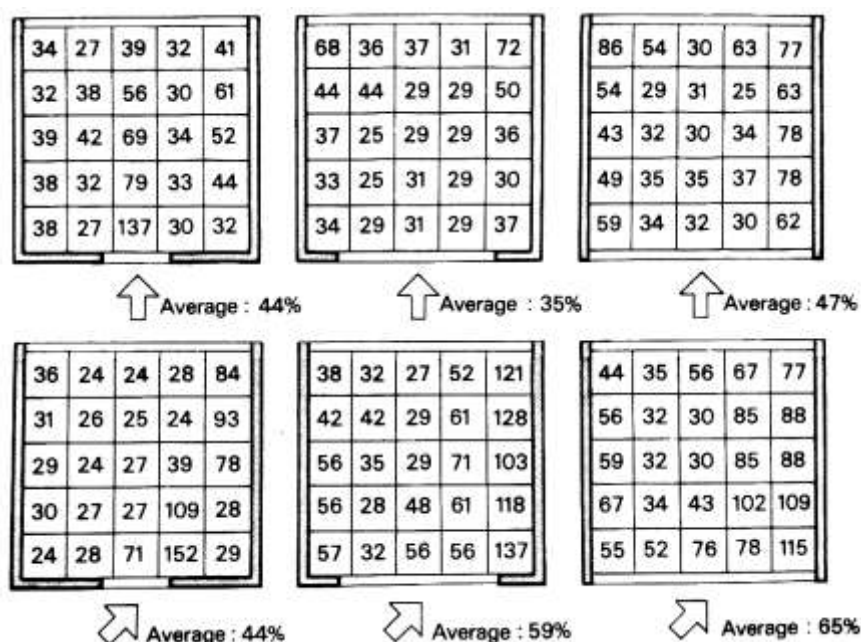


Figure 82 : Vitesses relatives de l'air à l'intérieur d'un local ventilé transversalement en fonction de son orientation par rapport au vent, d'après Givoni.

(O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, Londres : Longman, 1974, p. 123)

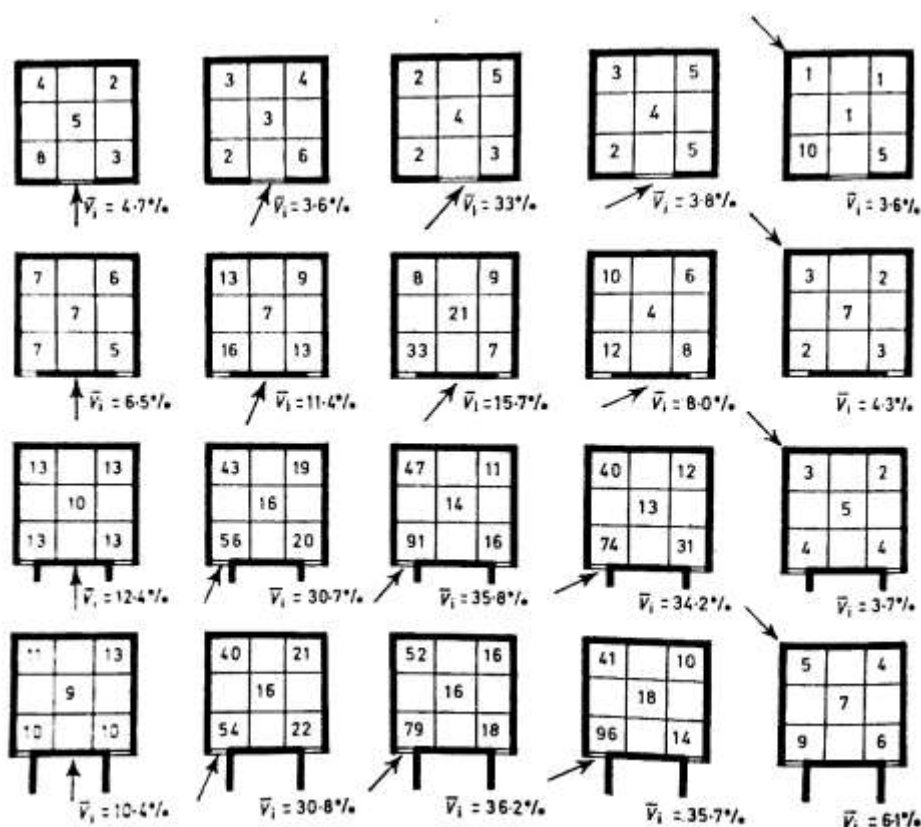


Figure 83 : Vitesses relatives de l'air à l'intérieur d'un local mono-orienté en fonction de son orientation par rapport au vent et de l'ajout de saillies verticales.

(B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, [1ère éd. en anglais 1969, 2e éd. rev. et corr. 1976], Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par J.-L. Izard, 1978, p. 310)



Figure 84 : « Toits parasols » de l'hôpital français de Suez conçu par Ayoub.
(R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *Techniques & Architecture*, 20^{ème} série, n°2, février 1960, p. 133)

Givoni a complété ses recherches en soufflerie par des mesures de l'effet de la ventilation naturelle sur l'amplitude diurne des températures de l'air et des surfaces intérieures, pour des structures dont les surfaces extérieures sont blanches ou sombres et qui ont été construites dans la zone désertique du Néguev en Israël¹. Ces résultats montrent qu'en règle générale la ventilation naturelle limite l'élévation de la température intérieure, étant donné que « l'air intérieur se renouvelle rapidement et n'a pas le temps d'atteindre la température des surfaces environnantes². » La situation est légèrement différente dans les locaux où les parois extérieures et la toiture sont sombres : la ventilation « rapproche la température des surfaces internes de celle de l'extérieur³ » mais elle a un moindre effet sur la réduction de la température intérieure. Il constate également que la ventilation en soirée et la nuit contribuent systématiquement au refroidissement de la structure⁴. Grâce à ces expérimentations et aux études en soufflerie, Givoni a apporté une contribution décisive à la compréhension des phénomènes aérauliques pour la ventilation naturelle des constructions. Ses résultats seront diffusés dès la fin des années 1960.

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 284-288.

2 *Ibid.*, p. 288.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

II.3.1.3. Le développement des connaissances sur « l'effet de cheminée »

Les problèmes de ventilation naturelle et transversale peuvent être assez simplement résolus si une orientation selon les vents favorables, un aménagement intérieur convenable et un bon dimensionnement des ouvertures sont réalisables. Mais en l'absence de brises ou de vents, ces problèmes changent de nature puisqu'ils nécessitent d'employer les effets de la convection naturelle et non plus de la convection forcée pour le rafraîchissement et le refroidissement d'une construction. Par air calme, un mouvement d'air peut être créé à l'intérieur d'une construction s'il existe une différence de température suffisamment importante entre l'entrée et la sortie d'air, selon le principe de la convection naturelle. Si ces deux ouvertures sont situées sur une façade ensoleillée et une façade ombragée approximativement à la même hauteur, il peut exister un léger mouvement d'air à l'intérieur de la construction, de la façade ombragée vers celle ensoleillée¹. Il est dû au fait que l'air réchauffé au niveau de l'ouverture sur la façade ensoleillée est légèrement en dépression, tandis que celui sur la façade ombragée est en surpression². Bien que ce phénomène soit reconnu par certains thermiciens, son action effective pour le rafraîchissement est cependant considérée comme négligeable par Ayoub³.

Le mouvement de l'air dû à la différence de température (donc de pression de l'air) entre deux points est désigné sous le terme « d'effet de cheminée », nommé « *stack effect* » ou « *thermal chimney* » en anglais. L'exploitation consciente de l'effet de cheminée pour la ventilation des constructions est assez ancienne. Le fonctionnement des tours à vent utilisées pour le rafraîchissement de l'air intérieur dans l'architecture traditionnelle de certaines régions désertiques du monde (Iran, Égypte...) repose sur ce principe en l'absence de vent, leur fonction principale étant de capter les vents dominants en hauteur pour ventiler l'intérieur des constructions par convection forcée⁴. Ces tours, dont le principe remonte vraisemblablement à l'Égypte antique et dont on trouve des exemples au XIV^e siècle de notre ère⁵, sont nommées

1 A. Missenard, R. Cadiergues, *Le Chauffage, la ventilation, le conditionnement d'air*, op. cit., p. 29.

2 Ibid.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 134-135.

4 H. Fathy, *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, Chicago/Londres : University of Chicago Press, 1986, p. 57.

5 Ibid., 59-60.

Malqaf ou *Badgir* en Iran et dans les pays du Golfe¹. Ces systèmes étaient parfois associés à une citerne d'eau, un bassin ou une fontaine, afin de rafraîchir l'air par évaporation². Ils sont mentionnés par de nombreux auteurs comme un exemple d'utilisation précoce de l'effet de cheminée pour le rafraîchissement et la ventilation dans les pays chauds et arides³.

Bien que souvent évoquées⁴, les tours à vent n'ont vraisemblablement pas été utilisées dans la période que nous considérons à quelques exceptions près⁵, mais elles ont connu par la suite de nombreuses applications en Grande-Bretagne⁶. Dans les climats tempérés, la volonté de maximiser l'effet de cheminée en vue de la ventilation des locaux, parfois naturellement à l'œuvre dans les immeubles de grande hauteur, s'est manifestée dès le XVIII^e siècle en France. Le physicien Léopold de Genneté préconise par exemple en 1767 de purifier l'air intérieur des hôpitaux grâce à des conduits dont la ventilation est entretenue par des foyers situés au dernier étage qui permettent d'extraire l'air vicié⁷. L'utilisation de l'effet de cheminée sera surtout développée au XIX^e siècle sous l'impulsion d'Arthur Morin et d'Eugène Péclet⁸. Cette période correspond aussi au développement des « cheminées ventilatrices ⁹ » ou « cheminées solaires¹⁰ » qui ont été expérimentées pendant plus d'un demi-siècle en France, en Angleterre mais aussi en Guadeloupe¹¹. Elles remplacent les cheminées à bois et sont conçues pour maximiser la convection naturelle durant les périodes les plus ensoleillées. Les cheminées solaires prennent la forme d'une surface noircie située à l'intérieur d'un long conduit vitré traversant le faîtage¹² : l'air échauffé sous l'action du rayonnement solaire s'élève le long du conduit pour être extrait en partie supérieure et crée un appel d'air en partie inférieure.

1 *Ibid.*, p. 60.

2 M. H. Bahadori, « Natural Cooling in Hot Arid Regions », p. 199-222 in : M. M. A. Sayigh, (éd.) *Solar Energy Application in Buildings*, New York : Academic Press, 1979.

3 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 103.

4 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, *op. cit.*, p. 196.

5 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 135-136.

6 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelle*, *op. cit.*, p. 39-42.

7 L. de Genneté, *Purification de l'air croupissant dans les hôpitaux, les prisons, et les vaisseaux de mer*, Nancy : Hyacinthe Leclerc, 1767, p. 39-42 ; P. Rahm, *Histoire naturelle de l'architecture. Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments*, Paris : Pavillon de l'Arsenal, 2020, p. 133-136.

8 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*, p. 78-85.

9 *Ibid.*, p. 85.

10 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelle*, *op. cit.*, p. 105.

11 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*, p. 243.

12 *Ibid.*, p. 85.

Malgré le fait qu'il ait été rapidement remplacé par les systèmes de ventilation mécanique au XIX^e siècle¹, le principe de la cheminée solaire a été repris par exemple pour la ventilation du mur Trombe-Michel ou des capteurs à air à faible inertie, et a été étudié avec le développement des techniques solaires passives. Les cheminées solaires ont connu quelques applications aux États-Unis², afin d'assurer le tirage thermique dans des constructions utilisant des gaines enterrées pour le renouvellement d'air et le rafraîchissement, sur le principe du puits canadien ou provençal³ (*figure 85*). En 1978, l'architecte David Wright affirme qu'un « avantage de la cheminée solaire est son pouvoir d'auto-régulation⁴ », dans la mesure où le tirage thermique est « d'autant plus fort que la cheminée ou la journée sera plus chaude⁵. » Il a employé ce système dans la maison *Sundown* construite en 1976 à Sea Ranch (39° nord), en Californie⁶. La surface de la serre légèrement inclinée à 70° et orientée au sud bénéficie d'une occultation intérieure complète, placée suffisamment derrière le vitrage pour permettre à l'air échauffé de circuler lorsqu'elle est occultée comme dans une cheminée solaire⁷ (*figure 86*). Un système de trappes et de clapets manipulables placés en haut et en bas des vitrages permet d'assurer une ventilation par convection naturelle de l'air. La construction est également équipée d'un lanterneau en partie haute afin d'éliminer l'air chaud accumulé sous la toiture⁸.

Dans son principe, l'effet de cheminée est présenté indépendamment par Dreyfus, Olgyay, Givoni et par d'autres architectes par la suite comme un phénomène particulièrement intéressant en vue d'assurer la ventilation naturelle des constructions par air calme. Dreyfus propose une équation pour calculer la différence de pression qui constitue « l'élément moteur⁹ » de l'effet de cheminée entre deux ouvertures, ainsi qu'une formule pour évaluer le débit de l'air ventilé par ce phénomène, qui est fonction de la surface des orifices d'entrée et de sortie, de la différence de température et de la dénivellation entre les deux orifices¹⁰. Cette dernière formule est toujours utilisée par certains professionnels aujourd'hui¹¹, et elle est reprise dans les

1 *Ibid.*

2 D. Wright, « Natural Solar Cooling », p. 516-517 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 Ce système existait déjà au XVI^e siècle. Voir : P. Rahm, *Histoire naturelle de l'architecture*, op. cit. p. 126.

4 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 198.

5 *Ibid.*

6 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 64.

7 *Ibid.*, p. 65.

8 *Ibid.*

9 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 155.

10 *Ibid.*, p. 170-171.

11 Entretien avec David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan.

ouvrages contemporains sur ces sujets¹. Une formule très analogue est donnée par Olgyay et provient des recherches du Building Research Station². Pour Givoni, cette formule montre que « la force thermique de la ventilation dépend du produit de la différence de température extérieur-intérieur et de la dénivelée de la ventilation (c'est-à-dire de la distance verticale séparant les ouvertures³) » et que cette force « ne revêt une importance pratique que lorsque l'un des deux facteurs présente une grandeur suffisante⁴. » La formule de l'effet de cheminée permet de déduire *a priori* les caractéristiques principales que devrait nécessairement avoir un système de rafraîchissement fonctionnant par effet de cheminée. La diffusion de cette formule à partir de Dreyfus et Olgyay est manifestement à l'origine d'une amélioration dans la compréhension de ce phénomène et de son exploitation.

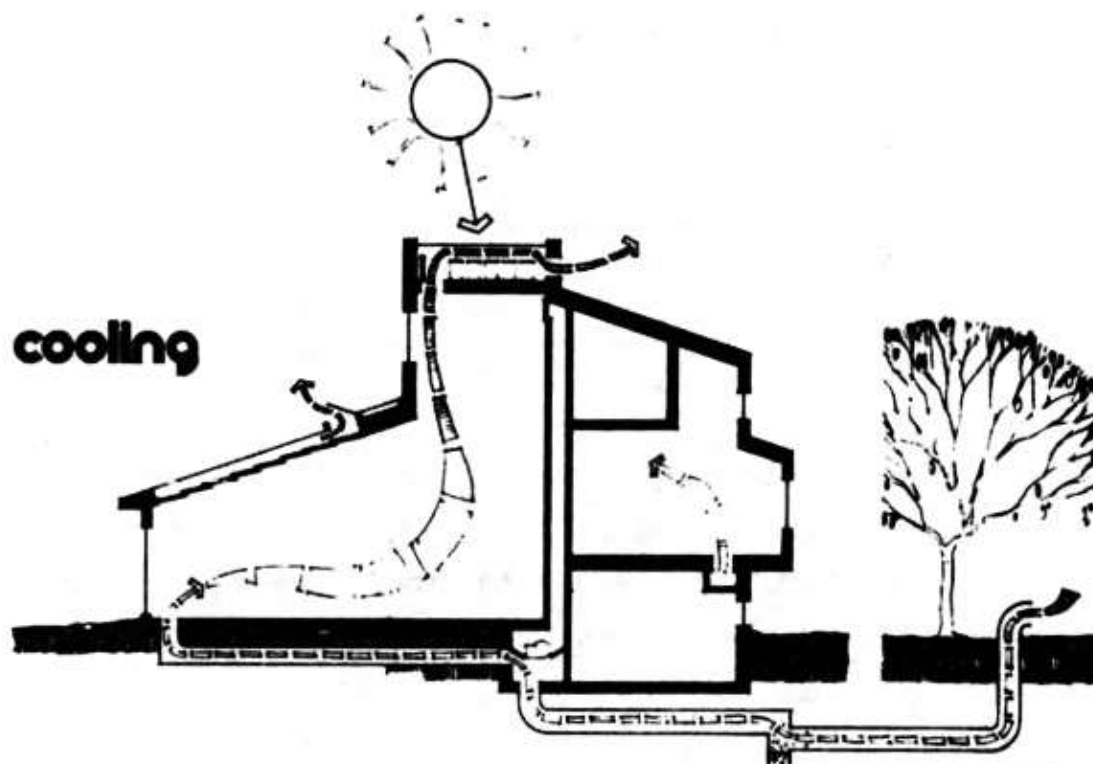


Figure 85 : Coupe schématique de la cheminée solaire intégrée dans la maison de J. Davis à Hutchinson (Kansas).

(D. Wright, « Natural Solar Cooling », p. 517 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off: Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference: January 11-13, 1979, San Jose, California*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1979)

-
- 1 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelle*, op. cit., p. 93.
 - 2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 110-112.
 - 3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 300.
 - 4 *Ibid.*

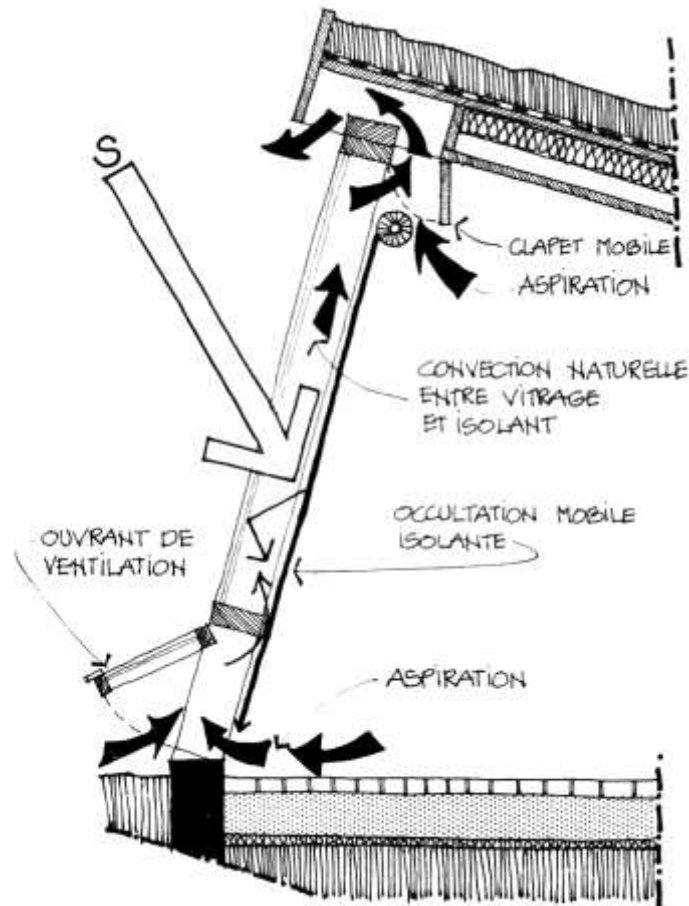


Figure 86 : Coupe du principe d'occultation formant une cheminée solaire utilisée pour la ventilation estivale de la maison Sundown conçue par D. Wright.
(P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 65)

Étant donné la grande hauteur des serres employées dans les constructions bioclimatiques et solaires passives, comme la maison de Balcomb, la ventilation par effet de cheminée a très souvent été utilisée afin de limiter l'échauffement en journée, mais aussi de refroidir la structure en soirée en période de surchauffe, par un système de clapets, de trappes ou de « lanterneaux ouvrants¹ ». Certaines serres ont été équipées d'extracteurs d'air statiques en partie supérieure afin d'être ventilées par effet de cheminée : c'est le cas de la serre conçue par Gerber et Philippe Pous pour leur atelier construit en 1984 à Treilles, qui est la rénovation d'une ancienne métairie². Elle est équipée de deux imposants extracteurs statiques, manipulables par des clapets manuels et a été conçue suivant « le principe des cheminées

1 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 193.

2 M. Gerber, P. Pous, « Un atelier face au sud », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », n° 354, juin-juillet 1984, p. 76.

solaires¹ », selon l'expression des architectes (*figures 87 et 88*). Cette utilisation de l'effet de cheminée pour la ventilation des serres reposait sur des bases essentiellement empiriques mais respectait les caractéristiques déduites de la formule.



Figures 87 et 88 : *Serre et extracteurs statiques de l'atelier conçu par M. Gerber et P. Pous et principe de ventilation par effet de cheminée.*

(M. Gerber, P. Pous, « Un atelier face au sud », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », n° 354, juin-juillet 1984, p. 77)

D'autres utilisations de l'effet de cheminée ont été mises en œuvre et testées à la même période. Dreyfus recommande par exemple pour une construction sur plusieurs étages d'utiliser « la cage d'escalier pour ventiler le niveau inférieur² ». Dans les climats tempérés, ce principe se retrouve dans de nombreuses constructions bioclimatiques ou solaires passives construites sur plusieurs étages en mezzanine ou avec une large trémie, afin que l'air chaud puisse circuler sur toute la hauteur de la construction, pour le transport de l'air chaud mais aussi pour la ventilation naturelle³. L'effet de cheminée a également été utilisé dans les doubles parois ventilées ou murs ventilés, conçus pour limiter l'échauffement des murs en maçonnerie et vraisemblablement déjà utilisés par Vitruve et Palladio⁴. Aussi nommés « murs-masques⁵ », on

1 *Ibid.*

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 171.

3 Entretien avec Georges Wursteisen, le 15/10/2019 à Cabestany.

4 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*, p. 183, 74.

5 A. Ravéreau, *Du local à l'universel*, Paris : Éditions du Linteau, 2007, p. 58-59.

en trouve de nombreux exemples au XX^e siècle dans les constructions des zones tropicales sèches et les climats chauds et arides. Dreyfus considère néanmoins que les performances de ce type de système sont limitées par le faible débit d'air qu'il génère et qui ne peut être augmenté qu'en élargissant considérablement le vide entre les deux parois¹.

Malgré tous ces systèmes, l'utilisation de la ventilation naturelle en vue du rafraîchissement et du refroidissement est limitée par la disponibilité des vents dominants dans le cas du recours à la convection forcée, et par l'ensoleillement direct nécessaire à la production d'une ventilation par effet de cheminée, dans le cas d'un air calme. Bien que ces techniques aient pu être utilisées dans des climats très différents, elles restent dépendantes de certains facteurs climatiques favorables. Ainsi, l'utilisation de la ventilation naturelle pour le refroidissement nocturne nécessite une différence de température importante entre l'air intérieur et l'air extérieur, puisque son efficacité est directement fonction de cette différence². Si l'utilisation de la ventilation naturelle est en pratique omniprésente dans la mesure où toutes les constructions solaires passives et bioclimatiques l'utilisent, il apparaît que ses performances pour le rafraîchissement restent contraintes et permettent généralement de limiter l'échauffement d'une construction, sans pour autant abaisser systématiquement la température intérieure en dessous de la température extérieure, ce qui peut être préjudiciable pour le confort intérieur lors des périodes de surchauffe. Ces limites expliquent en partie la recherche d'une amélioration des performances de rafraîchissement et de refroidissement dans certaines zones climatiques, par l'utilisation du rayonnement infrarouge et de l'évaporation.

II.3.2. L'utilisation du rayonnement de grande longueur d'onde et de l'évaporation de l'eau

II.3.2.1. Comprendre et exploiter le rayonnement dans l'infrarouge lointain pour le rafraîchissement

L'utilisation de ces deux phénomènes physiques pour produire un rafraîchissement ou un refroidissement correspond à deux lignées techniques bien distinctes, mais qui ont comme caractéristique commune de fonctionner dans des climats analogues, caractérisés par une faible humidité relative de l'air pendant les périodes où le rafraîchissement est nécessaire (climats

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 256.

2 *Ibid.*, p. 151.

secs et arides, climat méditerranéen...). Ces techniques sont inefficaces dans les zones tropicales humides, ou durant les périodes chaudes et humides de certaines latitudes tempérées, ce qui les distingue des précédentes¹. Cependant, leurs performances sont considérées comme bien supérieures dans les climats dits « à ciel clair² » puisqu'elles permettent potentiellement d'abaisser la température des surfaces et d'une mince couche d'air en dessous de la température extérieure de l'air ambiant durant les périodes nocturnes. Par rapport aux techniques et aux dispositifs évoqués précédemment, la majorité des dispositifs de refroidissement par rayonnement de grande longueur d'onde et d'évaporation sont situés en toiture, puisqu'il s'agit de « la surface la mieux exposée au ciel, et là où la tension de vapeur d'eau est faible et le ciel clair³ » comme l'explique Givoni. Il existe donc des raisons climatiques qui expliquent le positionnement de ce type de système en toiture.

Les premières utilisations du rayonnement infrarouge lointain pour le refroidissement des constructions ne peuvent pas être situées historiquement avec précision, dans la mesure où ce processus est naturellement à l'œuvre lors des nuits claires dans de très nombreuses régions du monde, durant toutes les périodes où l'humidité de l'air ambiant est faible. On trouve dans certaines zones désertiques (Iran, Irak...) des « murs à glace⁴ », conçus pour faire geler une fine pellicule d'eau la nuit en l'isolant du sol et du rayonnement alentour pour abaisser sa température en dessous de la température de l'air (*figure 89*). Cette technique est mentionnée par de nombreux acteurs, qu'ils soient architectes ou ingénieurs⁵. Ayoub affirme que dans certains climats chauds et secs on peut ainsi « fabriquer de la glace par une simple exposition à la voûte céleste, la nuit, d'un récipient thermiquement isolé du sol⁶. » Selon lui, ce phénomène montre que « le rayonnement nocturne à sens unique en l'absence de tout rayonnement solaire est à cet égard l'un des plus puissants facteurs de refroidissement des locaux en été dans les climats chauds et secs, dont l'atmosphère, généralement limpide, permet un rayonnement

1 Dans les régions où l'humidité de l'air est trop importante, le recours aux climatiseurs à compresseur est la seule solution possible, voir : B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 326 et R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 50.

2 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 110-122 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 400.

4 M. H. Bahadori, « Natural Cooling in Hot Arid Regions », p. 222-225 in : M. M. A. Sayigh, (éd.) *Solar Energy Application in Buildings*, op. cit.

5 Voir par exemple : D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 216.

6 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 112.

intense de la surface de la Terre vers la voûte céleste¹. » Harold Hay, à l'origine des recherches les plus diffusées sur les systèmes de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde, présente en 1976 ses recherches dans la continuité de cet ancien procédé :

« Des milliers d'années avant Jésus-Christ, l'homme faisait de la glace quand la température était au-dessus de zéro et le faisait naturellement. Cela a été accompli en Iran avec des murs à glace qui étaient en fait fabriqués en terre. [...] Bien que la température ambiante au sommet du mur soit de 50 °F [≈ 10 °C], l'eau va geler jusqu'à glacer au niveau du sol². »

Par rapport à ces techniques anciennes, les ingénieurs, architectes et inventeurs des techniques passives de rafraîchissement ont notamment pu bénéficier des progrès dans la compréhension des échanges thermiques des surfaces, et sur le développement des connaissances en climatologie et en microclimatologie. Ces recherches doivent beaucoup à celles menées au XIX^e siècle par le physicien Anders J. Ångström (1814-1874), qui a étudié le rayonnement infrarouge de l'atmosphère dans de nombreuses régions désertiques et est à l'origine de la spectroscopie³. Au XX^e siècle, les résultats présentés par Geiger sur le rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste avaient permis à Aronin d'en déduire des conclusions sur le refroidissement en fonction de la forme des toitures⁴, et à Olgyay de souligner l'intérêt d'un calcul du potentiel de rafraîchissement par ce phénomène⁵. Malgré ces travaux et l'importance donnée au rayonnement infrarouge par les microclimatologues, Dreyfus affirme en 1960 qu'il existe très peu de données concernant la température radiante moyenne du ciel et que ce manque constitue « une des lacunes les plus importantes dans les connaissances actuelles des données climatiques intéressant l'habitat⁶. »

1 *Ibid.*, p. 112.

2 H. R. Hay, « Atascadero Residence », p. 105 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « Thousands of years before Christ, man made ice when the temperature was above freezing and did it naturally. This was accomplished in Iran with ice walls which were actually made of earth. [...] Though the ambient temperature at the top of the wall is 50°F, water will freeze to ice at ground level. »

3 J. I. Yellott, « Historical and International Perspective for Passive Solar Heating and Cooling », p. 509 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 138.

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 34.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 136.

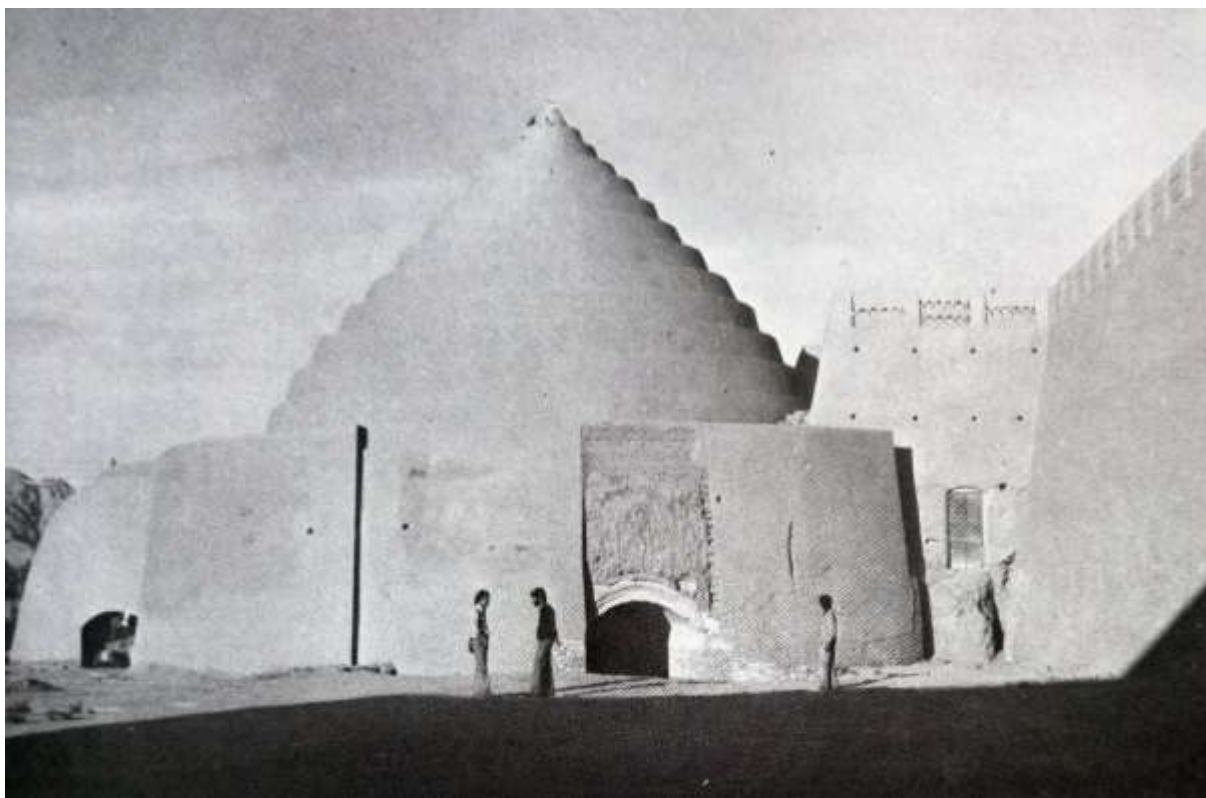


Figure 89 : Murs à glace et fosse de stockage de la glace à Kerman (Iran).
(M. H. Bahadori, « Natural Cooling in Hot Arid Regions », p. 223 in : M. M. A. Sayigh, (éd.) *Solar Energy Application in Buildings*, New York : Academic Press, 1979)

Dans le but de mieux comprendre les possibilités de rafraîchissement par rayonnement dans l'infrarouge lointain, Yellott et Hay se sont appuyés sur les résultats du physicien Raymond Bliss Jr. sur les rapports entre l'humidité de l'air et l'émissivité de l'atmosphère¹. Dans la continuité des travaux du physicien Hoyt C. Hottel², Bliss a proposé en 1961 une méthode de calcul simplifiée adressée aux ingénieurs, afin d'évaluer l'intensité du rayonnement infrarouge de l'atmosphère reçu par une surface près du sol³. Ce phénomène, qui dépend essentiellement de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air à cet ordre de grandeur⁴, est à l'origine du refroidissement plus ou moins intense des surfaces en fonction de la nébulosité. Il est d'une importance cruciale pour l'étude des techniques de rafraîchissement par rayonnement de grande

-
- 1 R. W. Bliss Jr. « Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers », *Solar Energy*, vol. 5, n°3, juillet-septembre 1961, p. 103-120.
 - 2 Hottel est une figure importante à l'origine des principales recherches sur les techniques solaires actives au M.I.T. Voir : D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 70-75.
 - 3 R. W. Bliss Jr. « Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers », op. cit., p. 104.
 - 4 *Ibid.*

longueur d'onde. Bliss a mis en évidence le fait que l'émissivité apparente de l'atmosphère était fonction de la température de rosée¹, et il affirme que l'effet « des nuages est toujours d'augmenter le rayonnement atmosphérique par rapport aux conditions de ciel clair² », confirmant par la même les intuitions de Trombe et d'autres ingénieurs sur le potentiel de rafraîchissement dans les pays dits « à ciel clair ». Des résultats du même ordre ont été obtenus par Givoni par la suite à partir de nombreux relevés météorologiques, qui ont mis en évidence la relation entre l'humidité de l'air, exprimée sous la forme de la moyenne mensuelle de pression partielle de vapeur, et l'amplitude diurne des températures : plus celle-ci est élevée et moins l'amplitude diurne des températures est importante³.

Ces recherches sur le rafraîchissement par rayonnement dans l'infrarouge lointain ont également bénéficié du progrès dans l'explication de ces phénomènes physiques et particulièrement de l'émissivité des surfaces. La volonté de maximiser le rayonnement de grande longueur d'onde nécessite le recours aux « corps sélectifs froids⁴ », selon l'expression de Trombe, aussi nommés « matériaux sélectifs froids⁵ » par Yellott en 1966⁶. La caractéristique principale de ces matériaux est que leur facteur d'émission dans l'infrarouge lointain s'approche de l'unité. Le lait de chaux appartient à cette catégorie. Comme Yellott, et de nombreux scientifiques préoccupés par les applications de l'énergie solaire, Trombe a mené des recherches sur les surfaces sélectives entre les années 1950 et 1960, notamment sur l'émissivité de différents matériaux métalliques en vue du rafraîchissement des habitations⁷. Elles étaient liées à celles menées à Mont-Louis puis à Odeillo-Font-Romeu sur les systèmes de refroidissement de l'air et des structures⁸ (*figure 90*). Trombe et ses collègues estiment qu'avec des surfaces

1 *Ibid.*, p. 117.

2 *Ibid.*, p. 118. Traduction personnelle, citation originale : « The effect of clouds is always to increase atmospheric radiation relative to clear sky conditions. »

3 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 327.

4 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 118-119 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, *op. cit.* (Archives Nations Unies – en ligne)

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 61.

6 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *op. cit.*

7 F. Trombe, M. Foëx, M. Lê Phat Vinh, « Recherches sur les surfaces sélectives utilisables pour la climatisation des habitations », p. 625-637 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 4, Solar Energy : I, *op. cit.* (Archives Nations Unies – en ligne)

8 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Sur la climatisation naturelle des maisons. B) Exploitation du rayonnement terrestre pour la climatisation des habitations », p. 669-680 in : Centre National de la Recherche Scientifique (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*, *op. cit.* (Archives du L.A.B. – Toulouse)

sélectives froides « convenablement isolées du sol ¹ », il est possible d'obtenir « des refroidissements considérables tels que ceux que l'on pourrait observer en l'absence d'atmosphère². » L'utilisation de ce type de surface a été reprise par les ingénieurs et les architectes. À propos de la peinture blanche minérale, qui est un matériau sélectif froid, Ayoub écrit en 1960 :

« Par son émissivité généralement forte au rayonnement thermique vers la voûte céleste, elle libère au maximum vers l'extérieur la chaleur accumulée le jour, et permet même à la paroi qu'elle recouvre, dans les climats arides, à ciel limpide, de connaître des températures nettement inférieures à la température nocturne, et de repartir le jour suivant avec une réserve de "froid" appréciable³. »

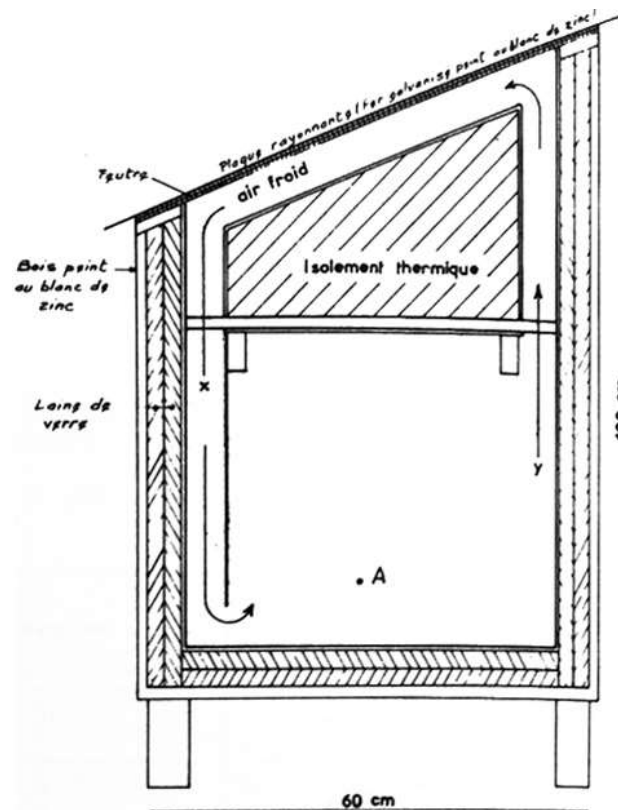


Figure 90 : Prototype conçu par F. Trombe de maison refroidie par une surface sélective froide formée d'une peinture à l'oxyde de zinc.

(F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Sur la climatisation naturelle des maisons. B) Exploitation du rayonnement terrestre pour la climatisation des habitations », p. 678 in : Centre National de la Recherche Scientifique (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, Montlouis, 23-28 juin 1958*, [1ère éd. 1961], Paris : Centre National de la Recherche Scientifique, 1976)

1 *Ibid.*, p. 669.

2 *Ibid.*

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 118.

L'idée d'exploiter ce « rafraîchissement radiatif¹ », selon l'expression de Givoni, pour refroidir les toitures et pour conserver la fraîcheur ainsi obtenue s'est développée suivant plusieurs axes de recherche. Un ensemble de travaux ont insisté sur l'intérêt des constructions bénéficiant d'un patio ou d'une cour intérieure. Dans le cas d'un logement à patio situé dans une zone désertique, Givoni propose en 1969 d'utiliser des toitures inclinées vers le patio, afin que l'air refroidi par conduction au contact du toit (lui-même refroidi par rayonnement de grande longueur d'onde) s'écoule jusqu'aux pièces pour les rafraîchir. Il écrit :

« Alors que la température d'un toit blanchi suit de près celle de l'air extérieur pendant la journée, le rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel la réduit la nuit de 6 à 10 °C en dessous de la valeur ambiante. L'air en contact avec le toit se refroidit alors pendant la nuit et glisse le long de la pente vers la cour intérieure et pénètre dans les pièces². »

Il estime qu'avec « ce type de conception, il est possible de réunir les conditions de confort dans les régions arides avec des températures maximales d'été allant jusqu'à 38 °C³. » Givoni propose d'améliorer ce système pour limiter l'échauffement de l'air par convection en recouvrant la toiture d'un film en polyéthylène, transparent au rayonnement infrarouge, selon un dispositif très analogue à celui imaginé par Trombe pour le refroidissement dans les climats à ciel clair⁴. Le patio et la cour intérieure sont aussi présentés par l'architecte Koenigsberger comme des systèmes de rafraîchissement et comme « d'excellents régulateurs thermiques⁵ ». L'intérêt principal de ce système est que l'air refroidi a tendance à stagner au fond du patio ou de la cour intérieure, qui peut être à l'abri du rayonnement solaire direct une partie de l'année, et peut être équipée d'un bassin ou d'une fontaine pour améliorer le rafraîchissement⁶.

Givoni va également collaborer à la conception de bâtiments spécifiquement pensés pour le rafraîchissement : c'est le cas d'une habitation autonome construite au nord du Texas (33° nord) en 1980 et conçue avec le Center for Maximum Potential Building Systems situé à

1 B. Givoni, « Options and Applications of Passive Cooling Systems », p. 115 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat, op. cit.*, p. 357.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design, op. cit.*, p. 205.

6 *Ibid.*

Austin¹. L'utilisation d'un système de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde dans cette zone au climat considéré comme humide s'appuyait sur les résultats d'une étude, qui affirmait qu'une « ressource pour le rafraîchissement existait dans l'environnement chaud et humide du centre nord du Texas, contrairement aux prédictions de la littérature² ». Le choix de cette technique était donc justifié par ces travaux approfondis sur le climat local de cette zone du Texas. Cette construction est dotée d'une toiture inclinée vers le nord et recouverte par plus de 100 m² de tôle métallique peinte en blanc, qui forme une surface très émissive dans l'infrarouge lointain³ (*figure 91*). Le choix de cette inclinaison de la toiture a été motivé par la volonté de minimiser son exposition au rayonnement solaire en journée pour toutes les saisons, et par des observations en climatologie qui ont estimé que cette orientation correspondait la nuit à « la région la plus froide de la voûte céleste⁴. » Dans ce système hybride, l'air circule du faîtage vers la façade nord dans des gaines placées sous la toiture afin d'être refroidi à son contact pour rafraîchir l'air intérieur, mais également pour refroidir un important volume d'eau qui fait office de stockage de fraîcheur⁵. Bien que ses performances n'aient à notre connaissance pas été communiquées, cette construction constitue un exemple assez élaboré de l'utilisation de surfaces très émissives pour le rafraîchissement.

Malgré l'intérêt des dispositifs issus des recherches de Givoni utilisant de grandes surfaces très émissives dans l'infrarouge lointain, le développement des techniques de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde a véritablement abouti avec les recherches sur la technique des toitures-bassins (« *rooftop ponds*⁶ » en anglais) mise au point par Harold Hay avec l'aide de John Yellott au milieu des années 1960 que nous détaillerons dans le chapitre suivant. Ce système se compose de grands bacs sombres placés sur la toiture des constructions, remplis d'eau, et recouverts de plusieurs films plastiques transparents au rayonnement infrarouge⁷. Il a initialement été nommé « *Thermopond* » (« Thermobassin » en français) par Hay, qui l'a ensuite amélioré à l'aide d'un système d'isolation mobile qui permet

1 J. W. Hand, Night Sky Systems, « Integration of Sky Vault Cooling in a 115m² North Texas Residence », p. 722 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille).

2 *Ibid.*, p. 722. Traduction personnelle, citation originale : « a cooling resource existed in the hot/humid environment of north central Texas, contrary to the predictions in the literature »

3 *Ibid.*, p. 724.

4 *Ibid.*, p. 725. Traduction personnelle, citation originale : « the coolest region of the sky vault »

5 *Ibid.*

6 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 54-62 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

7 *Ibid.*, p. 54.

aux bacs d'être alternativement exposés au soleil en journée et isolés la nuit afin d'assurer le chauffage, et à l'inverse d'être exposés la nuit et isolés en journée, afin de limiter leur échauffement et d'assurer le refroidissement de la construction par rayonnement de grande longueur d'onde¹. L'ensemble formé par la toiture-bassin et l'isolation mobile est désigné sous le nom de système *Skytherm*, que nous présenterons en détail dans le chapitre suivant, dans la mesure où il peut être considéré comme un véritable système de climatisation naturelle et pas seulement de rafraîchissement².

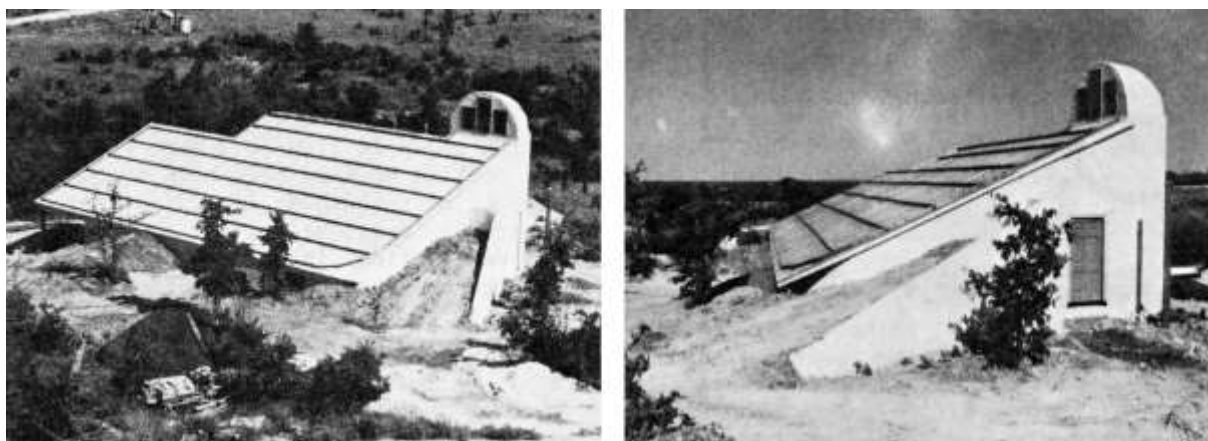


Figure 91 : Construction refroidie par rayonnement de grande longueur d'onde située au Texas et conçue par le Center for Maximum Potential Building Systems d'après les recherches de Givoni.

(J. W. Hand, Night Sky Systems, « Integration of Sky Vault Cooling in a 115m² North Texas Residence », p. 724 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980 : Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, October 19-26, 1980, Amherst, Massachusetts*, 2 vol., Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1981)

II.3.2.2. Les recherches sur le rafraîchissement par l'évaporation de l'eau

Indépendamment de l'utilisation du rayonnement de grande longueur d'onde, un autre ensemble de techniques de rafraîchissement développées parallèlement fait intervenir l'évaporation de l'eau, afin de refroidir l'air intérieur ou la structure construite elle-même. Selon Holtz, Place et Kammerud, « [dans] les environnements secs, le refroidissement par évaporation a le potentiel, comme le refroidissement radiatif vers le ciel, de réduire la température du système en dessous de la température de l'air ambiant³. » L'évaporation peut agir directement

1 *Ibid.*, p. 55.

2 H. R. Hay, « Atascadero Residence », p. 103 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 M. J. Holtz, W. Place, R. C. Kammerud, « A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems », p. 286 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes*

en refroidissant l'air intérieur de la construction, ou indirectement en refroidissant un élément comme la toiture, afin d'induire un rafraîchissement effectif¹. On trouve des systèmes de rafraîchissement directs par évaporation dans l'architecture traditionnelle et vernaculaire des zones tropicales sèches et dans les climats désertiques. Nommés « climatiseurs sahariens² », ils prennent la forme d'une jarre poreuse remplie d'eau, d'un linge ou de charbons humides, placés dans un conduit où l'air circule par convection naturelle ou forcée (*figure 92*). Au contact de ces éléments humides, l'air chaud et sec évapore une partie de l'eau, ce qui abaisse sa température, selon le principe d'un « climatiseur adiabatique³ », et augmente son humidité relative à la manière d'un humidificateur. Les fontaines et les points d'eau conçus pour le rafraîchissement en milieu urbain ou dans les cours intérieures emploient le même phénomène⁴. Des systèmes fonctionnant sur le principe des climatiseurs adiabatiques ont été utilisés au XIX^e siècle en France pour le rafraîchissement des grands magasins⁵, avant le développement des systèmes de conditionnement d'air à compresseur. Ils connaissent récemment un regain d'intérêt⁶.

L'idée d'employer des climatiseurs sahariens ou adiabatiques dans les constructions situées dans les climats tempérés apparaît dans quelques documents relatifs à la conception à partir du climat. Dans un numéro du *House Beautiful Climate Control Project* d'avril 1951, Fitch propose d'utiliser ce type de système fonctionnant à partir d'un ventilateur et d'eau pulvérisée dans le comble des constructions⁷. Il affirme que si ce système fonctionne à proximité du fleuve Congo, alors il doit aussi fonctionner à l'est des États-Unis⁸, faisant ainsi abstraction des conditions hygrométriques très différentes entre ces deux localités. Malgré ces propositions, et l'intérêt théorique de nombreux acteurs pour ce type de système, son emploi

Off, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille). Traduction personnelle, citation originale : « In dry environments, evaporative cooling has the potential, like radiative sky cooling, to reduce the system temperature below the ambient air temperature. »

1 P. La Roche, *Passive cooling systems in times of climate change* », p. 98 in : M. McDonald, C. Dayer (éds.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, *op. cit.*

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 303. Le même principe se retrouve au Bengale où l'on suspend des feuillages humides aux fenêtres. Voir : F. Laurent, *Le Froid*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1972, p. 75.

3 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 303-304.

4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 37.

5 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*, p. 81.

6 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

7 J. M. Fitch, « Climate Control on the Potomac », *House Beautiful*, « Climate Control », vol. 93, n° 4, avril 1951, p. 130-131. Voir : D. A. Barber, *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, *op. cit.*, p. 187-188.

8 *Ibid.*

dans les constructions solaires passives et bioclimatiques dans la période considérée est rarement mentionné. Outre le fait que les problématiques de rafraîchissement ne concernent qu'une partie des climats tempérés, cette sous-utilisation est sans doute liée aux défauts de ce système. Son fonctionnement est d'abord limité aux climats où l'air est très sec. L'air refroidi et humide produit par ce système peut être une importante source d'inconfort, qui est signalée par plusieurs auteurs¹. Enfin, il occasionne une importante consommation d'eau, qui peut atteindre 12 litres par heure². Il a cependant connu quelques applications dans les zones tropicales sèches³.

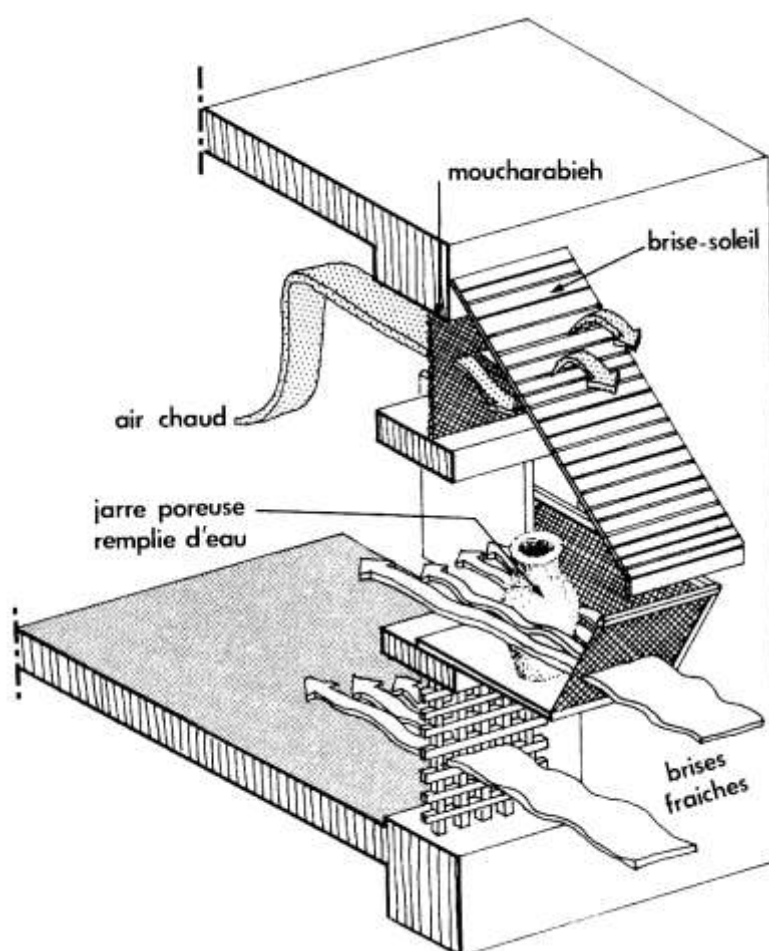


Figure 92 : Principe du climatiseur saharien intégré à un moucharabieh.
(J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 103)

-
- 1 B. Givoni, « Options and Applications of Passive Cooling Systems », p. 116-117 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 309.
 - 3 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Egypte : Gourni*, op. cit., p. 95-97.

L'utilisation indirecte de l'évaporation de l'eau pour le refroidissement des toitures a vraisemblablement été plus répandue, bien qu'elle ne semble pas attestée dans l'architecture traditionnelle¹. La pratique qui consiste à asperger d'eau les galeries marchandes vitrées dans le but de les rafraîchir est attestée au XIX^e siècle dans les climats tempérés, bien qu'elle soit totalement inefficace². À la même période, on trouve aux États-Unis des constructions dont la toiture est conçue pour être remplie d'eau afin d'en favoriser le refroidissement par évaporation³. Cette technique a été reprise au milieu des années 1930 par George Fred Keck et intégrée dans différentes constructions⁴. La pratique qui consiste à remplir les toitures plates d'eau en été est également attestée dans le sud de la France au milieu du XX^e siècle⁵. Dans d'autres climats, des systèmes nommés « piège à pluie⁶ » ont aussi été imaginés à la même période pour conserver les précipitations sur la toiture afin d'en assurer le refroidissement. Toutes ces techniques fonctionnent par évaporation et peuvent être regroupées dans la même lignée.

Mais l'utilisation de l'évaporation de l'eau pour le rafraîchissement a vraisemblablement été popularisée par l'architecte italo-américain Paolo Soleri, qui a employé au début des années 1950 un système de refroidissement par eau pulvérisée sur les parois d'une petite habitation construite à Cave Creek dans l'Arizona et prenant la forme d'un dôme partiellement enterré⁷. Cette technique a été étudiée expérimentalement par l'américain G. E. Sutton en 1950 en Floride⁸, dans le but de réduire les charges de conditionnement d'air et d'optimiser le débit d'eau aspergée⁹. Givoni relate que lors de ces expériences « la température de surface de couvertures de toiture légère en bois a été réduite de 66 à 38 °C par pulvérisation d'eau, et à 42 °C et 39,5 °C par bacs d'eau profonds respectivement de 5 et 15 cm¹⁰. » La technique de refroidissement des toitures par eau pulvérisée est présentée en 1960 par Dreyfus,

1 J. I. Yellott, « Historical and International Perspective for Passive Solar Heating and Cooling », p. 508 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, op. cit., p. 368.

3 The Center for Maximum Potential Building Systems, *An Appropriate Technology Working Atlas for the State of Texas*, Austin : C.M.P.B.S., 1978, n. p.

4 A. Denzer, *The Solar House: Pioneering Sustainable Design*, op. cit., p. 43-44.

5 Entretien avec Bernard Banyuls, le 23/10/2019 à Perpignan.

6 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 207-208.

7 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 137.

8 G. E. Sutton, « Roof Spray for Reduction in Transmitted Solar Radiation », *ASHVE Journal, Section, Heat, Piping and Air Conditioning*, septembre 1950, p. 131-137.

9 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 310.

10 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 170.

qui affirme que ce « procédé est utilisé couramment aux U.S.A.¹ » où « [la] toiture est aspergée en permanence par un tourniquet du type utilisé en horticulture² » afin d'en abaisser la température. Il regrette cependant que la consommation de ce système soit si élevée et puisse atteindre « 4 m³ d'eau tous les jours³. » Ayoub estime que l'utilisation de ce système est limitée aux zones « où l'eau est disponible à bon marché et où les températures sol-air atteintes sont très élevées, c'est-à-dire dans un climat très aride⁴. » Il affirme que ce « procédé exige un fini très soigné dans l'exécution des surfaces et une répartition homogène et bien dosée de la quantité d'eau répandue par vaporisation d'eau en fines particules, ce qui nécessite une installation d'arrosage très soignée et parfaitement calculée⁵. » Cependant, il considère que les résultats de refroidissement obtenus par ce type de système « ne sont pas sensiblement supérieurs à ceux des écrans solaires disposés en façade⁶ ». Cette conclusion est cependant contestable dans la mesure où Ayoub envisage seulement l'utilisation de l'évaporation pour limiter l'échauffement des toitures massives et non pour le refroidissement de surfaces légères conçues pour produire un rafraîchissement à l'intérieur d'une construction.

Bien que les performances de cette technique aient été contestées en zone tropicale, les recherches de Sutton sur le refroidissement des toitures par l'évaporation de l'eau ont été poursuivies par Hay, qui a utilisé à la fois des bacs remplis d'eau et le principe des toitures aspergées pour le développement de son système *Skytherm*⁷. L'évaporation de l'eau est alors considérée comme une technique complémentaire aux autres systèmes de rafraîchissement et susceptible d'être utilisée exceptionnellement lors des périodes de surchauffe. Malgré ces recherches, les tentatives pour quantifier le taux d'évaporation et donc la quantité de chaleur prélevée à la structure lors de ce changement d'état sont restées approximatives⁸. Afin de minimiser la consommation d'eau qui limite l'emploi des systèmes à évaporation, le recours à des toits engazonnés et régulièrement arrosés est parfois évoqué comme une solution

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 310.

2 *Ibid.*, p. 310.

3 *Ibid.*, p. 311.

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 135.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 56 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

8 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., p. 77-78.

satisfaisante¹. Givoni a également proposé d'utiliser un système de toiture recouvert de sable régulièrement mouillé², le sable ayant l'intérêt d'être un matériau à la fois massif et doté d'une très faible conductivité thermique³. Givoni est l'auteur des principales recherches sur le sujet avec Hay à partir du milieu des années 1960, et il a par la suite poursuivi ses expérimentations sur le rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde et par évaporation jusqu'à récemment⁴.

Malgré l'intérêt qu'elles ont suscité et les recherches dont elles ont fait l'objet, les techniques de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde et par évaporation ont connu peu d'applications en comparaison des techniques solaires passives de chauffage. Cela s'explique avant tout par les moindres besoins de rafraîchissement aux latitudes tempérées qui concentrent les principales réalisations sur cette période, mais aussi par le fait que les recherches sur ces techniques se sont concentrées autour d'un seul système dès la fin des années 1960. Si le développement des techniques de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde et par évaporation s'est poursuivi suivant des lignées autonomes, notamment par l'intermédiaire de Givoni, un certain nombre ont convergé avec les recherches de Hay aux États-Unis, qui a mis au point avec l'aide de John Yellott le système *Skytherm* que nous avons déjà mentionné. De par l'espoir qu'a suscité cette technique, son originalité et le fait qu'elle croise différentes lignées techniques que nous avons déjà évoquées, nous avons choisi de l'examiner en détail dans le chapitre suivant. Si le système *Skytherm* n'a connu aucune application en France, il a néanmoins été largement diffusé à partir du milieu des années 1970.

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 133.

2 J. I. Yellott, « Historical and International Perspective for Passive Solar Heating and Cooling », p. 509 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 251.

4 B. Givoni, « Indoor temperature reduction by passive cooling systems », *Solar Energy*, vol. 85, n° 8, août 2011, p. 1692-1726.

II.3.3. L'isolation mobile pour la climatisation des habitations : le cas du système *Skytherm*

II.3.3.1. La mise au point du système *Skytherm*, au croisement de plusieurs lignées techniques

Le système *Skytherm* constitue la technique de rafraîchissement la plus connue et la plus largement diffusée au cours de la période que nous considérons. Il a été conçu par Hay en collaboration avec Yellott pour exploiter le rayonnement de grande longueur d'onde et l'évaporation de l'eau lorsque l'humidité de l'air est trop importante. Cependant, il a été initialement conçu à partir des recherches de Hay sur l'isolation mobile. La mise au point du système *Skytherm* croise donc plusieurs lignées techniques initialement bien distinctes : d'une part celles relatives au rafraîchissement par rayonnement infrarouge et évaporation, et d'autre part celles concernant les principes d'isolation et de protection mobiles, que nous avons évoqués précédemment.

Harold Hay (1909-2009) est d'abord un chimiste américain, titulaire de nombreux brevets importants dans ce domaine¹. En 1953, alors qu'il travaille comme conseiller spécialisé dans les matériaux de construction pour le gouvernement d'Inde, Hay prend conscience de l'inconfort thermique de certaines constructions économiques, dont les toitures sont fabriquées avec des matériaux occidentaux moins bien adaptés au climat indien que les matériaux traditionnels comme le chaume². S'il reconnaît l'intérêt de l'isolation, il estime qu'un système d'isolation mobile serait plus cohérent étant donné les besoins antagonistes de chauffage et de rafraîchissement de ce type de construction³. En 1954, il construit une première maison prototype à New Delhi (28° nord) dotée d'un système d'isolation mobile manipulable, qui peut être alternativement placée en toiture ou derrière le mur sud. Il fonctionne selon le principe suivant :

« Les jours d'hiver, la chaleur solaire rayonnait à travers un toit en amiante-ciment incliné vers le sud dans la maison de New Delhi qui avait des murs en briques et des sols en béton. Des

-
- 1 H. R. Hay, « New Roofs for Hot Dry Regions », *Ekistics*, « Housing and Urbanizing World », vol. 31, n°183, février 1971, p. 158. Pour une biographie plus complète de Hay, voir : R. Peña, « Creating the context for solar future. Two activists, two buildings », p. 76-77 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.
 - 2 H. R. Hay, « Atascadero Residence », p. 102-103 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 3 H. R. Hay, « New Roofs for Hot Dry Regions », op. cit., p. 158.

panneaux isolants, positionnés contre le mur sud, empêchaient cette chaleur intérieure de pénétrer dans ce mur pendant qu'il était chauffé extérieurement par irradiation solaire. La nuit [...], l'isolation était déplacée jusqu'au toit pour éviter les pertes de chaleur¹. »

Ces manipulations quotidiennes sont inversées en été : les panneaux isolants sont placés sur la toiture en journée, pour en limiter l'échauffement, et sont disposés à l'intérieur contre le mur sud de nuit, afin de limiter la transmission de la chaleur vers l'intérieur et de permettre « à la chaleur accumulée de la pièce de rayonner vers le toit froid, puis vers le ciel nocturne² ». Rétrospectivement, Hay affirme que cette expérience en Inde a provoqué une prise de conscience du fait que l'architecture moderne consistait fondamentalement à « [refroidir] tous les tropiques et [chauffer] tout l'Arctique³ », et qu'au regard des dépenses énergétiques engendrées par le refroidissement et le chauffage, il paraissait nécessaire de « recommencer à travailler avec le climat, et non contre lui⁴. »

Malgré le succès relatif de cette réalisation, qui est visitée par deux Premiers ministres indiens en 1954, Hay estime que le principe de l'isolation mobile est mal accepté⁵. De retour aux États-Unis, il présente et discute son invention dès 1965 lors de différents congrès de l'International Solar Energy Society⁶ (ISES). Hay souhaite associer son système d'isolation mobile avec des toitures-bassins, qui existent au moins depuis les années 1930 aux États-Unis⁷. Très économiques et bien plus massives que les toits légers, celles-ci sont néanmoins considérées comme inutiles pour le chauffage en hiver, et sont progressivement abandonnées et

1 *Ibid.*, p. 158-159. Traduction personnelle, citation originale : « On winter days, solar heat radiated through a south-sloping asbestos-cement roof into the New Delhi house which had brick walls and concrete floors. Insulation panels, positioned against the south wall, prevented this interior heat from entering that wall while it was being externally heated by solar irradiation. At night [...] the insulation was moved up to the roof to prevent heat loss there. »

2 *Ibid.*, p. 159. Traduction personnelle, citation originale : « allowed accumulated room heat to radiate to the cool roof, and then to the night sky ».

3 H. R. Hay, « Atascadero Residence », p. 102 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « With modern architecture, we basically cool all the tropics as well as heat all of the Arctic we don't have that much energy. »

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « We must return to working with the climate — not against it. »

5 *Ibid.*, p. 103.

6 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *Solar Energy*, vol. 12, 1969, p. 428.

7 H. R. Hay, « Roof-, Ceiling-, and Thermal Ponds », p. 335 in : *Solar Use Now - A Resource for People: Extended Abstracts. 1975 International Solar Energy Congress and Exposition July 28-August 1, 1975, University of California, Los Angeles, California, USA*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

remplacées par des systèmes d'eau pulvérisée ou une isolation fixe durant les années 1960¹. La mise au point du système *Skytherm*, qui utilise les toitures-bassins (*Thermopond*) et le principe de l'isolation mobile intervient vraisemblablement à cette période.

En adaptant le principe de l'isolation mobile développé en Inde aux besoins identifiés dans les climats des États-Unis, Hay suit un mouvement caractéristique de la « leçon des tropiques² » évoquée par Jean-Pierre Traisnel à propos des protections solaires mises au point en zone tropicale et utilisées par la suite en climat tempéré. L'isolation mobile est une technique initialement conçue pour résoudre une problématique d'inconfort thermique dans les régions chaudes et sèches en zone tropicale³, qui a été reprise et transformée pour répondre à des problèmes analogues rencontrés dans d'autres zones chaudes et sèches à des latitudes plus élevées, ainsi que dans certains climats tempérés. Entre 1965 et 1966, Hay mène une série de mesures à Tempe dans l'Arizona, à partir de bacs sombres remplis d'eau alternativement exposés et isolés à l'aide de panneaux en polystyrène⁴. Les résultats des mesures obtenus lors de ces premiers essais montrent que l'utilisation de toitures-bassins et d'une isolation mobile est susceptible d'assurer à la fois les besoins de chauffage et de rafraîchissement d'une construction⁵. Il affirme que ce système serait susceptible de produire un « conditionnement d'air naturel » (« *natural air conditioning* »). Il présente ses résultats en 1966 à une réunion de l'ISES à laquelle assiste Yellott qui est enthousiasmé par cette technique et lui propose de développer ses expérimentations à Phoenix⁶.

II.3.3.2. Tests et premières mises à l'épreuve du système *Skytherm*

Conforté par ces résultats encourageants, Hay construit en 1967 dans le laboratoire de Yellott à l'Université de Phoenix une petite habitation prototype de 11 m², afin de tester et de mesurer les performances thermiques de l'isolation mobile couplée à une toiture-bassin. Celle-ci est composée de trois bassins indépendants d'une quinzaine de centimètres de profondeur,

1 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *op. cit.*, p. 430.

2 J.-P. Traisnel, *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, *op. cit.*, p. 397-406.

3 H. R. Hay, « New Roofs for Hot Dry Regions », *op. cit.*

4 H. R. Hay, J. I. Yellott, « A Naturally Air-Conditioned Building », [1ère éd. 1970], p. 482 in : B. Sørensen (éd.) *Renewable Energy. Volume I: Renewable Energy Origins and Flows*, New York : Earthscan, 2011.

5 *Ibid.*, p. 483.

6 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

ayant une capacité thermique équivalente à une dalle de 30 cm de béton¹. Le bâtiment est de plan presque carré avec un abri à voiture au sud, dont la toiture permet de recevoir les panneaux isolants une fois rétractés qui coulisent dans un rail en aluminium² (*figure 93*). Ils doivent être quotidiennement rétractés ou déployés à l'aide d'une corde : en été, l'isolation doit recouvrir la toiture-bassin le jour, afin d'en limiter l'échauffement, et être rétractée la nuit, pour la rafraîchir par rayonnement dans l'infrarouge lointain, et inversement en hiver afin de favoriser l'échauffement de la toiture en journée et pour limiter ses déperditions thermiques de nuit³. En automne et au printemps, ces manipulations dépendent de la météo et ne nécessitent plus d'être quotidiennes. Hay et Yellott affirment que les panneaux isolants n'ont besoin d'être manipulés que durant trois mois répartis dans l'année⁴.

Le fond de la toiture-bassin est formé d'un liner noir en polyéthylène, qui repose sur une structure en tôle nervurée qui forme également le plafond de la construction, afin de maximiser les échanges thermiques avec l'intérieur, l'ensemble étant supporté par une série de poutres en bois⁵. Le contact entre ces différents éléments doit être particulièrement soigné afin de maximiser la conduction entre la face inférieure du plafond et l'eau des bassins. La structure elle-même est relativement massive : elle est construite sur une dalle en béton, tandis que les murs sont en blocs de béton creux remplis de vermiculite⁶. Pour relever précisément les performances de ce système, Hay et Yellott équipent cette construction de 168 thermocouples⁷, qui correspondent à 24 points de mesure des températures, qui sont enregistrées toutes les 12 minutes, pendant une période de 18 mois entre 1967 et 1968⁸. D'abord laissés à l'air libre, les bassins sont recouverts d'un film PVC après le premier mois de fonctionnement afin

1 H. R. Hay, « New Roofs for Hot Dry Regions », *op. cit.*, p. 159.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, *op. cit.*, p. 77. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 *Ibid.*

4 H. R. Hay, J. I. Yellott, « A Naturally Air-Conditioned Building », *op. cit.*, p. 492.

5 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, *op. cit.*, p. 77. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *op. cit.*, p. 430.

7 *Ibid.*

8 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 3 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

d'empêcher toute évaporation¹. Hay affirme que le choix de films plastiques suffisamment résistants aux rayons ultraviolets a été l'un des problèmes les plus complexes à résoudre².



Figure 93 : *Prototype d'habitation conçu pour tester le système Skytherm à l'Université de Phoenix.*
(H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *Solar Energy*,
vol. 12, 1969, p. 430)

Après un an de mesure, il apparaît que ce système permet de produire des températures intérieures comprises entre 20 et 28 °C toute l'année, qui varient entre 21 et 26,5 °C pendant 90 % du temps³, dans le climat chaud et aride de Phoenix (33° nord), qui est marqué par des périodes humides et des températures annuelles extrêmes qui peuvent atteindre -4 °C en hiver et 46 °C en été⁴. Grâce à ces résultats, le système *Skytherm* est présenté par Hay et Yellott comme susceptible d'assurer l'intégralité des besoins de chauffage et de rafraîchissement dans ce type de climat. Ces performances sont obtenues essentiellement grâce au rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde en été, et par l'isolation nocturne de la toiture-

-
- 1 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 H. R. Hay, « Roof Mass and Comfort », p. 26 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.*
 - 3 H. R. Hay, J. I. Yellott, « A Naturally Air-Conditioned Building », *op. cit.*, p. 491-492.
 - 4 *Ibid.*, p. 54.

bassin en hiver qui permet de conserver la chaleur qui y est accumulée. L'importante capacité thermique de la toiture et de la structure assure une autonomie de chauffage pour deux ou trois jours sans ensoleillement¹. Cependant, certaines périodes chaudes et humides propres au climat régional de Phoenix, liées à « l'afflux d'air chaud et humide du golfe du Mexique² », sont apparues comme particulièrement critiques pour maintenir les conditions de confort et ont nécessité de recourir à l'évaporation de l'eau, afin de refroidir la toiture-bassin de nuit.

Les travaux de Bliss avaient mis en évidence que l'émissivité de l'atmosphère, donc le potentiel de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde, est fonction de la température de rosée qui exprime la température à partir de laquelle l'humidité de l'air se condense (ou plus précisément se liquéfie) et constitue un indicateur de l'humidité relative de l'air³. Les observations de Hay et Yellott confirment les résultats de Bliss et il apparaît que le rayonnement dans l'infrarouge lointain est optimal pour une température de rosée qui n'excède pas 7 °C⁴. Or, des températures de rosée très élevées, entre 12 et 21 °C, sont fréquemment atteintes durant les mois de juillet et d'août à Phoenix⁵, ce qui nécessite le recours au rafraîchissement par évaporation et éventuellement la production d'une convection forcée par air calme afin d'accélérer ce phénomène. L'hypothèse de laisser la toiture-bassin à l'air libre pour la refroidir par évaporation nocturne ayant été écartée, dans la mesure où celle-ci aurait conduit à un rafraîchissement trop important en mai et en septembre, Hay et Yellott ont privilégié la projection d'une fine couche d'eau directement sur le film plastique recouvrant les bacs, selon une technique déjà étudiée par Sutton⁶. Durant les mois de juin, juillet et août, où les températures et l'humidité ambiante peuvent être particulièrement importantes et empêchent le rayonnement de grande longueur d'onde ainsi que l'évaporation nocturne, Hay a expérimenté différents systèmes mécaniques, afin de contenir les températures intérieures en deçà de 30 °C et dans la limite supérieure de la zone de confort⁷. Il a essentiellement utilisé un ventilateur

1 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *op. cit.*, p. 432.

2 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 56 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 *Ibid.*, p. 58.

4 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *op. cit.*, p. 434.

5 *Ibid.*, p. 435.

6 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 56 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

7 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *op. cit.*, p. 434-435.

extérieur afin de provoquer une convection forcée le long de la toiture-bassin¹. Il apparaît que les mois de juin, juillet et août nécessitent d'utiliser occasionnellement des appareils électriques de ce type afin de maintenir la température intérieure dans la zone de confort. Hay et Yellott affirment qu'une « consommation modérée d'électricité² » permet de sensiblement améliorer les performances de leur système pendant ces périodes critiques particulièrement inconfortables durant lesquelles l'utilisation de systèmes électriques est inévitable, indépendamment de la technique de rafraîchissement employée³ (compresseur, ventilateur...).

II.3.3.3. La maison d'Atascadero et les évolutions du système *Skytherm*

Motivé par les bons résultats de son prototype, Hay dépose deux brevets pour ce système en 1969⁴ et en 1971⁵. Il engage en 1973 la construction d'une maison entièrement équipée du système *Skytherm* à Atascadero (35° nord), en Californie, dans un climat sensiblement différent de celui de Phoenix et plus favorable au rafraîchissement car la température moyenne extérieure en été est située dans la zone de confort⁶ (*figure 94*). Le choix de cette localité était sans doute aussi motivé par le fait que la consommation d'électricité dans les bâtiments pour les besoins de climatisation était importante dans cet État : Hay mentionne en 1976 que 63 % de l'énergie électrique domestique est employée pour le conditionnement mécanique de l'air à Los Angeles⁷. Il s'associe avec l'architecte Kenneth Haggard, l'ingénieur Philip Niles, ainsi que l'Université Polytechnique de l'État de Californie. Niles a notamment été en charge de la modélisation du comportement thermique de cette construction. La maison d'Atascadero se présente sous la forme d'une construction de plain-pied d'une surface de 106 m², les murs nord et sud ainsi que les refends étant construits en blocs de béton creux remplis de sable ou de vermiculite pour améliorer l'inertie thermique⁸, tandis que les façades est et ouest sont réalisées en panneaux de bois afin d'abaisser les coûts de construction⁹. L'aménagement intérieur de la maison

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 431. Traduction personnelle, citation originale : « moderate consumption of electricity »

3 *Ibid.*, p. 434.

4 US Patent 3,450,192.

5 US Patent 3,563,305.

6 B. Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, op. cit., p. 103.

7 H. R. Hay, « The Atascadero House », p. 101 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

8 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 11. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

9 H. R. Hay, « The California Solarchitecture House », p. EH.73-5 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne).

d'Atascadero correspond à celui d'une maison conventionnelle, à l'exception du plafond métallique nervuré déjà utilisé à Phoenix et indispensable aux échanges thermiques entre l'intérieur et le système *Skytherm* (figure 95).

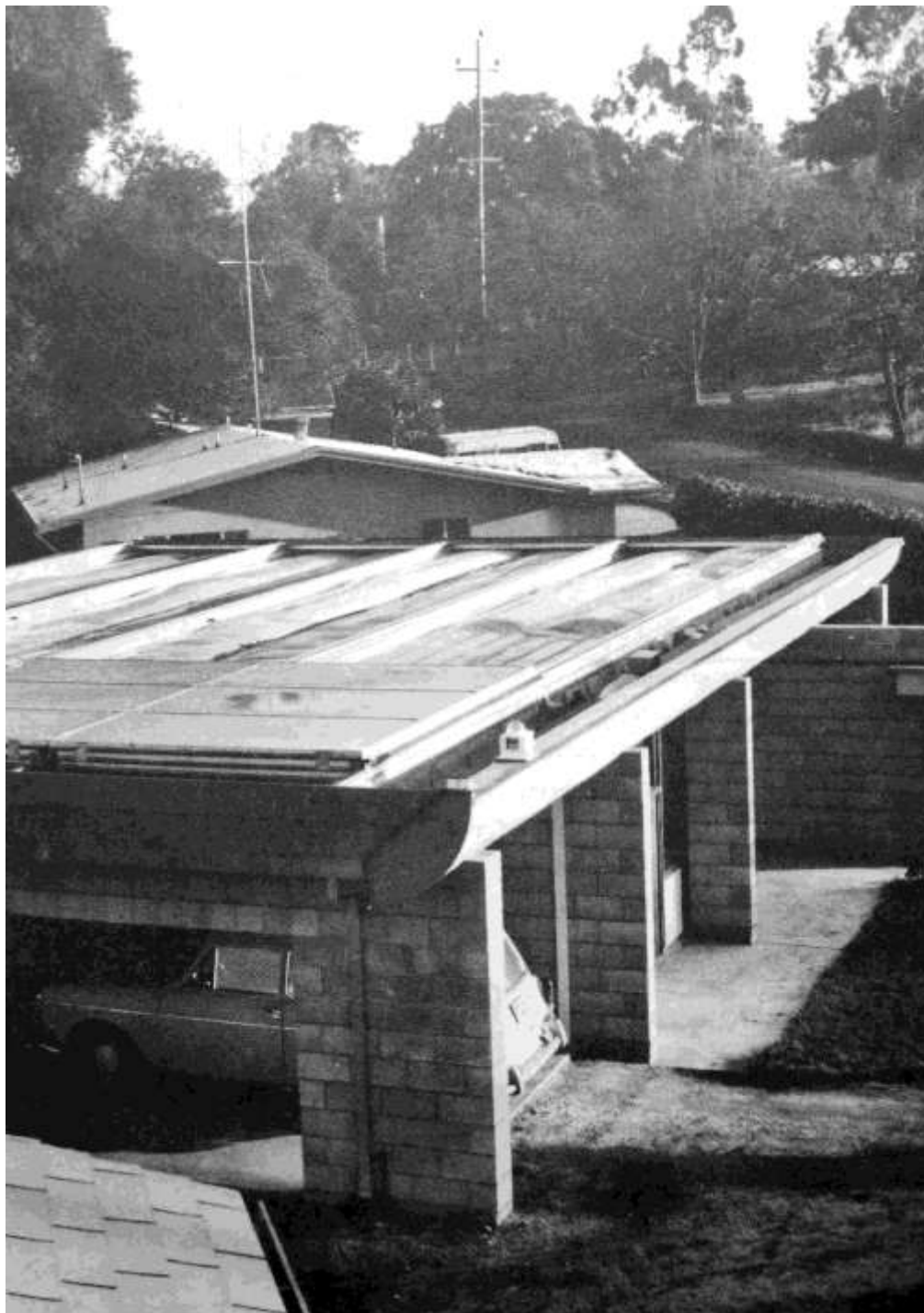


Figure 94 : Toiture de la maison d'Atascadero équipée du système Skytherm.
(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 147)



Figure 95 : Intérieur de la maison d'Atascadero. On remarque que le plafond blanc est formé de tôles métalliques nervurées pour favoriser les échanges thermiques.
(B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, p. 138)

Le site de la construction bénéficie d'un climat local et d'un microclimat légèrement plus favorable que le prototype de Phoenix. Les besoins de rafraîchissement y sont moins importants, mais les hivers plus rudes de cette région imposent des exigences supérieures au système *Skytherm* en ce qui concerne les performances de chauffage, comme le précise Hay :

« La localisation plus au nord [que le bâtiment de Phoenix] avec des températures minimales de -12°C et un pourcentage d'ensoleillement possible moins favorable, offre un meilleur test du chauffage solaire que Phoenix. Avec 43°C , le rafraîchissement estival sera meilleur que les résultats obtenus à Phoenix, non seulement en raison de températures de rosée plus favorables, mais parce que les montagnes environnantes provoquent un flux d'air nocturne frais qui équilibre les températures diurnes élevées pour produire des moyennes mensuelles d'été d'environ 21°C^1 . »

1 *Ibid.*, p. EH.73-4. Traduction personnelle, citation originale : « The more northerly location with -12°C lows and a less favourable percentage of possible sunshine provides a better test of solar heating than did

Étant donné cette différence de climat, le système *Skytherm* a été modifié pour celui d'Atascadero. L'épaisseur des panneaux isolants mobiles est augmentée et recouverte de feuilles d'aluminium sur ses deux faces¹. La profondeur des bacs est également augmentée² : ils prennent la forme de quatre poches en film PVC de 22 cm de profondeur³. Ils sont disposés sur un liner noir qui recouvre la structure en tôle métallique nervurée qui, une fois remplie d'eau, forme une toiture-bassin de 24 tonnes (*figure 96*). En position d'été, les panneaux isolants recouvrent l'intégralité de la toiture de l'espace habitable, tandis qu'en hiver ils sont repliés au-dessus de l'abri à voiture, pour exposer les bacs remplis d'eau (*figure 97*). Disposés sur trois niveaux de rails, ces panneaux sont mus par un unique petit moteur qui est actionné par un système de thermostat différentiel nommé « Waterstat⁴ » spécialement conçu pour le projet par Niles⁵. Étant donné les températures plus basses qu'à Phoenix, un second film plastique a été soudé sur la membrane recouvrant les bacs, l'espace entre les deux films étant maintenu par une faible surpression générée par un petit ventilateur, afin d'isoler le volume d'eau de l'air extérieur et d'améliorer les performances de chauffage du système⁶. En été, les deux films sont mis en contact afin de favoriser les déperditions thermiques des bassins par convection.

Phoenix. Summer cooling at 43 °C will be better than the Phoenix results not only because of more favourable dew points but because surroundings mountains cause a down-flow of cool night air which balances high daytime temperatures to produce summer monthly means of about 21 °C. »

- 1 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
- 2 *Ibid.*
- 3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, *op. cit.*, p. 80. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
- 4 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
- 5 K. Haggard, « A clear sky story on the evolution of passive solar design. The source and multiple applications of Harold Hay's roof pond system », p. 26-27 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, *op. cit.*
- 6 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

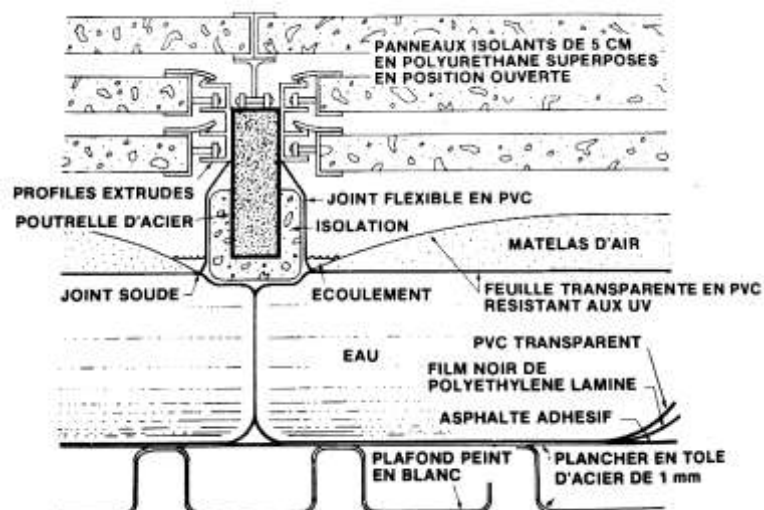


Figure 96 : Coupe détaillée du système Skytherm de la maison d'Atascadero.
(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 145)

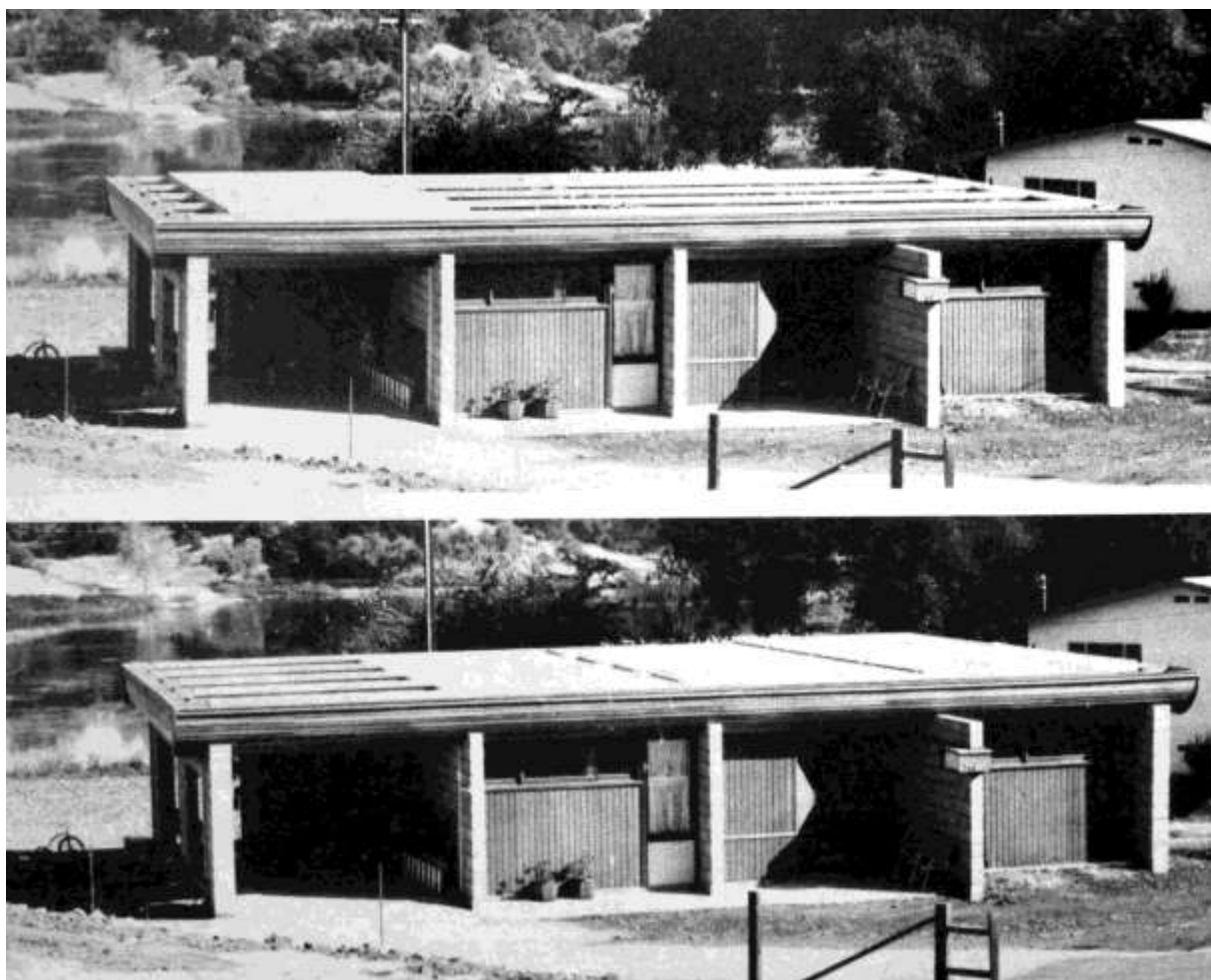


Figure 97 : Panneaux isolants du système Skytherm en position repliée (haut) et dépliée (bas).
(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 156)

Les performances de cette maison une fois habitée ont été mesurées entre 1973 et 1975 sous la supervision de Haggard et ont confirmé les bons résultats déjà obtenus à Phoenix ainsi que les améliorations effectuées¹. Le système *Skytherm* assure l'intégralité des besoins de chauffage et de rafraîchissement², la consommation électrique des différents appareils nécessaires au déplacement de l'isolation mobile étant négligeable³. Il apparaît que l'importante masse d'eau permet d'assurer quatre jours de chauffage pendant les périodes nuageuses, à condition que celle-ci soit au minimum à 30 °C le premier jour⁴. En février, où les températures extérieures varient de 0 à 15 °C, la température intérieure ne descend pas en dessous de 20 °C et se stabilise aux alentours de 22 °C⁵. En été, où la température extérieure varie entre 15 et 36 °C, la température intérieure reste stabilisée aux alentours de 23 °C⁶. De plus, les performances de confort sont qualitativement très intéressantes : les locataires estiment que le système de rafraîchissement est « bien supérieur⁷ » à celui d'un système conventionnel, notamment du fait qu'il ne crée aucun bruit et distribue uniformément la température dans l'espace intérieur.

Ces mesures ont montré que le rendement moyen du système *Skytherm* était plutôt faible, de l'ordre de 30 % pour le prototype de Phoenix⁸, et de 20 % pour celle d'Atascadero⁹. Ces valeurs sont néanmoins supérieures à celles calculées indépendamment par certains ingénieurs en France pour ce système¹⁰. Hay affirme que le calcul du rendement du système *Skytherm* comme s'il s'agissait d'un capteur solaire conventionnel est dépourvu de signification, dans la mesure où ses performances sont définies à partir des périodes où il peut assurer le chauffage et le rafraîchissement :

-
- 1 H. R. Hay, « Letter to the Select Committee On Small Business of the United States Senate », p. 16 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.
 - 2 *Ibid.*
 - 3 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 83. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 5 *Ibid.*
 - 6 *Ibid.*, p. 84.
 - 7 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 138.
 - 8 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », op. cit., p. 431.
 - 9 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 138.
 - 10 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 57.

« Le bassin horizontal exposé, recouvert d'un plastique plutôt que d'un vitrage, captera avec une efficacité plutôt faible. [...] Ce n'est pas un capteur haute température, mais un capteur de température de confort. Ce n'est pas seulement un capteur, mais aussi un dissipateur de chaleur. Grâce à l'efficacité de captage plus faible, il a une efficacité de dissipation plus élevée et peut ainsi fournir 100% du chauffage et 100% du rafraîchissement dans une partie substantielle du sud-ouest. Nous devons redéfinir nos objectifs¹. »

Hay est également critique des réglementations relatives à l'isolation. Il affirme que le système *Skytherm* utilise une épaisseur d'isolation bien moindre que celle qui est recommandée par la législation². Il plaide pour une utilisation plus importante de la capacité thermique, ce qui le conduit à affirmer que l'eau constitue le matériau d'isolation « optimal » :

« Ce n'est pas une coïncidence si pendant des millions d'années les formes de vie les plus basses et les plus élevées dépendaient davantage de l'isolation de capacité que de l'isolation de conductance. Le stockage de chaleur dans les matériaux de masse élevée reste plus proche d'une température constante sur de longues périodes [...]. Le corps de l'homme est, principalement, une masse d'eau dont seuls les cheveux servent d'isolant de conductance³. »

Avec le système *Skytherm*, Hay et Yellott ont posé les bases de ce qu'ils présentent comme le conditionnement d'air naturel. Cette technique peut être considérée comme un véritable système de climatisation, dans la mesure où elle assure l'intégralité des besoins de chauffage et de rafraîchissement. En 1969, ils affirment que « [le] conditionnement d'air naturel a été une adaptation aux extrêmes, ou l'effet de conserver et d'utiliser une température extrême

1 H. R. Hay, « The Atascadero House », p. 103 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « The exposed horizontal pond, with a plastic cover instead of glass, will collect at a rather low efficiency. [...] It is not a high temperature collector but a comfort temperature collector. It is not just a collector but also a heat dissipator. By virtue of the lower collecting efficiency, it has a higher dissipating efficiency and thereby can give 100% heating and 100% cooling in a substantial part of the Southwest. We should redefine our goals. »

2 H. R. Hay, « Roof Mass and Comfort », p. 24 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit.

3 *Ibid.*, p. 23. Traduction personnelle, citation originale : « It is no coincidence that throughout millions of years the lowest and the highest forms of life depended more upon capacity insulation than upon conductance insulation. Heat storage in high-mass materials remains closer to a constant temperature over a long periods of time [...]. Man's body is, primarily, a water mass with only hair serving as a conductance insulator. »

pour contrer l'autre, de manière à améliorer le confort intérieur¹. » Le système *Skytherm* est ainsi présenté comme une technique de climatisation fonctionnant grâce à l'inertie thermique et la possibilité de conserver sur une période de plusieurs jours une masse d'eau froide ou réchauffée. Hay emploiera plus tardivement l'expression de « contrôle thermique naturel² » (« *natural thermal control* »), reprenant ainsi une expression déjà employée en français par Ayoub en 1960.

Les performances du prototype de Phoenix et de la maison d'Atascadero sont communiquées dans de nombreux articles et conférences entre 1969 et 1979 par Hay et Yellott, qui contribuent à la popularité du système *Skytherm* auprès des acteurs de la conception solaire passive aux États-Unis comme à l'étranger. Des règles de dimensionnement analogues à celles évoquées précédemment pour les techniques de captage seront proposées dès 1979³. Ce système connaîtra de très nombreuses évolutions aux États-Unis : un rapport intitulé *Roof Ponds Systems* commandé par le département de l'énergie du gouvernement américain et publié en avril 1984 en recense près de deux cents déclinaisons⁴. Nombre d'entre elles ont été réalisées en collaboration avec Hay, qui participe par exemple au projet d'une usine au Texas climatisée grâce au système *Skytherm*⁵, ou au développement des « bassins de comble⁶ » (« *attic ponds* »), essentiellement conçus pour le chauffage aux latitudes plus élevées des États-Unis. Certains architectes proposeront d'intégrer le système *Skytherm* dans des programmes ambitieux. C'est notamment le cas d'un projet présenté lors d'un concours pour la construction des bureaux de l'État de Californie, dont les bâtiments avaient été conçus pour être intégralement climatisés grâce à des modules de bassin contenant plus de 50 tonnes d'eau⁷.

-
- 1 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *op. cit.*, p. 431. Traduction personnelle, citation originale : « Natural air conditioning has been an accomodation to extremes, or the effect of conserving and utilizing one temperature extreme to counteract the other in a manner to enhance indoor comfort. »
 - 2 H. R. Hay, « 100 % Natural Thermal Control », p. 532-545 in : *Passive and Low Energy Ecotechniques. The Third International PLEA Conference, Mexico City, Mexico, 6-11 August 1984*, s. l., PLEA, 1984. (Archives personnelles de Daniel Overbey – Indianapolis)
 - 3 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 147-156.
 - 4 W. P. Marlatt, K. A. Murray, S. E. Squier, *Roof Pond Systems*, Canoga Park : Energy Technology Engineering Center, 1984, n. p. (Archives personnelles de Daniel Overbey – Indianapolis)
 - 5 H. R. Hay, « Skytherm Natural Air Conditioning for a Texas Factory », p. 214-217 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.*
 - 6 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, *op. cit.*, p. 139-140.
 - 7 K. Haggard, J. Pohl, P. Cooper, « An Office building for an Era of Transitions: Application of the Skytherm System of Passive Heating and Cooling to a Moderate Density Office Building », p. 223-227 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.*

Le système *Skytherm* présente de nombreux atouts : il est fiable, performant et produit surtout un haut niveau de confort¹. De nombreux acteurs, comme l'architecte David Wright, le considèrent comme un aboutissement des techniques solaires passives, dans la mesure où il synthétise la production du chauffage et du rafraîchissement dans un même élément massif qui assure continuellement la fonction d'échangeur thermique². Il possède cependant certains inconvénients majeurs. Malgré le fait qu'il soit considéré comme économique par Hay, le surcoût engendré par son installation par rapport à un système conventionnel reste élevé³. Son usage est limité à des constructions neuves et de plain-pied⁴, qui doivent être situées à des latitudes relativement basses où la toiture est exposée au rayonnement solaire toute l'année. Il est ainsi très bien adapté aux constructions situées entre l'équateur et le 35e parallèle⁵. L'importante masse d'eau impose également des charges considérables à la structure et les problèmes d'imperméabilité et de réalisation d'un système d'isolation mobile suffisamment étanche nécessitent des finitions soignées. Enfin, la neige et les précipitations imposent d'autres contraintes relatives à l'écoulement de l'eau.

Ces défauts ont été signalés par les acteurs français de l'époque et ont sans doute contribué à limiter le développement de ce système en Europe. La revue *Le Sauvage* signale par exemple en 1978 que la construction d'une maison avec des « sacs d'eau⁶ » présente « de nombreuses difficultés techniques, notamment dans l'étanchéité de la toiture, l'écoulement des eaux de pluie et le déplacement des panneaux isolants⁷. » Si le système *Skytherm* n'a vraisemblablement connu aucun développement en Europe, il semble que les recherches de Hay ont eu une influence indirecte sur l'emploi généralisé d'importants volumes d'eau dans les constructions bioclimatiques et solaires passives, en France comme aux États-Unis. L'efficacité de son système a sans doute contribué à dissiper certaines inquiétudes liées à l'utilisation de l'eau dans les constructions (gel, étanchéité, algues...). Baer se réfère ainsi directement aux

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 85. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 83 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 139 ; B. Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, op. cit., p. 107.

4 W. P. Marlatt, K. A. Murray, S. E. Squier, *Roof Pond Systems*, Canoga Park : Energy Technology Engineering Center, 1984, p. 1-8. (Archives personnelles de Daniel Overbey – Indianapolis)

5 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 85. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 D. Simonnet, « Quarante deux maisons solaires », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, op. cit., p. 60.

7 *Ibid.*

recherches de Hay lorsqu'il évoque l'invention de son système *Drumwall*, ainsi que la création de son entreprise Zomeworks¹. Il décrit ainsi la genèse de son invention :

« Après avoir entendu Hay à Palo Alto en octobre 1968, j'ai construit une grande boîte isolée contenant un bidon en acier de cinquante-cinq gallons [$\approx$ 200 litres] d'eau derrière une vitre simple vitrage. Une porte à réflecteur orientée au sud était articulée en bas que j'ouvrais tous les jours et fermais la nuit, cela fonctionnait². »

Réciproquement, Hay considère le système mis au point par Baer comme une évolution du système *Skytherm*, mieux adapté aux latitudes plus élevées ou aux régions enneigées³. Par l'intermédiaire de Baer, Hay a participé à développer les techniques de captage utilisant l'eau comme un matériau de construction massif et a contribué à populariser le principe de l'isolation mobile, qui est considéré comme une « solution révolutionnaire pour le confort des habitations⁴ » par Baer. Ses recherches menées sur le système *Skytherm* ont synthétisé plusieurs lignées techniques au milieu des années 1960, mais ont aussi été à l'origine de nouvelles lignées techniques et de nombreux systèmes de chauffage et de rafraîchissement à base d'eau. L'influence de Hay sur les techniques de rafraîchissement et de régulation thermique par l'emploi de grands volumes d'eau est majeure.

Il est possible de synthétiser l'ensemble des recherches sur les techniques solaires passives de rafraîchissement pour les répartir selon certaines lignées techniques, suivant le même principe que nous avons utilisé pour les techniques solaires passives de chauffage (*figure 98*). Nous avons réparti leur évolution en fonction du temps et du mode principal de refroidissement qu'elles utilisent (convection naturelle, rayonnement infrarouge ou évaporation). Ce diagramme montre l'importance du système *Skytherm* et des recherches de Hay et Yellott, qui croisent de nombreuses lignées techniques qui mobilisent des principes de refroidissement différents. Toutes ces lignées convergent vers le système *Skytherm*, qui va

1 S. Baer, « Harold Hay's influence on Zomeworks Corporation », p. 36 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.

2 *Ibid.*, p. 37. Traduction personnelle, citation originale : « After hearing Hay in Palo Alto in October 1968, I built a large insulated box containing a fifty-five-gallon steel drum of water behind a single glazed glass pane. A reflector door facing south hinged at the bottom, which I opened every day and closed at night – it worked. »

3 H. R. Hay, « The California Solarchitecture House », p. EH.73-4 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne).

4 S. Baer, « Cooling with night air », *Sunpaper*, 9:1, janvier 1984, p. 3. Traduction personnelle, citation originale : « This was Harold Hay's revolutionary solution to bouse comfort - moveable insulation. »

également connaître de nombreuses évolutions à partir de la fin des années 1970, notamment sous l'impulsion de Givoni. Ce diagramme montre également la relative autonomie des recherches sur le rafraîchissement par convection naturelle et l'effet de cheminée.

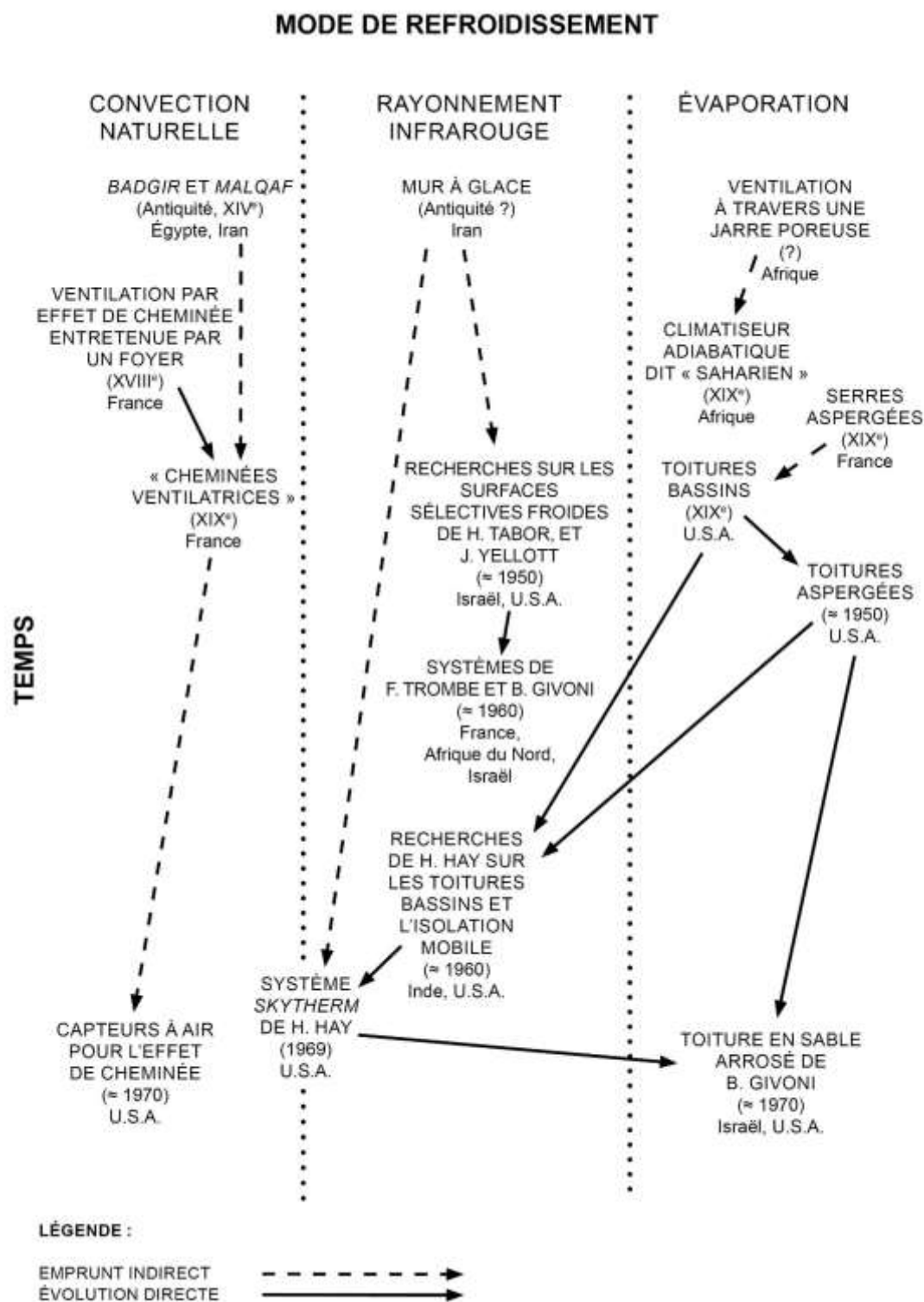


Figure 98 : Schéma des principales lignées techniques des techniques solaires passives de rafraîchissement.
(schéma Clément Gaillard, novembre 2021)

Conclusion de la deuxième partie

Cette partie concernait le développement des principaux systèmes utilisés pour le contrôle thermique des constructions, ainsi que pour le chauffage et le rafraîchissement par le recours à certains phénomènes climatiques favorables, qui ont été développés durant la période considérée. Nous avons essayé de restituer l'évolution de ces systèmes souvent présentés comme des inventions isolées suivant des lignées techniques, afin de concentrer notre analyse sur les phénomènes physiques nécessaires pour leur fonctionnement. Nous avons montré que leur évolution a consisté à surmonter un certain nombre d'antagonismes techniques identifiés. Il est notamment apparu que la compréhension et la maîtrise des effets de la convection naturelle, intervenant dans de nombreuses techniques solaires passives, ont concentré l'essentiel des problèmes rencontrés par les concepteurs ayant participé au développement de ces techniques. Nous avons également vu que la recherche d'amélioration de certaines techniques de chauffage passives s'est faite par déconcrétisation d'éléments primitivement confondus et par dissociation des surfaces de captage et du volume de stockage (systèmes hybrides de captage isolé). En ce qui concerne les techniques de rafraîchissement, il est apparu que la maîtrise des effets de refroidissement des masses et des surfaces a croisé différentes lignées techniques qui ont abouti à des systèmes parfois complexes (système *Skytherm*) mais abondamment diffusés.

Nous avons insisté sur le fait que le développement des techniques solaires passives a été guidé par des problèmes essentiellement techniques et que la majorité d'entre elles ont été mises au point avant 1973. Les ingénieurs, architectes ou inventeurs ont essayé d'améliorer les performances de ces techniques et des éléments qui les composent, tout en privilégiant leur simplicité et leur facilité de mise en œuvre. Ces deux motivations techniques antagonistes sont à l'origine d'une tension qu'on retrouve dans le développement de nombreuses lignées techniques que nous avons abordées. Sans affirmer que l'évolution des techniques solaires passives s'est faite indépendamment du contexte social et politique que nous aborderons dans la partie suivante, il apparaît que cette évolution peut être étudiée d'un point de vue interne, en suivant les lignées techniques et les antagonismes qu'elles portent. Les témoignages que nous avons mobilisés dans cette partie montrent que ce sont essentiellement des problèmes et des antagonismes techniques identifiés qui ont préoccupé les ingénieurs, architectes et inventeurs.

Toutes les techniques que nous avons analysées se caractérisent par leurs fonctions climatiques et appartiennent au développement de la conception solaire passive qui s'est confondue avec le développement de la conception bioclimatique au début des années 1970. À

partir de cette période, la conception solaire passive et la conception bioclimatique peuvent être interprétées comme les deux faces – l’une technique et l’autre méthodologique – d’une même approche de l’architecture et de la construction, bien que leurs développements aient primitivement suivi des trajectoires indépendantes. Avant le début des années 1970, les travaux de Geiger et d’Olgyay n’étaient pas croisés avec ceux de Trombe, de Yellott ou de Hay et appartenaient à des champs disciplinaires relativement distincts. Cependant, les préoccupations énergétiques qui émergent au début des années 1970 en Europe et aux États-Unis ont renouvelé l’intérêt pour l’ensemble de ces travaux, qui sont lus et interprétés par le prisme de la notion d’économie d’énergie, qui constitue une motivation majeure des architectes et des ingénieurs de cette époque.

L’objet de notre prochaine partie est de nous concentrer sur cette période, marquée par la prise de conscience des problématiques énergétiques et environnementales, afin de comprendre comment ces nouvelles motivations ont conduit certains architectes, ingénieurs et inventeurs à synthétiser l’ensemble des travaux évoqués précédemment. Nous verrons en particulier le rôle crucial de la diffusion des publications et des conférences, qui ont contribué à renouveler et à stimuler l’intérêt pour ces travaux à la lumière des enjeux énergétiques et environnementaux, ainsi que les limites liées à cette importante diffusion. Nous étudierons également comment la conception bioclimatique s’est structurée comme une pratique, propre à certains architectes, à travers des méthodes mobilisant certains des outils évoqués précédemment, entre le début des années 1970 et le milieu des années 1980.

PARTIE III :

LA DIFFUSION ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE EN ARCHITECTURE À PARTIR DE 1973

L'ensemble des travaux évoqués dans la première et la deuxième partie n'ont été synthétisés qu'au début des années 1970, avec l'émergence des préoccupations énergétiques et environnementales. Auparavant, l'étude des microclimats et l'approche bioclimatique qui en découlait étaient relativement séparées des recherches sur la fonction climatique des éléments et les techniques solaires passives. Le développement des connaissances sur la dimension matérielle de la climatologie, porté par la microclimatologie, et le développement des connaissances relatives à la dimension climatique des choix matériels, mené par les ingénieurs et les inventeurs que nous avons présentés, n'étaient pas coordonnés. Il existe toutefois des exceptions qui nécessitent de nuancer cette distinction. Les recherches en architecture tropicale ont croisé l'analyse du microclimat et l'étude de la fonction climatique des éléments : les caractéristiques des climats et des microclimats tropicaux sont indissociables de l'analyse du comportement thermique des structures et des recommandations relatives à leur conception dans les documents que nous avons étudiés. Nous verrons qu'à ce titre les ouvrages et les manuels publiés sur la conception en zone tropicale ont servi de premières bases aux architectes et aux ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Dans le même registre, Hay et Yellott ont repris certains travaux en climatologie pour développer le système *Skytherm*, mais la dimension méthodologique de la prise en compte du climat dans la conception est absente de leurs recherches.

Il apparaît que la synthèse de ces différents travaux s'est opérée à l'occasion d'un événement : le premier choc pétrolier de 1973 et la prise de conscience économique de la dépendance aux énergies fossiles dans les pays développés¹. Cette date marque l'apparition d'une préoccupation majeure, partagée par l'ensemble des acteurs de la conception bioclimatique et solaire passive, qui est de limiter l'utilisation des énergies fossiles, notamment pour le chauffage et le rafraîchissement des constructions. Le début des années 1970 est donc marqué par le développement de la conception bioclimatique comme une pratique et une

1 F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 289-301.

méthode de conception revendiquées par certains architectes en France, comme aux États-Unis. Elle s'est structurée à travers un réseau national et international d'acteurs, qui partageaient des références communes et participaient aux mêmes événements, notamment les *Passive Solar Conferences* aux États-Unis, qui sont particulièrement importants pour la diffusion des travaux que nous avons évoqués précédemment, et plus généralement pour la promotion de la conception bioclimatique et solaire passive. La diffusion et la traduction des manuels et ouvrages de référence sur ces sujets ont également participé à la promotion de cette méthode de conception. Nous aurons l'occasion d'étudier en détail la place des publications dans le développement de la conception bioclimatique. Nous avons pu nous entretenir avec quelques acteurs américains, ainsi qu'avec la majorité des acteurs français de la conception bioclimatique de cette période¹, qui s'étend du début des années 1970 au milieu des années 1980. Cette partie s'appuie essentiellement sur les entretiens que nous avons pu mener avec ces architectes et ces ingénieurs, qui ont permis de restituer les échanges et les motivations qui les ont animés.

Une fois présentés le développement de la conception bioclimatique et la façon dont elle s'est structurée comme une démarche de conception revendiquée par un certain nombre d'architectes et d'ingénieurs, nous évoquerons ses limites et les problèmes pratiques qu'elle a pu rencontrer. Notre souhait n'est pas de présenter la conception bioclimatique comme un mouvement né au début des années 1970, popularisé à partir de 1973 et achevé au milieu des années 1980. Le désintérêt progressif pour cette méthode de conception au cours des années 1980, signalé par la majorité des acteurs et des historiens, dépend essentiellement d'événements politiques qui ont concerné l'ensemble des recherches sur les énergies alternatives qui s'étaient développées durant cette période². Notre souhait est de montrer que le développement de la conception bioclimatique et les réalisations qui en sont issues ont mis en évidence un certain nombre de contradictions propres à l'application de cette démarche. Ces contradictions sont néanmoins signifiantes. Elles illustrent des problèmes relatifs à la compréhension du climat local, du microclimat et des phénomènes thermiques à l'œuvre dans les techniques évoquées précédemment. Nos conclusions divergent ainsi de celles des historiens qui verraient une forme d'échec de la conception bioclimatique dans le désintérêt progressif qu'elle a connu à partir du début des années 1980. Selon nous, cet échec, s'il existe, est essentiellement conjoncturel et

1 Malheureusement, quelques-uns de ces acteurs sont décédés avant ou pendant que nous menions notre étude. Lorsque cela était possible, nous avons donc réalisé des entretiens avec leur entourage proche.

2 F. Jarrige, A. Vrigon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 304.

n'altère en aucun cas les significations de la conception bioclimatique, que nous nous proposons d'étudier dans la dernière partie de ce travail.

III.1. Développement et diffusion de la conception bioclimatique à partir de 1973

Ce chapitre traite du développement de la conception bioclimatique sous l'angle des motivations, de la promotion et de la diffusion de son emploi par les architectes et les ingénieurs à partir du début des années 1970 en France et aux États-Unis. Il s'appuie essentiellement sur les supports de cette diffusion, notamment les publications, qui permettent de reconstituer une chronologie de ce développement ainsi que sur les entretiens que nous avons pu mener. Ces entretiens ont été l'occasion de consulter les archives privées d'une dizaine d'architectes et d'ingénieurs, qui ont permis de préciser les témoignages que nous avons pu recueillir. Ils révèlent que ces acteurs étaient d'abord animés par la volonté de concevoir avec le climat afin de réduire la consommation d'énergies fossiles. Bien que cette préoccupation ait existé bien avant cette date, elle est mise en avant dès 1973 afin de justifier publiquement l'intérêt de la conception bioclimatique et solaire passive¹. Nous verrons que la recherche d'économie d'énergie peut être interprétée comme une nouvelle motivation partagée par un ensemble d'acteurs². Elle provient d'une prise de conscience de l'existence de ressources fossiles limitées qui s'est généralisée à la suite de 1973 et qui a encouragé le recours aux énergies dites alternatives.

La recherche d'économie d'énergie a croisé d'autres motivations antérieures qui ont émergé avec la contre-culture au milieu des années 1960³, comme l'insistance sur l'autonomie

1 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 38.

2 La notion de « motivation » nous paraît adéquate dans la mesure où elle est suffisamment générale pour regrouper à la fois les facteurs psychologiques rationnels et irrationnels qui expliquent l'existence d'un projet commun à plusieurs acteurs. De plus, cette notion peut être pluralisée et permet de montrer que les préoccupations d'un individu ou d'un groupe d'individus peuvent être hiérarchisées suivant différents niveaux de motivations. Le concept psychologique de « motivation » est important dans la philosophie de Gilbert Simondon, mais nous l'employons en un sens plus général, sociologique plus que behavioriste. Voir : G. Simondon, « Attitudes et motivations », *Communication et information. Cours et conférences*, Chatou : La Transparence, (coll. Philosophie), 2010, p. 375-398.

3 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, *op. cit.*, p. 19.

énergétique et la décentralisation des convertisseurs¹. L'étude historique des conséquences politiques de la crise de l'énergie sur le développement des énergies alternatives en architecture, et notamment de l'énergie solaire, a déjà été menée et déborde le cadre de notre travail². Nous ferons seulement référence au contexte politique mentionné par les architectes et les ingénieurs, ainsi qu'aux évolutions réglementaires introduites durant cette période. Ces motivations ont été déterminantes pour la promotion et la diffusion de la conception bioclimatique en architecture à partir de 1973.

Cependant, nous verrons que ces motivations politiques issues de la contre-culture ont paradoxalement pu entraver la diffusion des techniques solaires passives en minimisant les contraintes qui pèsent sur leur utilisation. Il existe une tension importante entre le désir de promouvoir l'utilisation de ces systèmes le plus largement possible, et la nécessité de transmettre des connaissances techniques rigoureuses et fiables, afin de justifier de la performance des techniques solaires passives et de montrer qu'elles représentent une alternative crédible aux systèmes de chauffage et de climatisation conventionnels. À partir de 1973, la nature des connaissances techniques diffusées par l'intermédiaire des publications et des événements relatifs à la conception bioclimatique a fait l'objet de débats : il s'agissait de trouver un compromis entre les exigences d'une large diffusion des techniques solaires passives et le souhait de transmettre des résultats fiables et des règles de dimensionnement rigoureuses.

Désormais, nous réserverons les termes de « conception bioclimatique » aux travaux en langue française, et ceux de « conception solaire passive » aux travaux en langue anglaise, bien que ces deux expressions renvoient rigoureusement à une même approche. La première fait référence aux méthodes de conception à partir du climat, tandis que la seconde renvoie aux techniques conçues pour s'en protéger ou en tirer parti. On peut néanmoins considérer la conception bioclimatique comme plus générale, mais aux latitudes tempérées qui regroupent l'essentiel des réalisations, une habitation bioclimatique est indissociable d'une maison solaire passive. Nous considérerons donc les termes de « maison bioclimatique » et de « maison solaire passive » comme synonymes.

1 F. Lopez, *Le Rêve d'une déconnexion : De la maison autonome à la cité auto-énergétique*, Paris : La Villette, 2014, p. 11-12.

2 Voir : M. Chauvin-Michel, *Architectures solaires et politiques énergétiques en France de 1973 à 1985*, op. cit.

III.1.1. La conception bioclimatique au prisme des préoccupations énergétiques

III.1.1.1. Concevoir rationnellement pour économiser l'énergie dans les bâtiments

Le premier choc pétrolier de 1973 marque une prise de conscience généralisée de la dépendance économique des pays développés aux ressources fossiles. Elle fut médiatiquement très diffusée par une série de restrictions portant notamment sur le chauffage des habitations, l'éclairage public et la circulation automobile en Europe et aux États-Unis¹. Les historiens François Jarrige et Alexis Vrignon expliquent :

« Le début des années 1970 est donc un moment charnière dans la manière dont les enjeux énergétiques sont perçus par l'opinion et les pouvoirs publics. L'idée selon laquelle une crise énergétique d'ampleur impose de trouver d'autres sources d'énergie pour pallier la pénurie potentielle se diffuse, cependant que les approches critiques de ces enjeux s'affirment de plus en plus². »

Cette angoisse d'une pénurie potentielle et d'une dépendance aux pays producteurs de produits pétroliers fait émerger de nouvelles préoccupations relatives à la réduction des dépenses énergétiques engendrées par le fonctionnement des constructions, particulièrement pour le chauffage³. L'économie d'énergie émerge comme une motivation primordiale, justifiant le recours à la conception bioclimatique et solaire passive pour ses intérêts économiques⁴. Celle-ci est systématiquement mise en avant dans les documents publiés et dans le discours des acteurs à partir de 1973.

La prise de conscience d'une nécessité d'économiser les énergies fossiles et de recourir à l'utilisation des énergies présentées comme « naturelles⁵ » en architecture n'est pas

1 G. Borasi, M. Zardini (dir.), *Désolé, plus d'essence. L'innovation architecturale et la crise pétrolière de 1973*, Mantoue/Montréal : Corraini/Centre Canadien d'Architecture, 2007, p. 54-67.

2 F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 289.

3 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 254 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

4 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 38.

5 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 7

véritablement nouvelle en 1973. Barber a mis en évidence qu'elle se manifeste déjà au sortir de la Seconde Guerre mondiale aux États-Unis¹. L'historien Kiel Moe affirme même que la date de 1973 ne marque aucun changement profond dans la prise en compte des énergies en architecture². Outre Givoni et Olgyay, certains architectes associés à la conception bioclimatique ont effectivement entamé leurs recherches avant 1973. C'est par exemple le cas de David Wright aux États-Unis, qui s'intéresse aux techniques solaires passives à gain indirect dès 1970³, ou des architectes du Groupe A.B.C. (Ambiances Bio-Climatiques en architecture) situé à l'école d'architecture de Marseille-Luminy, qui rédigent des études sur les maisons solaires dès 1971⁴. Si le souhait d'économiser les ressources fossiles en architecture est effectivement antérieur à 1973, le fait que cette préoccupation soit exposée et justifiée par elle-même l'intérêt de la conception bioclimatique et solaire passive est nouveau.

Dans les écrits de Victor et Aladár Olgyay que nous avons pu consulter, dont les plus tardifs datent de 1963, les économies d'énergie engendrées par la conception d'une construction suivant l'approche bioclimatique ne constituent en aucun cas le motif principal qui justifie le recours à cette méthode. L'argument présenté par Victor Olgyay en 1963 pour justifier sa méthode insiste sur l'objectif « d'établir un environnement intérieur qui se rapproche le plus des conditions de confort dans un environnement climatique donné⁵ » par le recours aux « possibilités naturelles pour améliorer les conditions sans l'aide d'un appareil mécanique⁶. » Son argument prend la forme d'un défi, qui consisterait à se passer des techniques de conditionnement mécanique de l'air grâce à une « méthode universellement applicable pour le contrôle climatique architectural⁷ », dont l'un des intérêts serait d'engendrer des économies d'énergies fossiles⁸. Bien qu'elle paraisse paradoxale, l'insistance sur l'universalité de cette

1 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 63-88.

2 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 11, 168.

3 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 70 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 P. Chiniara, J.-L. Izard, J.-P Long., *Étude d'une maison solaire*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 126.

6 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The aim in designing a structure thermally is to establish an indoor environment which most nearly approaches comfort conditions in a given climatic setting. In architectural terms this means that the planning and structure of a building should utilize natural possibilities to improve conditions without the aid of mechanical apparatus. »

7 *Ibid.*, p. 10. Traduction personnelle, citation originale : « A universally applicable method for architectural climate control »

8 *Ibid.*

méthode traduit l'ambition d'Olgyay, qui souhaite concevoir à partir des singularités climatiques et microclimatiques de chaque site. Sa motivation principale concerne la production de nouvelles formes régionales en architecture¹, qui justifie « l'approche bioclimatique du régionalisme architectural » présentée dans *Design with Climate*.

De même, dans les travaux sur la conception tropicale, l'économie d'énergie est intégrée à une motivation plus générale qui est d'effectuer des choix techniques rationnels compte tenu du climat et du microclimat des constructions, ainsi que des contraintes économiques qui existent dans les zones tropicales et qui limitent l'emploi de systèmes mécaniques de conditionnement d'air souvent coûteux². La motivation partagée par Ayoub, Dreyfus et même par Givoni est « l'exploitation rationnelle des éléments naturels de la climatologie et des propriétés thermiques des matériaux usuels³ », essentiellement appuyée sur la thermique du bâtiment. Il ne s'agit pas d'économiser de l'énergie, mais de contrôler naturellement et rationnellement les phénomènes thermiques. Le souhait de réaliser des économies d'énergies fossiles dans un bâtiment conçu suivant cette approche est une motivation secondaire, elle est subordonnée à une motivation principale qui est de déduire rationnellement et très précisément les choix constructifs et techniques à partir de l'étude d'un climat et d'un microclimat tropical. L'économie d'énergie peut ainsi être présentée comme une conséquence de l'approche rationnelle de la conception des bâtiments à partir du climat⁴.

III.1.1.2. Les effets du premier choc pétrolier et la diffusion des préoccupations énergétiques et environnementales

Alors que les économies d'énergies résultaient d'une conception thermiquement rationnelle des bâtiments dans les travaux des frères Olgyay, d'Ayoub, de Dreyfus ou de Givoni, le premier choc pétrolier marque un changement de perspective : ce sont les économies d'énergies elles-mêmes qui légitiment l'emploi de la conception bioclimatique et solaire passive en architecture. Cette différence est perceptible dans un numéro de la revue *Techniques & Architecture* consacré au « bon usage des énergies » et publié en 1977⁵. Parmi les

1 V. W. Olgyay, « A Rational Regionalism », in : V. Olgyay *et. al.* *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, *op. cit.*, p. XII-XIX.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 276.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 70.

4 *Ibid.*, p. 69.

5 *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*

contributeurs, on trouve de nombreux représentants de la conception bioclimatique comme Jean-Louis Izard, Alain Guyot, Roger Dabat, Jean-Pierre Cordier ou Georges et Jeanne-Marie Alexandroff. Ayoub est aussi invité à rédiger un article dans cette revue, en référence au numéro spécial qu'il avait rédigé en 1960 dans la même revue sur le « contrôle thermique naturel¹ » que nous avons déjà cité. Celui-ci est intitulé « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques² ». La différence entre le ton de son article et des articles rédigés par les architectes représentant la conception bioclimatique est notable et traduit des motivations divergentes, bien qu'ils partagent fondamentalement la même approche de la conception en architecture. Alors que certains auteurs écrivent en premier lieu que les « événements de ces dernières années ont posé le problème de la disponibilité des ressources énergétiques³ » et que d'autres insistent sur la « crise de l'énergie⁴ », Ayoub évoque en premier lieu les méfaits de l'industrialisation des techniques de construction initiée à la fin de la Seconde Guerre mondiale, ainsi que l'emploi abusif de matériaux légers et du verre⁵. Il écrit :

« Alors que les instituts de recherche du bâtiment livrent depuis 25 ans toutes les données nécessaires à l'optimisation du climat intérieur, les bâtiments modernes étalent, toujours davantage, des structures et des façades souvent en complète contradiction avec les principes les plus élémentaires, dont l'une des conséquences est la consommation excessive d'énergie⁶. »

S'il évoque « le problème de l'énergie⁷ », il affirme que celui-ci « est vieux comme le pétrole lui-même⁸ » mais qu'il est « l'occasion d'un retour à la raison⁹ » qui engage à revenir à des choix constructifs rationnels, donc économes en énergie. Cet écart entre l'argumentation d'Ayoub et celles des autres architectes montre bien que la motivation d'économiser les ressources fossiles consommées par les systèmes de chauffage et de climatisation est secondaire

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*

2 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 33-38.

3 R. Dabat, A. Guyot, J.-L. Izard, R. Perrin, « Architecture et climat », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 28.

4 J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 39.

5 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 33.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*

dans les travaux antérieurs au début des années 1970. À partir de 1973, elle est présentée comme une préoccupation principale qui suffit à justifier le recours à la conception bioclimatique. Cependant, l'ensemble de ces architectes et ingénieurs partageaient la même satisfaction intellectuelle à l'idée de concevoir avec le climat : les techniques solaires passives apparaissaient comme une évidence pour nombre d'entre eux.

Le souhait d'économiser les énergies fossiles apparaît comme une motivation essentiellement éthique à partir de 1973¹. Elle croise à ce titre d'autres motivations issues de la contre-culture en architecture, qui s'est diffusée à partir de la fin des années 1960 aux États-Unis puis en France. L'historienne Caroline Maniaque a réalisé une étude complète du développement de la contre-culture en architecture, du contexte intellectuel², ainsi que des conditions de sa diffusion en France³ par l'intermédiaire des écrits d'Ernst Friedrich Schumacher, d'Ivan Illich et de Jacques Ellul⁴. Entre le milieu des années 1960 et le début des années 1970, la contre-culture a contribué à propager des motivations politiques : le désir de produire un habitat autonome et rural, plus proche de la nature, à l'écart des systèmes énergétiques centralisés⁵, ainsi que le recours systématique aux « technologies douces⁶ » présentées comme simples, fiables et facilement appropriables. Les technologies douces, souvent artisanales et nécessitant peu de ressources, devaient permettre d'assurer l'autonomie des groupes et des individus dans un monde exposé à des crises environnementales (pollution, famine...). Elles étaient analogues aux « technologies appropriées⁷ » (ou T.A.) diffusées à la même période dans les pays en voie de développement⁸. Certaines de ces technologies encourageaient un mode de vie alternatif, concentré sur une gestion localisée des flux biogéochimiques⁹ (autonomie alimentaire, recyclage, aquaponie...).

-
- 1 A. Vignon, « Vers une société solaire ? Réflexions et expérimentations autour d'une transition énergétique potentielle dans les années 1968 » in : C.-F. Mathis, G. Massard-Guilbaud (dir.), *Sous le soleil. Systèmes et transitions énergétiques du Moyen-Âge à nos jours*, Paris : Éditions de la Sorbonne, (coll. Homme et Société), 2019, p. 343- 353.
 - 2 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 7-75.
 - 3 *Ibid.*, p. 77-111, 139-215.
 - 4 Entretien avec Jean-Paul Loubes, le 01/03/2021 (à distance).
 - 5 F. Lopez, *Le Rêve d'une déconnexion : De la maison autonome à la cité auto-énergétique*, op. cit., p. 11-12.
 - 6 J. Baldwin, S. Brand (éds.), *Soft-Tech*, Sausalito/Londres : The CoEvolution Quarterly/Penguin Books Ltd, 1978, 175 p.
 - 7 W. Rybczynski, *Paper Heroes. Un regard sur la technologie appropriée*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. de l'américain par H. Guillaud et W. Rybczynski, 1983, 158 p.
 - 8 A. Kirk, « Alloyed: Countercultural Bricoleurs and the Design Science Revival », p. 305-336 in : D. Kaiser, W. P. McCray (éds.) *Groovy Science: Knowledge, Innovation, and American Counterculture*, op. cit.
 - 9 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 135-141.

La promotion des technologies douces et appropriées a été très favorable à la diffusion des techniques solaires passives, qui étaient présentées comme plus simples, économiques et fiables que les techniques solaires actives¹, qui nécessitent « l'apport d'une énergie extérieure² » et sont jugées plus coûteuses, plus fragiles et moins efficaces³. Pour David Wright, l'utilisation des techniques solaires passives incite à privilégier l'action des phénomènes naturels par l'intermédiaire de systèmes simples et robustes : il affirme que « le concept d'un comportement solaire passif consiste à laisser la nature faire fonctionner nos installations avec le minimum d'interventions mécaniques⁴. » Pour d'autres architectes, le recours aux techniques solaires passives doit encourager « une réflexion plus large sur une conception architecturale tenant compte de l'éco-système à long terme⁵ ». L'attrait pour les technologies douces, appropriées ou passives, facilement comprises et reproductibles, s'explique aussi par ces motivations éthiques et politiques.

Parmi les publications relayant les préoccupations contre-culturelles en architecture, on trouve la revue britannique *Architectural Design*⁶. Un numéro publié en octobre 1973, contient un long dossier rédigé par Colin Moorcraft intitulé « Solar Energy in Housing⁷ » où sont entre autres présentés les travaux de Geiger, de Landsberg, de Victor Olgyay, de Givoni, de Trombe et de Hay. C'est, à notre connaissance, la première fois que ces travaux sont réunis et présentés dans une même publication très largement diffusée. Ce dossier rédigé par Moorcraft est divisé en plusieurs chapitres qui présentent d'abord l'étude des « facteurs bioclimatiques⁸ » et des « bases biologiques du confort⁹ », entre autres à partir des travaux de Geiger, de Landsberg, de Victor Olgyay et de Givoni¹⁰, puis un certain nombre de techniques solaires passives comme le mur Trombe-Michel, le système *Skytherm* et le système *Drumwall* de Baer, ainsi que les systèmes de captage direct et différents types de capteurs solaires à eau¹¹. Tous ces travaux sont

-
- 1 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit.
 - 2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 44.
 - 3 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 68 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 4 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 20.
 - 5 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 7. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 6 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit. p. 101-111.
 - 7 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *Architectural Design*, vol. XLIII, 10/1973, p. 634- 661.
 - 8 *Ibid.*, p. 635, 638.
 - 9 *Ibid.*, p. 636-637.
 - 10 *Ibid.*, p. 634-643.
 - 11 *Ibid.*, p. 652-661.

présentés à la lumière de « la véritable crise énergétique à laquelle est confrontée la majorité de la population mondiale¹ » en 1973 et sont considérés comme indispensables à la conception de bâtiments moins dépendants des énergies fossiles pour le chauffage et le rafraîchissement.

Moocraft a vraisemblablement été très inspiré par l'ouvrage *Design with Climate* de Victor Olgyay, publié dix ans plus tôt, et par les communications données au congrès international de l'UNESCO intitulé « Le Soleil au service de l'homme » et qui s'est tenu du 2 au 6 juillet 1973 à Paris². Bien qu'il s'en inspire, Moorcraft est cependant très critique des communications faites à ce congrès. Dans la lignée de la contre-culture et de nombreuses préoccupations du début des années 1970 relatives aux énergies alternatives³, il reproche que les recherches sur l'énergie solaire soient orientées vers les applications centralisées, complexes et coûteuses. Il écrit :

« Des sommes d'argent ridicules seront dépensées à centraliser puis à disperser une source d'énergie qui est dispersée en premier lieu, à transformer la chaleur en une bonne vieille électricité, puis à la retransformer en chaleur (ou, mieux encore, à l'utiliser pour enlever la chaleur des bâtiments⁴). »

Ce type de critique de l'organisation des systèmes énergétiques centralisés et complexes, qui obligerait à multiplier les conversions et qui générerait des pertes importantes, se retrouve dans de nombreux écrits d'architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive. L'architecte David Wright évoque par exemple dans une interview en 1976 le gaspillage engendré par le fait de « brûler du charbon à des températures excédant de 500 °C le seuil nécessaire pour produire de l'électricité, qui est transmise à gros frais au consommateur vers Phoenix ou Los Angeles pour faire de l'eau chaude à 60 °C⁵ ». Ce type de critique reflète également une défiance générale à l'égard des politiques énergétiques centralisées engagées par les États et les organismes officiels, notamment relatives à l'énergie nucléaire. L'architecte

1 *Ibid.*, p. 634. Traduction personnelle, citation originale : « the real energy crisis which faces the majority of the world's population. »

2 *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind*, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne)

3 F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 301.

4 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », op. cit., p. 634. Traduction personnelle, citation originale : « Ludicrous sums of money will be spent centralising and then dispersing a source of energy that is dispersed in the first place, and turning heat into good ole electricity and then turning it back into heat (or, even better, using it to remove heat from buildings). »

5 « Entretien avec David Wright », p. 89 in : P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit.

Georges Alexandroff affirme que le désir de développer l'utilisation de l'énergie solaire en France « allait de pair avec une contestation de l'État, une contestation du nucléaire¹. » Le rejet de l'énergie nucléaire n'est cependant pas propre aux acteurs de la conception bioclimatique et était partagé par les nombreux mouvements écologistes de l'époque², pour des raisons parfois erronées³.

Par opposition à cette idéologie de centralisation et de complexification des systèmes énergétiques, Moorcraft défend en 1973 les applications simplifiées et facilement accessibles de l'énergie solaire, à l'opposé des techniques employées dans certaines maisons solaires actives qu'il présente comme coûteuses⁴. Il affirme que « le confort n'est pas un luxe⁵ » et que l'inconfort, le froid notamment, tue de nombreuses personnes en Grande-Bretagne⁶. Selon lui « [les] personnes qui ont le plus besoin de chaleur hivernale sont emprisonnées dans de vieux logements à bas prix⁷ » et la « réhabilitation solaire⁸ » des logements les plus modestes permettrait de remédier à cette forme de précarité énergétique. C'est pourquoi Moorcraft souhaite présenter des « méthodes plus simples et plus efficaces de contrôle climatique applicables aux logements existants⁹. » Ces méthodes s'appuient sur la compréhension des phénomènes climatiques et microclimatiques, ainsi que l'utilisation des diagrammes solaires et bioclimatiques. Elles permettent de dépasser la pratique habituelle des architectes qui tend selon lui à « simplifier à l'extrême les facteurs bioclimatiques, à minimiser le rôle de la structure du bâtiment dans le contrôle climatique et à survaloriser le besoin de méthodes de contrôle climatique consommatrices d'énergie¹⁰. »

1 C. Le Besco, « Les Hommes du solaire : Interview de Georges Alexandroff », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 66, juin 1979, p. 74.

2 F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, *op. cit.*, p. 299-300 ; F. Lopez, *Le Rêve d'une déconnexion : De la maison autonome à la cité auto-énergétique*, *op. cit.*, p. 11-12.

3 Pour prendre un exemple, dans un entretien donné à la revue *Le Sauvage* en 1976, l'écrivain Denis de Rougemont affirme qu'il sera nécessaire de « construire une centrale nucléaire tous les 12 km » afin de répondre à l'intégralité des besoins énergétiques français dans les années 2000. Voir : D. De Rougemont, « Mort des États-nations, naissance des régions à géométrie variable », *Le Sauvage*, « La Maison écologique », *op. cit.*, p. 14.

4 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *op. cit.*, p 635.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The people who need winter warmth most are trapped in old low cost housing ».

8 *Ibid.*

9 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « simpler, more effective methods of climate control-methods applicable to existing housing. »

10 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « to oversimplify bioclimatic factors, to minimise the role of building structure in climate control and to over-emphasise the need for energy-consuming methods of climate control. »

On retrouve dans cet article de Moorcraft les principales caractéristiques des manuels sur la conception bioclimatique qui seront publiés par la suite : l'enjeu est à la fois de sensibiliser aux économies d'énergie, mais aussi de diffuser des connaissances techniques et scientifiques, afin que la compréhension des phénomènes thermiques et climatiques soit appropriée par le plus grand nombre. L'économie des énergies fossiles doit passer par une meilleure connaissance de l'énergétique. Cette motivation pédagogique est caractéristique des architectes sensibles aux enjeux de la contre-culture¹. Elle rejoint le souhait partagé par l'ensemble des concepteurs de favoriser les applications directes de l'énergie solaire, qui sont plus facilement compréhensibles, minimisent les conversions et permettent d'utiliser directement la chaleur, qui est une forme d'énergie dégradée.

III.1.1.3. La publication de *La Face cachée du soleil* en France

En France, l'ensemble de ces préoccupations se retrouve dans la première publication qui introduit et popularise la conception bioclimatique en architecture² : il s'agit de *La Face cachée du soleil* publiée en 1974 par Frédéric Nicolas, Marc Vaye et Jean-Pierre Traisnel sous le pseudonyme des « Bricolo Lézardeur ³ ». Cette publication constitue le diplôme d'architecture de Vaye et Traisnel, étudiants à l'Unité Pédagogique 7⁴, tandis que Nicolas présentera son diplôme intitulé *Vers une architecture bioclimatique* en 1976⁵. Elle fait suite à une première publication qu'ils ont rédigée ensemble sur l'auto-construction en 1972 et au voyage de Vaye et Nicolas dans le sud-ouest des États-Unis où ils ont notamment rencontré Baer⁶.

La Face cachée du soleil prend la forme d'une bande dessinée auto-éditée⁷, inspirée des revues alternatives de l'époque⁸. Elle utilise un ton ludique et de nombreuses illustrations détournées, dans l'esprit des revues écologistes comme *Le Sauvage*, *L'Affranchi* ou *La Gueule ouverte*, très populaires durant cette période⁹. L'ouvrage fut republié à de nombreuses reprises

1 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 2.

2 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 34.

3 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye (Bricolo Lézardeur), *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, Paris : Bricolo-Lézardeur, 1974, 73 p.

4 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 173.

5 *Ibid.*, p. 179.

6 *Ibid.*, p. 173.

7 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 13/06/2019 à Paris.

8 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 173.

9 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 33 ; Entretien avec Bernard Banyuls, le 19/06/2019 à Perpignan.

et diffusé à au moins 36 000 exemplaires¹. Il traite essentiellement de l'utilisation directe de l'énergie solaire en architecture sur un ton particulièrement militant, critique des enjeux politiques liés à l'exploitation des énergies fossiles et nucléaires, mais aussi de l'appropriation commerciale de l'énergie solaire². Largement inspirés de l'article de Moorcraft évoqué précédemment, les auteurs y abordent successivement « les facteurs bioclimatiques³ », « les bases biologiques du confort⁴ », l'étude du rayonnement solaire et des microclimats, dans le but de remettre en pratique un contrôle climatique qui tienne compte « des contraintes microclimatiques locales⁵ » et des « différents niveaux de réponse⁶ » possibles. La seconde partie présente un certain nombre de systèmes de captage (mur Trombe, système *Drumwall*, capteurs plans, capteurs à concentration, chauffe-eau solaire⁷...). Elle est largement inspirée de l'ouvrage de Farrington Daniels intitulé *Direct Use of the Sun's Energy* publié en 1964⁸.

Dans *La Face cachée du soleil*, ce sont essentiellement les motivations contre-culturelles et les impératifs imposés par la crise de l'énergie, présentée comme « la crise du pétrole⁹ », qui justifient l'intérêt d'analyser les facteurs bioclimatiques et les microclimats en vue de la réalisation de constructions économes. On peut lire qu'il « est nécessaire de comprendre les facteurs bioclimatiques avant de choisir les techniques de contrôle climatique¹⁰ », de sorte que « le climat intérieur soit dérivé du climat extérieur¹¹ ». L'énergie solaire est présentée comme « une énergie inépuisable¹² » et « utilisable dans les meilleures conditions dans les régions où vivent 70 % de la population du globe¹³ ». Vaye, Traisnel et Nicolas affirment également que cette énergie « a des propriétés qui la prédispose à une utilisation sur place, une utilisation directe¹⁴ », d'où l'importance de l'ouvrage de Daniels sur

1 A. Vrignon, « Vers une société solaire ? Réflexions et expérimentations autour d'une transition énergétique potentielle dans les années 1968 », *op. cit.*, p. 345. Caroline Maniaque donne le chiffre de 50 000 exemplaires, voir : *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, *op. cit.*, p. 173-181.

2 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, *op. cit.*, p. 5-6.

3 *Ibid.*, p. 11.

4 *Ibid.*, p. 13-16.

5 *Ibid.*, p. 10.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*, p. 30-72.

8 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, *op. cit.*

9 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, *op. cit.*, p. 5.

10 *Ibid.*, p. 11.

11 *Ibid.*

12 *Ibid.*, p. 7.

13 *Ibid.*

14 *Ibid.*

l'utilisation directe de l'énergie solaire dont ils reproduisent de nombreux systèmes¹. Ce type de discours est partagé par de nombreux promoteurs des énergies alternatives à l'époque².

Comme Moorcraft avant eux, Vaye, Traisnel et Nicolas insistent sur la nécessité de comprendre certains modes de transmission de la chaleur afin de réaliser des économies de chauffage. Ils présentent notamment le phénomène de rayonnement infrarouge, qui est généralement négligé dans la pratique conventionnelle du chauffage³. Ce fait est aussi évoqué par Moorcraft en 1973⁴ et on trouve dans *La Face cachée du soleil* des passages directement traduits de son article, sans qu'ils soient cités⁵, comme celui qui indique que « les relations du corps avec la chaleur rayonnante sont ignorées⁶ » tandis que « les propriétés rayonnantes du climat externe sont négligées⁷ ». En prenant en compte ce phénomène et l'émissivité des surfaces, l'emploi des techniques de captage indirect avec inertie (mur Trombe, système *Drumwall*) qui chauffent essentiellement par rayonnement de grande longueur d'onde est indirectement légitimé⁸.

En plus de valoriser les techniques solaires passives, la compréhension de ce phénomène permet de remettre en cause les systèmes de chauffage électrique conventionnels, qui servent essentiellement à chauffer l'air par des « convecteurs qui remplacent les radiateurs⁹ ». Vaye, Traisnel et Nicolas affirment que « [ces] types de nouvelles techniques dévorent des kWh¹⁰ » et « assurent la base nécessaire d'une consommation maximum d'électricité rentabilisant et justifiant du même coup la création des centrales nucléaires¹¹ ». Cette critique de l'électrification du chauffage des habitations est courante chez les acteurs de la conception bioclimatique : l'architecte Jean-Louis Izard affirme en 1979 que la multiplication des systèmes de chauffage électrique « pompe l'énergie du réseau en période de demande de pointe¹² » et justifie par la même le programme nucléaire français, alors que les centrales nucléaires ont selon

1 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, op. cit.

2 F. Jarrige, A. Vignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 301.

3 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 11.

4 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », op. cit., p. 635.

5 Cette pratique de recopiage était particulièrement courante à l'époque dans les publications de la contre-culture. Des phrases, des illustrations ou des photographies sont souvent reproduites sans mentionner leur auteur.

6 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 11.

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*, p. 27.

9 *Ibid.*, p. 16.

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*

12 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 91.

lui « un rendement global dérisoire¹ ». Il conclut par le fait que l'idéologie de gaspillage engendrée par ce système « est assez éloignée philosophiquement de celle qui sous-tend le bioclimatisme en architecture². »

III.1.1.4. Popularité et désintérêt progressif pour la conception bioclimatique

À partir du milieu des années 1970, l'intérêt pour ces sujets est croissant et se diffuse bien au-delà du cercle des architectes et des ingénieurs grâce à ces publications. Il fédère de nombreux acteurs, qu'ils soient scientifiques ou simples curieux préoccupés par les enjeux énergétiques. La conception bioclimatique est présentée dans *Le Catalogue des ressources* en 1975³, qui regroupe toutes les publications et les associations françaises susceptibles d'aider à la mise en place d'un mode de vie autonome et alternatif, dans l'esprit du *Whole Earth Catalog* américain publié à partir de 1968⁴. L'ambition encyclopédique des différentes éditions du *Whole Earth Catalogue* ou du *Catalogue des ressources* en France traduit le souhait de diffuser l'ensemble des connaissances utiles disponibles dans tous les domaines, de la psychologie à l'ingénierie en passant par les techniques de l'information et l'agriculture biologique. Dans le domaine des énergies alternatives, l'exposition *Énergies libres !* présentée au Musée des Arts Décoratifs en 1976 rassemble quelques techniques solaires passives, comme le système *Skytherm* ou le mur Trombe-Michel⁵. Cette exposition, dont le catalogue est illustré par les *Chroniques de l'énergie solaire* du dessinateur Jean-Marc Reiser, passe en revue différentes « technologies alternatives⁶ » relatives à l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et chimique. Elle promeut auprès du public la facilité d'appropriation des techniques solaires passives, face au péril de « l'épuisement rapide des produits d'extraction⁷ ».

Aux États-Unis, un consultant spécialisé dans le domaine de l'énergie du nom de Wilson Clark publie en 1974 une étude complète de la politique énergétique américaine où il alerte sur l'urgence de la situation⁸. Il présente les travaux des frères Olgyay, de Baer et de Hay à la

1 *Ibid.*, p. 91.

2 *Ibid.*

3 *Le Catalogue des Ressources. Volume I : Nourriture, vêtement, transports, habitat*, Paris : Parallèles, 1975, p. 173-176.

4 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 179-180.

5 Centre de Création Industrielle/Centre Georges Pompidou, *Énergies libres !*, Paris : CCI/Centre Georges Pompidou, 1976, p. 35-38.

6 *Ibid.*, p. 3.

7 *Ibid.*

8 W. Clark, *Energy for Survival: The Alternative to Extinction*, New York : Anchor Press/Doubleday, 1974, 652 p.

lumière des enjeux énergétiques internationaux et des perspectives offertes par l'utilisation de l'énergie solaire¹. Cette période est marquée par un intérêt croissant de la population américaine pour l'utilisation domestique de l'énergie solaire : près de 150 maisons solaires passives et actives sont construites aux États-Unis durant la seule année 1975². Quelques architectes américains, déjà sensibilisés par ces problématiques au début des années 1970, entament la rédaction d'ouvrages et de manuels sur la conception solaire passive. Baer, dont les premières expérimentations remontent au milieu des années 1960, publie l'ouvrage *Sunspots* en 1975 qui détaille ses différentes inventions³. Préoccupé par l'inquiétante baisse des ressources fossiles et par le développement de l'énergie nucléaire, il affirme qu'il « est important pour nous de trouver de nouvelles façons de chauffer et de refroidir les bâtiments⁴ » et met en scène les luttes politiques sur l'appropriation de l'énergie solaire sous la forme de courtes fictions⁵.

Baer est également sensible aux changements de carrières de nombreux physiciens initialement formés à la chimie ou à la physique nucléaire, qui se sont investis dans le développement de l'énergie solaire à partir d'une prise de conscience du potentiel de cette énergie en substitution des énergies fossiles. Yellott mais aussi Daniels, qui a notamment travaillé sur la première bombe atomique américaine⁶, ont consacré leur carrière au développement des techniques de captage solaire dès le début des années 1950. Douglas Balcomb, anciennement ingénieur dans le domaine de la physique nucléaire, se consacre à partir de 1976 à l'analyse des techniques solaires passives et au développement des méthodes de calcul au LASL⁷. C'est aussi le cas de Peter van Dresser (1908-1983), qui était initialement ingénieur et spécialisé dans le domaine des moteurs de fusée⁸. Il s'est passionné pour la conception de chauffe-eau solaires dès les années 1930 en Floride et a testé de nombreuses techniques solaires actives et passives de chauffage dans la région de Santa Fe, à partir de la fin

1 *Ibid.*, p. 506-510, 577.

2 W. Shurcliff, *Solar Heated Building: A Brief Survey*, [11ème éd.], Cambridge : auto-édition, novembre 1975, p. 1.

3 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, *op. cit.*

4 *Ibid.*, p. 21. Traduction personnelle, citation originale : « Today it is important for us to find new ways to heat and cool buildings, new ways to move about, less extravagant ways to enjoy ourselves. »

5 *Ibid.*, p. 6.

6 S. Baer, « Harold Hay's influence on Zomeworks Corporation », p. 36 in : M. McDonald, C. Dayer (éds.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, *op. cit.*

7 K. Haggard, « A clear sky story on the evolution of passive solar design. The source and multiple applications of Harold Hay's roof pond system », p. 29-30 in : M. McDonald, C. Dayer (éds.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, *op. cit.*

8 L. Kallipoliti, *The Architecture of Closed Worlds, or, What is the Power of Shit?*, Zurich : Lars Müller Publishers/Storefront for Art and Architecture, 2018, p. 168.

des années 1950¹. En France, l'ingénieur Pierre Lavigne a opéré un changement de carrière analogue : d'abord ingénieur dans le domaine du nucléaire et titulaire d'un doctorat en thermodynamique, il prend conscience des problématiques énergétiques et se consacre à l'auto-construction de maisons solaires, ainsi qu'à la promotion de la conception bioclimatique à partir du milieu des années 1970². Ses travaux ont fait autorité et continuent d'être diffusés aujourd'hui³.

À partir de 1976, la majorité des acteurs considèrent la conception bioclimatique et solaire passive sous l'angle des économies d'énergie qu'elle peut engendrer. De nombreuses conférences sont spécifiquement consacrées à la conception solaire passive aux États-Unis. En France, les bases de la conception bioclimatique et différentes réalisations sont diffusées dans les *Bulletins d'information inter-établissements*, des publications spécifiques aux écoles d'architecture⁴, et de nombreux diplômes d'étudiants y sont consacrés. Plusieurs laboratoires de recherche travaillent sur ces sujets dans les écoles d'architecture en France : c'est le cas du groupe Ambiances Bio-Climatique en architecture (Groupe A.B.C.) à Marseille, du Laboratoire d'Architecture Bioclimatique (L.A.B.) à Toulouse et du CERMA (Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture) à Nantes. La conception bioclimatique est également présentée dans les revues d'architecture⁵ et les revues écologistes très diffusées dans les milieux alternatifs comme *Le Sauvage* ou *L'Affranchi* en France⁶. Plus largement, l'opinion publique est globalement enthousiaste à l'idée d'utiliser l'énergie solaire pour le chauffage domestique⁷. Bien qu'elle ne permette pas de réaliser l'autonomie énergétique d'une habitation, la conception bioclimatique est présentée comme l'un des moyens de réaliser une maison autonome⁸. Elle paraît s'être largement diffusée dans les milieux alternatifs prônant l'auto-construction⁹. À partir de travaux américains¹⁰, quelques acteurs français associés à la conception bioclimatique proposent de prendre en compte la consommation d'énergies fossiles induite dans le processus

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 82-83.

2 Entretien avec Marie-François Lavigne, le 24/04/2019 à Die.

3 P. Fernandez, P. Lavigne, *Concevoir des bâtiments bioclimatiques. Fondements & méthodes*, op. cit.

4 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 179-180.

5 *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit. ; *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit.

6 D. Simonnet, « Inventaire des maisons écologiques », *Le Sauvage*, « La Maison écologique », op. cit., p. 48-67.

7 P. Bouet, « Le mur Trombe », p. 259 in : F. Jarrige, A. Vrignon, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit.

8 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 70-72.

9 M. Sené, *Archi-libre, ou la transgression dans l'art de bâtir*, Paris : Le Moniteur (coll. Construire autrement), 1981, p. 110-114.

10 D. Simonnet, « Inventaire des maisons écologiques », *Le Sauvage*, « La Maison écologique », op. cit., p. 54.

de fabrication des matériaux¹, ce qui les amène à revaloriser des matériaux comme la terre crue², qui est mise à l'honneur lors d'une importante exposition intitulée *Des Architectures de terre* au Centre Pompidou au début des années 1980³.

À la fin des années 1970, la conception bioclimatique apparaît comme synonyme de l'utilisation « des énergies naturelles dans l'habitat⁴ » et de réduction des besoins de chauffage et de rafraîchissement. Elle est indissociable des préoccupations qui caractérisent cette période de grande popularité des énergies alternatives, comme le rappellent Jarrige et Vrignon :

« À bien des égards, les années 1970 occupent une place à part dans l'histoire des énergies renouvelables et alternatives. Dans le contexte du tournant environnemental, des chocs pétroliers et de la hantise plus générale d'un épuisement global des ressources terrestres, ces modes de production d'énergie – en premier lieu le solaire – suscitent un intérêt, voire un engouement, rarement observé jusqu'alors de la part des pouvoirs publics, de l'opinion et dans certaines sphères militantes⁵. »

Cet engouement pour les énergies alternatives signalé par Jarrige et Vrignon est parfois excessif chez certains ingénieurs et architectes associés à la conception bioclimatique. L'idéologie selon laquelle l'énergie solaire serait « gratuite et propre⁶ » comme l'affirment les auteurs de *La Face cachée du soleil* et tant d'autres, ou que les « calories gratuites⁷ » fournies par le soleil seraient utilisables sans surcoûts en est un exemple. Certains ingénieurs, comme Chareyre, ont ainsi tempéré cet engouement en rappelant que « les doubles vitrages et les volets isolants sont coûteux, de même que la masse thermique⁸ ». Il semblerait que cet enthousiasme pour les techniques solaires passives, parfois présentées comme des solutions miracles après le premier choc pétrolier, ait paradoxalement été l'un des principaux freins à la diffusion de la conception bioclimatique par les publications et les manuels.

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 3-4.

3 J. Dethier, « Le Génie de la terre », p. 12-15 in : Centre de Création Industrielle/Centre Georges Pompidou, *Des Architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire*, Paris : CCI/Centre Georges Pompidou, 1981.

4 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Intégration des énergies naturelles à l'habitat*, 2 tomes, rapport pour le Plan Construction, Ministère de l'Équipement, 1978, 194 + 171 p. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

5 F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 294.

6 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 7.

7 J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », p. 36.

8 R. Chareyre, *La Maison autonome*, n°2, op. cit., p. 11.

Malgré un contexte culturel favorable, l'attrait de la conception bioclimatique et plus généralement pour l'utilisation des énergies alternatives est de courte durée. De nombreux acteurs français signalent une baisse d'intérêt pour ces sujets à partir du début des années 1980, notamment liée à l'élection de François Mitterrand, qui entraîne la disparition des revues alternatives très populaires comme *Le Sauvage*, qui avait contribué à la diffusion de la conception bioclimatique et des constructions solaires passives dès 1976¹. D'autres facteurs, comme la pression exercée par EDF sur les pouvoirs publics², le développement du programme nucléaire français³ ou le contre-choc pétrolier⁴ sont également évoqués. Alors que la France est considérée comme « en avance, par rapport aux autres pays européens⁵ » sur le développement des énergies alternatives et la conception bioclimatique des bâtiments, la majorité des programmes de recherche qui y sont consacrés sont abandonnés.

Cette baisse d'intérêt est aussi signalée par les acteurs américains aux États-Unis, pour des raisons essentiellement politiques qui tiennent à l'arrivée au pouvoir de Ronald Reagan en 1981⁶. Du point de vue des historiens, « il est certain que les années 1980 sont marquées par un recul général des énergies alternatives, en termes de recherche comme d'application sur le terrain⁷. » La fermeture de la centrale solaire thermodynamique *Thémis* d'Odeillo-Font-Romeu en 1986, perçue comme « un symbole de l'échec des énergies alternatives⁸ » en France, acte ce recul et le désintérêt pour l'énergie solaire⁹. Cependant, les motivations propres aux architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique et solaire passive seront relativement indifférentes à cette baisse d'intérêt et de soutien public¹⁰.

Le premier choc pétrolier a été l'occasion d'une prise de conscience brève mais généralisée de la dépendance des économies des pays développés aux ressources fossiles. Cet événement et les débats qu'il a engendrés ont stimulé l'intérêt pour la conception bioclimatique et les techniques solaires passives. La décennie 1973-1983 est marquée par la prolifération de

1 Entretien avec Bernard Banyuls, le 19/06/2019 à Perpignan.

2 Entretien avec Mimi Tjoyas et David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan ; Entretien avec Bernard Banyuls, le 19/06/2019 à Perpignan.

3 *Ibid.* ; F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 304-305.

4 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 13/06/2019 à Paris.

5 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 36.

6 J. Reynolds, « The Roots of Bioclimatic Design », in : V. Olgyay et al., *Design with Climate*, op. cit., p. XI ; Entretien avec David Wright, le 15, 16 et 17/01/2020 (à distance).

7 F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 304.

8 *Ibid.*, p. 306.

9 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 24/06/2019 à Paris.

10 Entretien avec Bernard Banyuls, le 19/06/2019 à Perpignan.

publications relatives à ces sujets et par une large diffusion des connaissances relatives aux microclimats et aux techniques que nous avons présentées dans notre deuxième partie. Parmi ces publications, les manuels ont été les principaux vecteurs de diffusion de la conception bioclimatique chez les architectes et les ingénieurs, mais aussi chez les particuliers et les auto-constructeurs intéressés par cette méthode de conception. Il importe de détailler le rôle de ces publications conçues pour promouvoir cette méthode de conception, afin de comprendre la nature des connaissances techniques qu'elles ont permis de diffuser.

III.1.2. Promouvoir et diffuser la conception bioclimatique par les manuels

III.1.2.1. Le problème de la diffusion des connaissances relatives à la conception bioclimatique et l'impact négatif des motivations environnementales

Avant d'entrer dans le détail des manuels, il faut comprendre la caractéristique des connaissances techniques qu'ils ont permis de diffuser, qui permet d'expliquer pourquoi ces connaissances ont été facilement appropriées par des non-spécialistes, alors même qu'elles concernaient parfois des phénomènes relativement complexes. Le problème de la nature des connaissances techniques a été étudié par l'historien Bertrand Gille qui a montré qu'elles pouvaient prendre plusieurs formes, mais n'a pas mis en évidence la singularité de ce type de connaissance¹. On doit à Simondon une définition satisfaisante de ce qui caractérise une connaissance comme essentiellement technique. Il affirme qu'une connaissance technique décrit une structure permettant de réaliser une opération déterminée². Cette opération sert une action finalisée, elle est tournée vers la réalisation d'un but désiré par la production d'un effet anticipé. Une connaissance technique diffère d'une connaissance scientifique car elle résume une méthode pour atteindre un but, indépendamment de la connaissance intrinsèque des phénomènes qu'elle mobilise qui peut être ignorée, au moins provisoirement. Comme le note très justement Gille, un garagiste n'a pas besoin de connaître les travaux de Beau de Rochas sur le cycle à quatre temps pour savoir réparer un moteur à explosion défaillant³, de même qu'une

1 B. Gille, « Essai sur la connaissance technique », p. 1416-1477 in : B. Gille (dir.), *Histoire des techniques*, op. cit.

2 G. Simondon, « Épistémologie de la cybernétique », *Sur la philosophie (1950-1980)*, Paris : PUF, 2016, p. 186.

3 B. Gille, « Essai sur la connaissance technique », p. 1424 in : B. Gille (dir.), *Histoire des techniques*, op. cit.

recette de cuisine, qui constitue une connaissance technique très élémentaire¹, fait l'impasse sur la physique des colloïdes ou la composition chimique de l'albumine.

Cette caractéristique des connaissances techniques explique que la compréhension des techniques solaires passives et des phénomènes microclimatiques ne nécessite pas le recours aux travaux de Ludwig Boltzmann ou de James Clerk Maxwell, mais mobilise essentiellement l'explication de l'action possible de ces techniques sur le microclimat. Si les phénomènes de conduction, rayonnement et convection sont présentés dans les manuels sur la conception bioclimatique, c'est en tant qu'ils peuvent être facilement modifiés par certaines techniques solaires passives et constituent autant de facteurs à contrôler. Le but de ces manuels est de communiquer toutes les connaissances qualitatives nécessaires à la conception bioclimatique, en montrant quantitativement les effets microclimatiques et thermiques qui peuvent être induits par des choix techniques déterminés². Le fait de fournir des résultats chiffrés, même approximatifs, permet de montrer l'efficacité d'un choix technique et donne une estimation des effets thermiques ou microclimatiques qu'il est possible d'obtenir. À la lecture d'un manuel sur la conception bioclimatique, le concepteur doit être en mesure d'anticiper les effets qu'il souhaite produire et de les quantifier approximativement par des calculs élémentaires.

Mais cette exigence de quantification ou d'estimation s'est parfois paradoxalement heurtée à l'engouement pour la conception bioclimatique et les techniques solaires passives provoqué par le premier choc pétrolier. Certaines de ces techniques ont été diffusées sans que leurs performances réelles ne soient connues et elles étaient présentées comme des solutions susceptibles d'être mises en œuvre sans études préalables. Ce problème a été signalé dès la fin des années 1970. Chareyre regrette par exemple que certains manuels soient « trop généraux³ », présentent « trop de maisons sans donner des indications pratiques⁴ » et ne débouchent pas sur des « applications concrètes pour ceux qui ne sont ni ingénieurs ni thermiciens⁵. » À propos d'autres publications, il critique le fait que les performances du mur Trombe-Michel soient présentées avec « le flou habituel⁶ » qui selon lui « risque de nuire à cette technique⁷. » La crainte de Chareyre était justifiée : le manque de publications de référence et de données sur les

1 *Ibid.*, p. 1428.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 36-37.

3 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 43.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 91.

7 *Ibid.*

performances réelles du mur Trombe a limité la diffusion de cette technique jusqu'au milieu des années 1970¹.

Il existe donc une tension entre la volonté de diffuser les techniques solaires passives par l'intermédiaire des manuels afin qu'elles soient appropriées par le plus grand nombre, et le fait de transmettre des connaissances techniques suffisamment robustes et crédibles qui permettent de justifier de l'efficacité de ces techniques. L'engouement pour les énergies alternatives porté par les motivations environnementales et contre-culturelles après le premier choc pétrolier a vraisemblablement précipité la diffusion de certaines techniques solaires passives², alors même que nombre d'entre elles faisaient encore l'objet de recherches afin d'être améliorées ou n'existaient qu'à l'état de prototypes. Ce problème concernait surtout les premières publications diffusées à partir de 1973, qui manquaient généralement de chiffres et de précision³. Les manuels sur la conception bioclimatique publiés par la suite et plus largement diffusés évitaient cet écueil : on y trouve de nombreux résultats sur les techniques solaires passives ainsi qu'une exigence de quantification par l'intermédiaire des calculs thermiques. Ces publications synthétisent des connaissances essentiellement techniques et ont été les principaux vecteurs de diffusion de la conception bioclimatique.

III.1.2.2. Synthétiser et transmettre des connaissances scientifiques et techniques

Les manuels dédiés à la conception bioclimatique avaient deux fonctions distinctes mais complémentaires : ils devaient synthétiser un ensemble de connaissances sur les microclimats, les climats et les phénomènes thermiques, mais aussi proposer une méthode de conception pour déduire des choix techniques et architecturaux dans le but de produire un microclimat habitable grâce aux techniques solaires passives. Historiquement, les premiers manuels qui ont été diffusés et utilisés étaient essentiellement des synthèses de connaissances sur les phénomènes thermiques, les applications de l'énergie solaire ou le confort thermique des constructions. L'intérêt pour ces ouvrages synthétiques était stimulé par les motivations contre-culturelles, qui valorisaient la diffusion des connaissances techniques appropriables considérées comme nécessaires à l'autonomie des individus et des groupes. Le *Whole Earth Catalog* et Le

1 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 32-33.

2 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 278.

3 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 43.

Catalogue des ressources ont l'ambition encyclopédique de regrouper toutes les publications de référence couvrant tous les sujets (alimentation, énergie...). Les ouvrages synthétiques étaient considérés comme un moyen de se réappropriier des connaissances méconnues, possédées par des spécialistes (chimistes, ingénieurs, climatologues...) ou séparées entre plusieurs disciplines. Ces publications synthétiques, qui préfigurent les manuels sur la conception bioclimatique publiés dans la seconde moitié des années 1970, devaient permettre de « [créer] un nouveau rapport à la technique plutôt qu'une nouvelle technique¹ », selon l'expression de Chareyre, en encourageant la réappropriation de connaissances techniques spécialisées. En ce sens, ils servaient à « [démystifier] le savoir des spécialistes² » en permettant au lecteur motivé d'assimiler progressivement des connaissances scientifiques et techniques fiables et directement utilisables³.

Parmi ces publications synthétiques, on trouve l'ouvrage de Dreyfus sur *Le Confort dans l'habitat en pays tropical* publié en 1960, qui est considéré comme la première étude exhaustive sur les relations entre climats et architecture et qui regroupe l'intégralité des connaissances relatives aux climats et aux phénomènes thermiques d'une manière très détaillée⁴. Bien qu'il soit excessivement complexe, il a été une base de travail pour certains architectes : Givoni reprend une partie des travaux de Dreyfus dans *Man, Climate and Architecture* publié en 1969 qui constitue une référence incontournable à l'époque. Les premiers écrits d'Ayoub ont également été utilisés puisqu'on y trouve des procédures assez simples pour dimensionner géométriquement les protections solaires⁵. Bien qu'il présente une méthode de conception bien plus aboutie que l'ensemble de ces travaux, l'ouvrage *Design with Climate* de Victor Olgyay publié en 1963 ne semble avoir connu qu'une utilisation marginale entre les années 1960 et le début des années 1970. Les recherches d'Olgyay seront redécouvertes au début des années 1970 par différents acteurs américains et britanniques, comme Moorcraft.

En l'absence de publications sur les techniques solaires passives, les principales connaissances sur les applications directes de l'énergie solaire pour le chauffage et le rafraîchissement des constructions ont été diffusées par l'ouvrage *Direct Use of the Sun's*

1 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 2.

2 *Ibid.*

3 Ce problème est particulièrement bien illustré dans l'ouvrage de Robert Chareyre sur *La Maison autonome* qui contient de nombreuses bibliographies commentées et recommande les ouvrages scientifiques les plus complets et accessibles. Voir : R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 131.

4 J.-L. Izard, « Préface », p. 17 in : B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit.

5 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 24/06/2019 à Paris.

Energy publié en 1964 par Daniels¹. Jusqu'à la fin des années 1970, ce traité sur l'utilisation directe de l'énergie solaire est resté la synthèse la plus complète des différentes techniques de captage et de conversion de l'énergie solaire, qui n'étaient connues que des professionnels ou des chercheurs sur le sujet avant 1964. Il détaille très précisément la fabrication de différents capteurs solaires (plan, à concentration...) de manière didactique. Ce traité, traduit en plusieurs langues, a eu un succès considérable aux États-Unis où il a été régulièrement réédité : Baer écrit en 1968 dans le *Whole Earth Catalog* qu'il « a changé sa vie et sa manière de penser² ». Il constitue une des sources principales pour les auteurs de *La Face cachée du soleil*, qui souhaitaient initialement le traduire en français³.

Ces différentes publications ont pu servir de manuels provisoires pour les architectes et les ingénieurs soucieux de concevoir à partir du climat. La réédition de *Man, Climate and Architecture* de Givoni en 1976 (publié pour la première fois en 1969), accompagnée de nouveaux chapitres consacrés aux « énergies naturelles⁴ » rédigés à la suite du premier choc pétrolier, constitue la première publication importante depuis les ouvrages de Dreyfus et d'Olgyay. À la fois médecin, architecte et directeur du département de climatologie des constructions au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa, Givoni présente avec érudition l'essentiel des facteurs relatifs au confort thermique des individus⁵. Son ouvrage introduit à l'intégralité des connaissances nécessaires à la conception bioclimatique et il constitue, encore aujourd'hui, une des études les plus abouties sur le confort thermique, avec les travaux plus tardifs du danois Povl Ole Fanger⁶. S'il n'évoque que très rapidement l'étude des microclimats, Givoni propose une bonne introduction à la climatologie et à la prise en compte de la géométrie du rayonnement solaire et apporte de nombreuses améliorations aux diagrammes bioclimatiques d'Olgyay⁷. Enfin, cet ouvrage synthétise les expérimentations menées au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa qui ont permis d'établir des résultats très importants, comme ceux relatifs à l'orientation des constructions en vue de la ventilation transversale ou à l'importance de la couleur des surfaces extérieures sur le comportement thermique des

1 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, op. cit.

2 S. Brand (éd.), *Whole Earth Catalog. Access to tools*, 1968, auto-édition, n. p. Traduction personnelle, citation originale : « it has changed my life and my way of thinking. » Sur l'influence de ce « catalogue », voir : C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 139-147.

3 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 13/06/2019 à Paris.

4 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 375.

5 *Ibid.*, p. 37-117.

6 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

7 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 323-325.

constructions dans les climats chauds et secs. En revanche, il ne présente que très succinctement l'ensemble des techniques solaires passives, Givoni n'ayant vraisemblablement pas eu connaissance du mur Trombe et de nombreuses autres techniques à l'époque.

Impressionné par la rigueur scientifique de l'ouvrage, qu'il estime bien supérieure à celui d'Olgyay¹, l'architecte français Izard, membre du Groupe A.B.C., entame une correspondance avec Givoni à partir de 1975 afin de traduire *Man, Climate and Architecture* en français². Dans une lettre adressée à Givoni en novembre 1975, il affirme que les recherches du Groupe A.B.C. visent la conception d'un « habitat adapté aux conditions climatiques, de manière à obtenir les conditions de confort en minimisant le recours aux systèmes artificiels de chauffage ou de climatisation³. » Créé en 1970 à l'école d'architecture de Marseille-Luminy, ce groupe de recherche rassemble « des architectes, des thermiciens, des héliophysiciens, des mécaniciens des fluides, des climatologues et des biologistes⁴. » Il affirme que les travaux menés au Centre de Recherche du Bâtiment d'Haïfa sont « d'une importance primordiale⁵ » pour le Groupe A.B.C. et que l'ouvrage de Givoni est « capital⁶ ». Sa traduction paraît en 1978 sous le titre *L'Homme, l'architecture et le climat*.

Les synthèses publiées par Dreyfus, Daniels et Givoni sont complétées en 1976 avec la parution aux États-Unis de l'ouvrage *The Solar Home Book*, qui regroupe la grande majorité des techniques solaires passives disponibles à l'époque⁷. Il est rédigé par Bruce Anderson et Michael Riordan, qui seront des protagonistes importants des *Passive Solar Conferences* par la suite. Cet ouvrage est issu d'un travail de recherche mené par l'architecte Bruce Anderson depuis le début des années 1970 et organisé en trois parties : une présentation des phénomènes physiques indispensables à connaître, une analyse des différentes techniques solaires passives de chauffage et de rafraîchissement, et plusieurs chapitres consacrés à la fabrication de différents systèmes (chauffe-eau solaire, rénovation par une serre...). Bien que technique, le ton de l'ouvrage reste pédagogique et se distingue des publications précédentes : il est par exemple proposé d'identifier les différents modes de transmission de la chaleur dans une cuisine afin que le lecteur puisse s'appropriier les phénomènes de conduction, de convection et de

1 Entretien avec Jean-Louis Izard, le 07/10/2019 à Marseille.

2 Correspondance entre Jean-Louis Izard et Baruch Givoni, archives du Groupe A.B.C. – Marseille.

3 Lettre de Jean-Louis Izard à Baruch Givoni du 17/11/1975. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 Lettre de Jean-Louis Izard à J. P. Lesterlin du 30/06/1975. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

7 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, *op. cit.*

rayonnement ¹ . Il présente l'intégralité des techniques solaires passives sous forme d'illustrations ou de photographies, ainsi que leur histoire et leurs évolutions : on y trouve regroupées les recherches de Trombe, de Baer, de Hay et d'autres.

Comme la majorité des manuels sur la conception bioclimatique qui seront publiés par la suite, Anderson et Riordan insistent sur l'importance des connaissances physiques et climatiques préalables au développement d'un projet. Ils affirment :

« Avant de concevoir et de construire une maison tempérée par le soleil, vous devez acquérir une certaine familiarité avec les flux d'énergie naturels de votre environnement. Il faut connaître la position du soleil afin d'orienter une maison et un capteur pour recevoir ses rayons chauds². »

La présentation graduelle des phénomènes physiques fondamentaux (transmission de la chaleur, rayonnement solaire...) permet au lecteur non-spécialiste d'aborder les techniques solaires passives avec suffisamment de notions pour comprendre leur comportement thermique de façon qualitative et approchée. Ces prolégomènes, qui servent à introduire les phénomènes physiques indispensables à la compréhension des climats, des microclimats et à l'intelligibilité des différentes techniques solaires passives sont caractéristiques de tous les manuels consacrés à ces sujets qui seront publiés par la suite, qui prennent parfois la forme d'un court précis de physique appliquée et adressée à des débutants. *The Solar Home Book* a été largement diffusé aux États-Unis et en France. Les illustrations de ce manuel seront reprises dans de nombreuses publications et il servira de base à différents acteurs français pour diffuser les constructions bioclimatiques et solaires passives américaines, que ce soit dans des revues alternatives comme *Le Sauvage* ou des ouvrages spécialisés. Chareyre, pourtant critique de ce type de manuels qu'il estime trop imprécis, affirme que cet ouvrage « présente avec une grande clarté à peu près tous les systèmes de chauffage solaire utilisés³ » et que la qualité de ses illustrations « traduit une volonté forte de transmettre vraiment quelque chose⁴. »

1 *Ibid.*, p. 63.

2 *Ibid.*, p. 55. Traduction personnelle, citation originale : « Before you design and build a solar tempered home, you need to acquire some familiarity with the natural energy flows of your surroundings. You need to know the position of the sun in order to orient a house and collector to receive its warm rays. »

3 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 43.

4 *Ibid.*

III.1.2.3. Communiquer une méthode de conception appropriable

The Solar Home Book est à la fois une synthèse des principales techniques solaires passives et le premier manuel consacré à la conception solaire passive, puisqu'il contient toutes les données nécessaires à la conception d'un avant-projet. Les différents calculs présentés (apports thermiques, taille des capteurs...) sont placés dans les marges et permettent de compléter la lecture. *The Solar Home Book* est également complété de nombreuses annexes qui détaillent des méthodes simplifiées de calculs thermiques et regroupent quelques données météorologiques, comme l'ensoleillement reçu par une surface en fonction de son inclinaison et du mois pour les États-Unis¹. Ils permettent d'estimer grossièrement les apports solaires et les besoins de chauffage d'une construction située sur le territoire étasunien. Toutes ces méthodes facilement reproductibles permettent au concepteur d'effectuer par lui-même les choix architecturaux et techniques en fonction d'un climat local déterminé.

Tout le problème des manuels sur la conception bioclimatique est de ne pas induire des choix *a priori* et de donner au concepteur les informations et les méthodes nécessaires afin qu'il puisse effectuer ses choix par lui-même, en ayant connaissance des défauts et des qualités des différentes techniques qu'il souhaite mettre en œuvre pour le chauffage ou le rafraîchissement. Les publications de Dreyfus, de Daniels ou de Givoni synthétisaient de nombreuses connaissances techniques, mais ne présentaient pas des méthodes de conception. L'article « Solar Energy in Housing » de Colin Moorcraft, ou *La Face cachée du soleil* en France, ont insisté sur la nécessité de modifier la pratique des architectes et des ingénieurs dans la perspective d'inscrire durablement l'économie des énergies fossiles, mais n'étaient pas plus précis. Les auteurs de *La Face cachée du soleil* parlent de « dériver² » le climat intérieur du climat extérieur, à partir de la compréhension des « facteurs bioclimatiques³ » puis le choix des « techniques du contrôle climatique⁴ », mais ils ne détaillent pas comment doit s'opérer cette déduction. Ces publications alternatives ne prennent pas la forme de véritables manuels didactiques et exposent des intentions plus qu'une véritable méthode de conception, bien qu'on y trouve les différents outils nécessaires à la conception bioclimatique. Les informations y sont

1 *Ibid.*, p. 257-270.

2 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 11.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

présentées très succinctement et sont parfois accompagnées de longues considérations politiques qui n'améliorent pas la clarté de leur exposition.

The Solar Home Book marque une rupture avec ce type de publication et la fin des années 1970 est caractérisée par la diffusion de méthodes de conception présentées comme bioclimatiques ou solaires passives. En 1978, l'architecte américain David Wright déjà internationalement célèbre pour ses réalisations, publie *Natural Solar Architecture*, qui présente son approche de la conception bioclimatique et se distingue nettement par sa notoriété auprès des différents acteurs¹. Cet ouvrage est caractérisé par une typographie manuscrite, ainsi qu'une abondance de dessins qui illustrent les différents principes physiques et de nombreuses techniques solaires passives (*figure 99*). David Wright affirme que le but de son manuel est « d'apporter une aide aux étudiants architectes, constructeurs, maîtres d'œuvre, écologistes... en comblant les lacunes d'une formation qui négligeait la connaissance des phénomènes². » Cette dimension didactique l'inscrit directement dans la lignée des préoccupations portées par la contre-culture. Pour défendre la méthode de conception solaire passive qu'il propose, David Wright critique les conséquences de l'utilisation des énergies fossiles et la négligence des énergies naturellement disponibles³. Imprégné d'une vision romantique de la « Nature », il prône un nouvel « âge solaire⁴ » qui soit fondé sur l'utilisation directe de l'énergie solaire qui permettrait de redécouvrir « l'incroyable subtilité du monde physique qui nous entoure⁵. »

David Wright détaille les différentes caractéristiques des climats, microclimats et paysages qui doivent selon lui « dicter les règles⁶ » d'un projet. Il plaide pour une étude essentiellement qualitative des climats selon les « types de temps⁷ » qui les caractérisent. À partir de cette analyse, David Wright présente ce qu'il nomme les « outils naturels du projet⁸ » qui regroupent la majorité des phénomènes physiques sur lesquels le concepteur peut agir afin d'assurer le confort thermique à l'intérieur d'une construction grâce aux techniques solaires passives. Après une rapide présentation du premier et du second principe de la thermodynamique⁹, il détaille de nombreux phénomènes physiques importants comme la

1 D. Wright, *Natural Solar Architecture: A Passive primer*, op. cit.

2 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 9.

3 *Ibid.*, p. 10.

4 *Ibid.*, p. 14.

5 *Ibid.*, p. 15.

6 *Ibid.*, p. 31.

7 *Ibid.*, p. 51.

8 *Ibid.*, p. 60.

9 *Ibid.*, p. 62-63.

chaleur spécifique¹ (capacité thermique massique) ou la chaleur latente² (enthalpie de changement d'état). La pédagogie de ses explications, redoublée par l'originalité des illustrations, explique vraisemblablement l'important succès de cet ouvrage. À la suite de ces explications, David Wright présente de très nombreuses techniques solaires passives utilisables pour le chauffage et le rafraîchissement des habitations³, et énumère des systèmes de ventilation par convection naturelle qu'il a expérimentés dans plusieurs de ses réalisations⁴. La dernière partie de l'ouvrage est consacrée à la proposition d'une méthode de conception : celle-ci prend la forme d'une procédure basée sur une analyse de site et du microclimat, un positionnement des différentes pièces en fonction du programme, le choix de techniques solaires passives appropriées, puis une série de calculs thermiques simplifiés qui permettent de valider ou d'amender ces choix⁵.

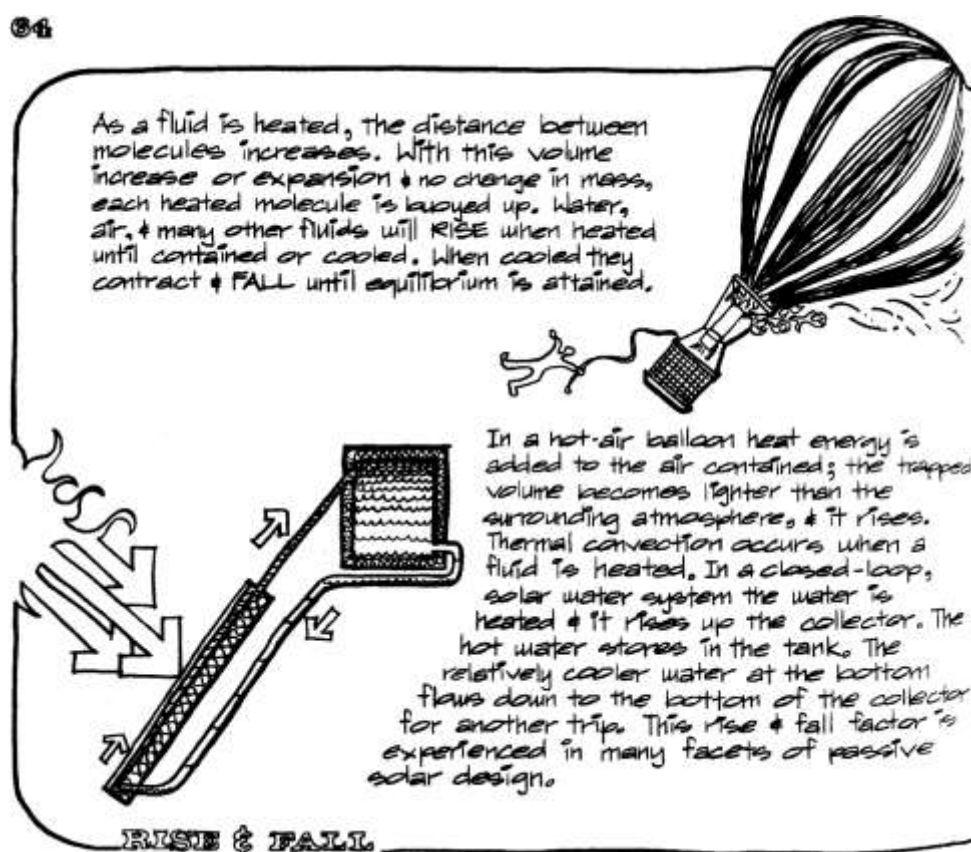


Figure 99 : Illustration du principe du thermosiphon et de la convection naturelle dans le manuel de D. Wright. (D. Wright, *Natural Solar Architecture: A Passive primer*, New York : Van Nostrand Reinhold Inc., 1978, p 65)

1 *Ibid.*, p. 71.

2 *Ibid.*, p. 75.

3 *Ibid.*, p. 124-217.

4 *Ibid.*, p. 190-201.

5 *Ibid.*, p. 218-223.

Natural Solar Architecture est considéré comme « la véritable bible de l'architecture bioclimatique¹ » à l'époque. Il est traduit et adapté en français par l'ingénieur polytechnicien Pierre Bazan en 1979, soit quelques années après que des architectes français aient commencé à diffuser des méthodes de conception bioclimatiques dans des périodiques². Soucieux d'adapter le contenu de l'ouvrage aux lecteurs francophones, Bazan apporte des modifications au texte original, pour y inclure notamment les données d'ensoleillement de villes françaises représentatives³ (Paris, Perpignan, Nantes...). Cette pratique, reprise dans d'autres traductions ultérieures réalisées par Bazan, montre que le but n'était pas de traduire une œuvre originale en conservant les références aux climats de Miami ou de Seattle de l'édition initiale⁴, mais de l'adapter aux usages des concepteurs français, donc de faire référence à des données climatiques signifiantes pour ces acteurs. Dans sa préface, Bazan affirme que David Wright « livre les secrets les plus modernes des phénomènes naturels qui sont à la base de l'architecture du soleil⁵. » Sa traduction est publiée sous le titre *Soleil, nature, architecture* en 1979 aux éditions Parenthèses, fondées l'année précédente par les architectes Bardou et Arzoumanian, anciens élèves de l'école d'architecture de Marseille-Luminy et proches du Groupe A.B.C.

Les éditions Parenthèses auront un rôle fondamental dans la traduction et la diffusion des ouvrages relatifs à la conception bioclimatique en France et en Europe, entre la fin des années 1970 et le début des années 1980. En 1978, Bardou et Arzoumanian y publient successivement deux ouvrages intitulés *Archi de terre*⁶ et *Archi de soleil*⁷. Le premier, qui se vend à près de 12 000 exemplaires, présente essentiellement les techniques de construction en terre crue, ainsi que de nombreuses réalisations bioclimatiques qui emploient ce matériau, comme la maison de Baer à Corrales⁸ ou celles de David Wright⁹. Bardou et Arzoumanian présentent la conception bioclimatique comme une démarche qui « vise à utiliser au moyen de l'architecture elle-même les éléments favorables du climat, en vue de satisfaire les exigences du confort thermique¹⁰ ». Cette définition fera autorité par la suite et sera souvent reprise.

1 L. Heschang, *Architecture et volupté thermique*, op. cit., note p. 77.

2 J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », p. 39-48.

3 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 84.

4 D. Wright, *Natural Solar Architecture: A Passive primer*, op. cit., p. 92.

5 P. Bazan, « Préface », p. 8 in : D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit.

6 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit.

7 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit.

8 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 58-64.

9 *Ibid.*, p. 65-77.

10 *Ibid.*, p. 54.

L'ouvrage *Archi de terre* introduit un certain « style¹ » des éditions Parenthèses, repris dans les publications suivantes : l'ouvrage est abondamment illustré, accompagné d'une longue bibliographie ainsi que d'un glossaire qui permet de définir les termes techniques pour le lecteur qui n'est pas familiarisé avec ce type de lecture.

La même année, Bardou et Arzoumanian publient *Archi de soleil*, pensé comme un petit manuel de conception² : il s'agit du premier manuel consacré à la conception bioclimatique rédigé par des Français. Ils introduisent d'abord les facteurs cosmiques à l'origine du climat, puis l'importance de l'étude des microclimats et des phénomènes thermiques qui expliquent les « différences de comportement au rayonnement solaire³ » des surfaces et des matériaux, ainsi que les éléments du « confort thermo-hygrométrique⁴ » ressenti par les individus. Sans reproduire des méthodes de calcul, Bardou et Arzoumanian donnent quelques valeurs qui permettent de fixer les grandeurs des phénomènes en jeu (échanges par rayonnement de grande longueur d'onde, conduction...) et donnent une bonne approximation de l'importance de ces phénomènes⁵. Dans la continuité d'*Archi de terre*, ils insistent sur l'importance de la prise en compte du cycle de vie des matériaux de construction et de leur impact environnemental⁶. Très inspirés par David Wright, ils affirment que la conception bioclimatique « s'intègre dans le concept d'éco-design⁷ », qui suppose une prise en compte du « coût énergétique de chaque opération entrant dans la conception d'un espace⁸ ». Quoique leur définition de la conception bioclimatique soit générale puisqu'elle intègre l'étude du cycle de vie de la construction, la méthode de conception que Bardou et Arzoumanian proposent est analytique : elle repose sur une distinction des différentes techniques existantes et l'étude théorique de leurs combinaisons⁹.

Encouragées par le succès de ces deux premiers ouvrages, les éditions Parenthèses publient en 1979 un nouveau manuel intitulé *Archi bio*, rédigé par Izard en collaboration avec Alain Guyot et exclusivement consacré à la conception bioclimatique, aux concepts qu'elle mobilise et aux outils qu'elle nécessite¹⁰. Nettement plus théorique que les ouvrages évoqués précédemment, *Archi bio* aborde précisément certains facteurs climatiques importants, comme

1 Entretien avec Jean-Louis Izard, le 17/03/2020 (à distance).

2 Entretien avec Patrick Bardou, le 15/07/2020 à Marseille.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 21.

4 *Ibid.*, p. 30.

5 *Ibid.*, p. 36-37.

6 *Ibid.*, p. 42-43.

7 *Ibid.*, p. 42.

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*, p. 45-58.

10 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit.

le vent à partir d'études en soufflerie¹, et synthétise de nombreux travaux de recherche menés par des ingénieurs ou des organismes français sur le comportement thermique des constructions. L'ouvrage *Archi bio* propose une méthode de conception basée sur la collecte et le « traitement² » de données qualitatives (climat, microclimat, site...) et une série de choix techniques guidés par une présentation des différents phénomènes thermiques qu'ils modulent (émissivité, albedo des surfaces...). Izard présente quelques techniques solaires passives (serres, mur Trombe...) et détaille leur comportement thermique à partir des travaux du physicien François-Marie Camia, membre du Groupe A.B.C., et des résultats obtenus par Balcomb au LASL³. *Archi bio* complète les ouvrages *Archi de terre* et *Archi de soleil* sur le plan méthodologique, technique et scientifique. Ces trois ouvrages seront traduits en espagnol⁴ et *Archi bio* sera également traduit en italien⁵, ce qui témoigne d'une importante diffusion et de l'intérêt international pour les travaux de ces acteurs français.

Malgré leur popularité et leur rigueur, les manuels publiés entre 1976 et 1979 en France comme aux États-Unis manquent de données relatives aux performances des techniques solaires passives, qui étaient diffusées par l'intermédiaire des *Passive Solar Conferences* qui ne concernaient qu'un petit réseau d'acteurs internationaux. En l'absence de ces données, les méthodes de calcul et les règles de dimensionnement parfois proposées dans ces manuels restent imprécises et quelquefois inutilisables. Conscient du manque de diffusion des connaissances sur les techniques solaires passives, l'architecte américain Mazria entame en 1975 la rédaction d'un manuel complet⁶, qu'il publie aux États-Unis en 1979 sous le titre *The Passive Solar Energy Book*⁷. Ce manuel marque l'aboutissement des différentes tentatives des auteurs précédents pour produire une méthode de conception bioclimatique et solaire passive cohérente. Mazria s'est inspiré des écrits de l'architecte américain Christopher Alexander, qui a proposé de distinguer l'intégralité des éléments qui caractérisent un projet architectural ou urbain

1 A. Guyot, « Le Vent et la ventilation en architecture », in : J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 21-37.

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 8.

3 *Ibid.*, p. 83-84.

4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Arquitecturas de adobe*, Barcelone : Gustavo Gili, (coll. Tecnología y Arquitectura), trad. du français par Marta Tusquets Trías de Bes, 1979, 165 p. ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Sol y arquitectura*, Barcelone : Gustavo Gili, (coll. Tecnología y Arquitectura), trad. du français par Marta Tusquets Trías de Bes, 1980, 171 p. ; J.-L. Izard, A. Guyot, *Arquitectura bioclimática*, Barcelone : Gustavo Gili, (coll. Tecnología y Arquitectura), trad. du français par Marta Tusquets Trías de Bes, 1980, 192 p.

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio. Architettura bioclimatica*, Milan : CLUP, trad. du français par P. Coppa et B. Merello, 1982, 176 p.

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 5.

7 E. Mazria, *The Passive Solar Energy Book: A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design*, op. cit.

suivant différents « patterns » ou « options », qui une fois combinés permettent de qualifier un espace et d'en générer une image mentale¹. Mazria a repris ce principe² : après une présentation des « phénomènes naturels³ » puis des « procédés solaires passifs⁴ », il détaille vingt-sept options des plus générales, comme la « localisation du bâtiment⁵ », aux plus détaillées, comme l'étude des réflecteurs ou des protections solaires⁶. Chacune de ces options expose une problématique ainsi que des conseils et des éléments de résolution : dans le cas du dimensionnement d'une serre par exemple, qui reste une opération complexe, Mazria donne différentes recommandations pour déterminer sa surface en fonction de la surface habitable⁷.

Ces recommandations émises pour chacune des options ont été établies à partir de l'analyse de bâtiments existants et des études menées par différents organismes de recherche comme le LASL ou l'Université d'Oregon⁸. Mazria estime que le croisement de ces résultats permet d'établir des « règles pratiques⁹ », analogues à celles qui existent en mécanique des structures¹⁰ : son but est que les différentes techniques solaires passives puissent être dimensionnées aussi rapidement que les éléments structurels d'une construction. La considération de chacune des options amène le concepteur à prendre des décisions qui permettent progressivement de mettre au point une construction solaire passive. Cependant, Mazria insiste sur la nécessaire « habileté¹¹ » du concepteur qui ne doit pas appliquer strictement chacune des recommandations énoncées, mais doit s'efforcer de réaliser des compromis entre des exigences parfois antagonistes, comme l'allongement d'une serre et le souci de conserver une morphologie compacte. Après avoir détaillé chacune des options, le manuel se termine par une présentation des « outils du projet¹² », qui présente un certain nombre de calculs thermiques, l'usage des diagrammes solaires, ainsi que de nombreuses annexes (données d'ensoleillement, propriétés thermiques...).

1 C. Alexander *et. al.* *A Pattern Language: Towns, Building, Construction*, New York : Oxford University Press, 1977, 1171 p.

2 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 5.

3 *Ibid.*, p. 13-28.

4 *Ibid.*, p. 29-55.

5 *Ibid.*, p. 61-64.

6 *Ibid.*, p. 196-202.

7 *Ibid.*, p. 138.

8 *Ibid.*, p. 98.

9 *Ibid.*, p. 56.

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*, p. 60.

12 *Ibid.*, p. 238-266.

Bien que plus technique que l'ensemble des manuels précédents, *The Passive Solar Energy Book* est un manuel conçu pour être didactique et qui contient de nombreuses illustrations spécialement réalisées par l'illustrateur Russel Ball. Elles représentent très simplement des phénomènes parfois complexes, comme la relation entre l'intensité énergétique reçue par une surface et l'angle d'incidence (*figure 100*) ou les phénomènes de convection et de conduction dans une paroi (*figure 101*). Mazria affirme que ces illustrations ont été conçues pour « transmettre une information très technique sous une forme simple et claire¹ », le but général de son manuel étant « de rendre l'information technique accessible au grand public² ». On retrouve ici les motivations didactiques portées par la contre-culture et l'ambition de diffuser des connaissances techniques précises mais facilement appropriables. L'ouvrage est également structuré selon deux niveaux de lecture par le choix de deux graisses typographiques : les caractères gras signalent les passages importants et forment un texte autonome qui peut être rapidement lu indépendamment des autres paragraphes qui apportent des précisions au lecteur plus consciencieux³.

The Passive Solar Energy Book est véritablement un manuel, graphiquement conçu pour que le lecteur puisse retrouver les informations importantes. Bien que Mazria accorde une moindre importance à l'étude des phénomènes microclimatiques que David Wright, son manuel est considérablement plus précis pour tout ce qui concerne les phénomènes thermiques. De par la qualité et l'abondance de l'information technique qu'il fournit, ainsi que la qualité de ses illustrations, il est considéré comme le plus abouti des manuels relatifs à la conception bioclimatique et solaire passive, par les architectes⁴ comme par les ingénieurs⁵. Il a été traduit et adapté en français par Bazan pour les éditions Parenthèses en 1981. Pour cette édition française, Bazan a apporté des modifications importantes en annexe de l'ouvrage original, en présentant les données météorologiques des principales villes européennes⁶. Ce manuel fournit ainsi l'intégralité des informations nécessaires à la réalisation de calculs thermiques simplifiés pour différentes localités en Europe. Dans le souci d'actualiser les résultats présentés par Mazria, Bazan a également complété les annexes avec une méthode de calcul des apports solaires issue d'une étude menée par Balcomb et publiée en 1980.

1 *Ibid.*, p. 10.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 12.

4 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

5 Entretien avec Michel Raoust, le 21/02/2020 à Paris.

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 281-299.

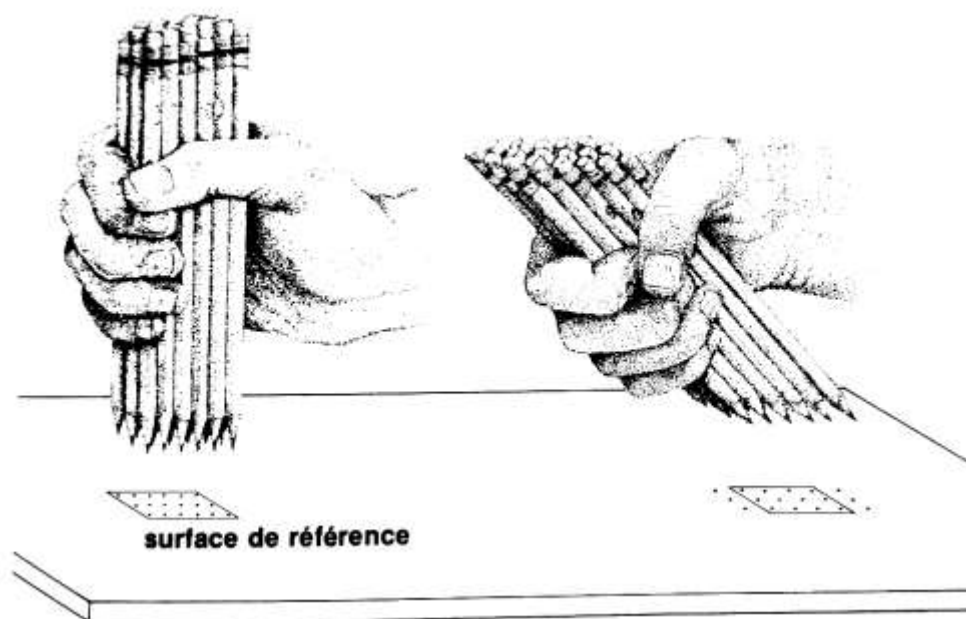


Figure 100 : Illustration de la relation entre l'intensité énergétique reçue par une surface et l'angle d'incidence dans le manuel d'E. Mazria.

(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 19)

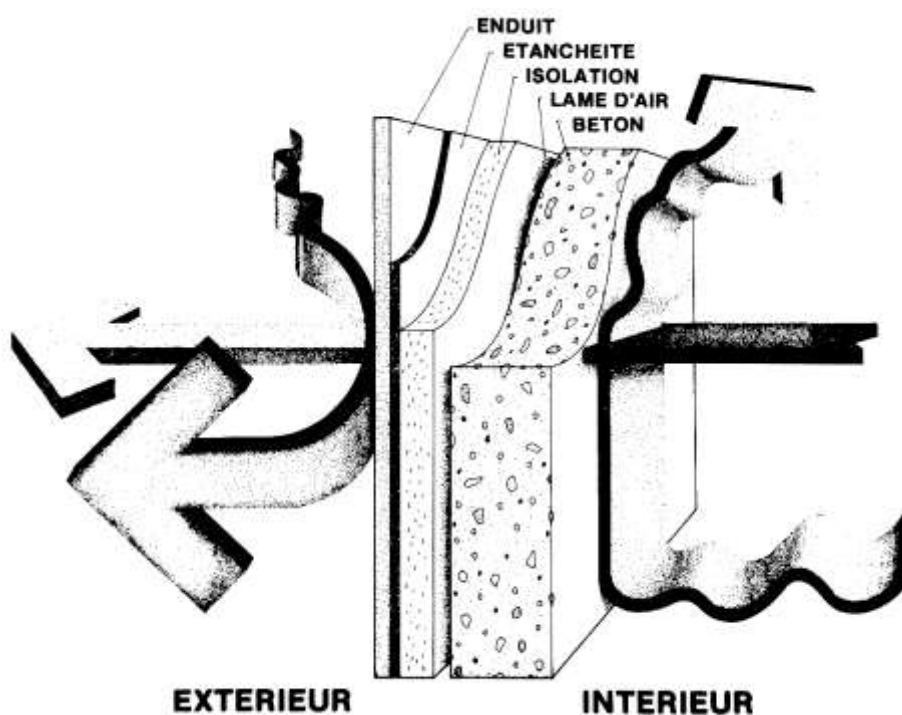


Figure 101 : Illustration des phénomènes de conduction et de convection naturelle le long des surfaces dans le manuel d'E. Mazria.

(E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 217)

D'autres manuels consacrés à la conception bioclimatique seront publiés par la suite, en France comme aux États-Unis¹, mais ce sont principalement les ouvrages que nous avons évoqués qui ont contribué à la diffusion de la conception bioclimatique et solaire passive dès la fin des années 1970. Ils constituent toujours des ouvrages de référence comme en témoignent leurs rééditions récentes². Ces manuels ont permis aux concepteurs de recourir à la conception bioclimatique sans avoir à synthétiser les informations techniques, climatiques et météorologiques qui sont initialement regroupées dans des publications spécialisées et partagées par un petit nombre d'acteurs. Leurs traductions ont permis de faire connaître les expérimentations menées à l'étranger et de capitaliser sur les résultats obtenus par différents centres de recherches, que ce soit aux États-Unis ou en Israël.

Les manuels constituent les principaux vecteurs de diffusion des connaissances scientifiques et techniques nécessaires à la conception bioclimatique des bâtiments auprès des architectes et des ingénieurs, mais aussi des auto-constructeurs ou des curieux sensibilisés aux problématiques énergétiques et environnementales après le premier choc pétrolier. Cependant, le contenu de ces manuels provenait essentiellement des recherches et des travaux diffusés dans le cadre d'événements scientifiques spécifiques, particulièrement les *Passive Solar Conferences*. Ce sont d'abord ces conférences qui ont contribué à la diffusion des connaissances scientifiques et techniques relatives aux techniques solaires passives et aux méthodes de calcul spécifiques qu'elles réclament. Elles ont permis de constituer un réseau international d'ingénieurs, architectes et inventeurs spécialisés dans la conception bioclimatique et solaire passive au cours des années 1970. Nous verrons que l'ambition scientifique de ces événements a permis de tempérer l'engouement parfois idéologique pour certaines techniques solaires passives et a contribué à l'amélioration rapide de nombreuses techniques.

1 Voir notamment : Total Environmental Action, Los Alamos Scientific Laboratory (éds.) *Passive Solar Design Handbook*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1984, 750 p. ; D. Watson, K. Labs, *Climatic Building Design. Energy-Efficient Building Principles and Practice*, New York : McGraw Hill Higher Education, 1983, 288 p.

2 D. Wright, *Manuel d'architecture naturelle*, [1ère éd. 1979, sous le titre *Soleil, Nature, Architecture*], Marseille : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 2004, 248 p. ; E. Mazria, *Le Guide de la maison passive*, [1ère éd. 1981, sous le titre *Le Guide de l'énergie solaire passive*] Marseille : Parenthèses, trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 2005, 339 p.

III.1.3. La constitution et la diffusion des connaissances sur les techniques solaires passives grâce aux conférences

III.1.3.1. Promouvoir et diffuser les techniques solaires passives éprouvées

Si les méthodes de conception bioclimatiques et solaires passives se sont principalement propagées sous l'impulsion du premier choc pétrolier et des publications que nous avons évoquées, la constitution et la transmission des connaissances relatives aux techniques passives ont concerné un nombre d'acteurs plus restreint, essentiellement les ingénieurs et les architectes associés à la conception bioclimatique et déjà convaincus par la nécessité d'économiser les énergies fossiles. À la différence des simples curieux, ils étaient à la fois motivés par la recherche d'économies d'énergie, mais aussi par le souhait de démontrer les performances des techniques solaires passives, et par extension la légitimité de la conception bioclimatique. Les conférences et les colloques étaient l'occasion d'éprouver leurs résultats et de découvrir ceux obtenus par d'autres architectes ou ingénieurs. Ces événements ont permis d'affiner certaines connaissances techniques et ont contribué à l'amélioration de nombreuses techniques solaires passives.

La majorité de ces acteurs a participé ou assisté à des conférences internationales qui se sont tenues à partir de 1975 dans différents pays, puis annuellement aux États-Unis sous la forme des *Passive Solar Conferences*. Elles sont présentées comme des événements majeurs qui ont permis des échanges importants entre les acteurs européens et américains. Les principaux sujets de ces conférences concernaient le développement et l'étude des performances des techniques solaires passives, la présentation des recherches expérimentales sur de nouveaux matériaux, ainsi que la mise au point de méthodes de calcul ou de méthodologies de conception à partir du climat. Ces conférences prenaient la forme de congrès internationaux organisés sur plusieurs jours dont les actes étaient ensuite distribués : on les retrouve dans les archives privées des architectes associés à la conception bioclimatique que nous avons pu consulter. Si les préoccupations énergétiques y sont souvent évoquées, le format des papiers présentés lors de ces conférences est rigoureux et respecte un certain nombre d'exigences scientifiques (citations, bibliographie, méthode expérimentale...). Ce format de

diffusion correspond à celui des grands congrès scientifiques internationaux organisés annuellement, comme il en existe dans de très nombreuses disciplines¹.

Avant 1975, différents congrès internationaux ont contribué à diffuser l'intérêt pour l'utilisation de l'énergie solaire dans l'habitat et ont permis de synthétiser les connaissances relatives aux techniques solaires passives : c'est le cas de la conférence des Nations Unies sur *Les Sources nouvelles d'énergie*, qui s'est tenue à Rome du 21 au 31 août 1961², et du congrès international intitulé *Le Soleil au service de l'homme*, organisé à la Maison de l'Unesco à Paris du 2 au 6 juillet 1973³, quelques mois avant le premier choc pétrolier. Ces deux événements séparés de plus d'une décennie sont intéressants à présenter dans la mesure où ils ont contribué à diffuser des connaissances techniques de nature très différente, considérées comme facilement appropriables dans le cas de la conférence sur *Les Sources nouvelles d'énergie*, et jugées inutilisables car trop générales et spéculatives dans le cas du congrès sur *Le Soleil au service de l'homme*. Ils illustrent une tension fondamentale que nous avons déjà signalée et qui sera au cœur des *Passives Solar Conferences* par la suite.

La conférence de Rome en 1961 réunit de nombreux architectes, ingénieurs et scientifiques. Les communications qu'ils présentent concernent des techniques solaires passives de chauffage, mais aussi de rafraîchissement. Bliss aborde par exemple les problèmes de refroidissement par rayonnement de grande longueur d'onde⁴, Yellott présente une étude sur les déperditions thermiques des surfaces horizontales dans les régions désertiques⁵, tandis que Trombe et ses collaborateurs introduisent leurs « Principes de climatisation dans les pays à ciel

-
- 1 L'exemple le plus caractéristique de l'influence de ce type d'événement pour le développement d'un champ de recherche est la série des conférences Macy organisées entre 1942 et 1953, qui ont permis de mettre au point et de diffuser internationalement la cybernétique. Voir : N. Wiener, « Introduction », *La Cybernétique. Information et régulation dans le vivant et la machine*, Paris : Seuil, (coll. Sources du savoir), trad. de l'anglais par R. Le Roux *et. al.*, 2014, p. 55-96.
 - 2 United Nations (éd.), *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, 7 vol., New York : United Nations, 1964. (Archives Nations Unies – en ligne)
 - 3 *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne)
 - 4 R. W. Bliss Jr., « The Performance of an Experimental System using Solar Energy for Heating, and Night Radiation for Cooling a Building », p. 148-158 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 5, Solar Energy : II, *op. cit.*
 - 5 J. I. Yellott, P. Kokoropoulos, « Nocturnal Heat Loss from Horizontal Surfaces in Arid Regions », p. 481-490 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 4, Solar Energy : I, *op. cit.*

clair¹ ». D'autres communications comme celles de Löff concernent plus directement les applications domestiques de l'énergie solaire pour le chauffage². Elles complètent celles réalisées par de nombreux autres chercheurs, notamment d'origine japonaise, pays où l'utilisation des chauffe-eau solaires est particulièrement répandue³.

L'ensemble de ces communications constitue une somme de connaissance considérable, des mesures de l'énergie solaire aux applications les plus abouties. La conférence de Rome de 1961 est présentée comme un exemple remarquable de synthèse des connaissances relatives à l'énergie solaire et à ses applications. De par leur importance pratique, certaines des communications sur les applications domestiques de l'énergie solaire seront republiées en 1978 sous la forme d'un « manuel⁴ » intitulé *Solar 2* aux États-Unis. Baer, qui introduit cette réédition, affirme que les « Actes de la Conférence des Nations Unies sont remplis d'informations simples sur les chauffe-eau et les systèmes de chauffage domestique⁵. » Selon lui, les connaissances techniques et scientifiques regroupées dans ces communications encouragent à développer une « approche passive du chauffage et du rafraîchissement⁶ » qui ne soit pas une application de l'énergie solaire à des techniques déjà existantes, conçues pour fonctionner à partir des énergies fossiles.

La réédition des actes de la conférence des Nations Unies de 1961 sur les applications de l'énergie solaire est un fait important. Alors que de très nombreuses conférences sur l'énergie solaire se sont tenues entre 1961 et 1978, ce sont les actes de cet événement déjà ancien qui ont été réédités à la fin des années 1970, au moment où l'intérêt pour l'énergie solaire est le plus important. Ce choix s'explique par la qualité et le niveau des communications proposées lors de la conférence sur *Les Sources nouvelles d'énergie*, qui concilient des exigences apparemment antagonistes de rigueur scientifique et de présentation de connaissances techniques facilement compréhensibles. Baer affirme que le contenu de ces communications est accessible à des non-ingénieurs et présente des systèmes réalisables avec peu de moyens⁷. Le ton général des papiers

1 F. Trombe, Ch. Henry Le Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 110-135 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit.

2 G. O. G. Löff, « Use of Solar Energy for Heating Purposes: Space Heating », p. 114-137 in : *ibid.*

3 K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, op. cit, p. 241-247.

4 *Solar 2: Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, Seattle : Cloudburst Press, 1978, 315 p.

5 S. Baer, « Introduction », p. 2 in : *Solar 2*, op. cit. Traduction personnelle, citation originale : « These United Nations Conferences Proceedings are filled with straightforward information about water heaters and house heating systems. »

6 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « passive approach to heating and cooling ».

7 *Ibid.*

est selon lui « réfléchi et généralement imaginatif¹ ». La conférence des Nations Unies de 1961 constitue pour de nombreux acteurs une référence en ce qui concerne la diffusion des connaissances sur les techniques solaires passives.

À ce titre, le congrès international *Le Soleil au service de l'homme* n'a pas été à la hauteur de la conférence sur *Les Sources nouvelles d'énergie*, bien qu'il ait contribué à populariser l'utilisation de l'énergie solaire quelques mois avant le premier choc pétrolier et qu'il ait stimulé les échanges entre les chercheurs français et américains. Trombe, Löf, Yellott et Givoni y présentent de nombreuses communications, ainsi que les architectes français Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, qui sont des représentants importants de la conception bioclimatique en France². Hay réalise deux conférences lors de ce congrès, une première sur le comportement thermique des surfaces « noires froides » et « blanches chaudes³ », et une seconde sur son système *Skytherm* et la maison d'Atascadero qui est encore en construction à l'époque⁴. À travers ces notions contre-intuitives de surfaces noires mais froides et de surfaces blanches mais chaudes, Hay essayait de vulgariser l'importance de la porosité des surfaces auprès d'un public peu familiarisé avec la subtilité des phénomènes thermiques. Cet effort a été salué et a contribué à populariser les recherches de Hay.

Malgré l'enthousiasme qu'il suscite auprès du public français et l'intérêt pédagogique de certaines communications, ce congrès est l'objet de nombreuses critiques. Moorcraft estime que les applications de l'énergie solaire qui y ont été présentées sont démesurées et irréalistes par rapport à celles qui avaient été présentées à Rome en 1961. Il écrit :

« Alors que la conférence de Rome était un événement inestimable mais peu spectaculaire, qui insistait considérablement sur les applications à bas coût de l'énergie solaire, la conférence de Paris était un spectacle prétentieux qui insistait beaucoup trop sur le maintien des habitudes

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « the tone is thoughtful and generally imaginative ».

2 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, J.-P. Girardier, « Toitures solaires », p. EH.109-1-EH.109-10 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne)

3 H. R. Hay, « Solar Radiation and Color Adaptation », p. B.2-1-B.2-11 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, « The Sun and Life », *op. cit.* (Archives UNESCO – en ligne)

4 H. R. Hay, « The California Solarchitecture House », p. EH.73-1-EH.73-10 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, *op. cit.* (Archives UNESCO – en ligne)

énergétiques inutilement importantes d'une minorité (une activité potentiellement profitable connue sous le nom de "résolution de la crise énergétique¹"). »

Ce type de critique est caractéristique des préoccupations contre-culturelles que nous avons évoquées auparavant. Moorcraft, comme Baer, défend une approche pragmatique et simplifiée de l'utilisation de l'énergie solaire. Baer estime même que les projets démesurés et coûteux présentés lors de cet événement – comme le projet de capter le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère grâce à des satellites géostationnaires – sont à l'origine du désintérêt progressif pour l'énergie solaire par la suite². Bien que le congrès *Le Soleil au service de l'homme* ait permis de diffuser certaines techniques solaires passives comme le système *Skytherm*, il se distingue nettement de la conférence de 1961. Alors que la conférence sur *Les Sources nouvelles d'énergie* valorisait les techniques de captage et de conversion de l'énergie solaire manipulables, bien éprouvées, faciles à mettre en œuvre et donc reproductibles, le congrès de l'UNESCO rassemblait des projets souvent spéculatifs, imaginés pour une plus grande échelle. Derrière l'opposition entre ces deux événements, on retrouve deux conceptions de ce que doit être une connaissance technique : les événements inspirés de la conférence de Rome essaieront de promouvoir la transmission de techniques reproductibles.

III.1.3.2. Débattre des performances des techniques solaires passives : le cas des réunions de l'ISES

Les conférences de Rome et de Paris n'ont eu qu'une influence indirecte sur la transmission des techniques solaires passives, mais elles ont considérablement stimulé l'intérêt pour l'utilisation domestique de l'énergie solaire et ont surtout permis de définir certaines exigences en ce qui concerne les communications relatives à ces techniques. Ce sont des événements d'une moindre ampleur qui ont initialement permis de développer les techniques solaires passives, notamment les réunions annuelles de la Solar Energy Society aux États-Unis, comme celle qui s'est tenue à Palo Alto en 1968 à laquelle participent Yellott, Hay, Tabor, Löf

1 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *op. cit.*, p 634. Traduction personnelle, citation originale : « Whilst the Rome conference was an invaluable but unspectacular affair which put considerable emphasis on low cost applications of solar energy, the Paris conference was a pretentious spectacle which placed far too much emphasis on maintaining the unnecessarily large energy habits of a minority (a potentially profitable activity known as "solving the energy crisis"). »

2 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, *op. cit.*, p. 108-110.

et Daniels¹. Fondée en 1954, la Solar Energy Society se donne pour but de stimuler « l'échange et la circulation des connaissances sur l'énergie solaire² » et devient l'International Solar Energy Society (ISES) en 1971. Baer évoque le succès croissant des réunions de cette association qui ne réunissaient initialement que quelques spécialistes :

« La première convention sur l'énergie solaire à laquelle j'ai participé a eu lieu à Palo Alto en octobre 1968. Il y avait seulement environ 65 personnes, et les conférences ont été données dans une salle plutôt petite avec des chaises en bois. La réunion de 1974 a eu lieu à Fort Collins, dans le Colorado. Il y avait environ 1000 personnes, et les conférences ont été données dans un grand auditorium³. »

L'ambition initiale des réunions de travail de l'ISES est d'ordre scientifique : il s'agit de présenter le développement des applications directes de l'énergie solaire pour discuter et examiner les performances de différentes techniques⁴. De nombreux membres de l'ISES comme Daniels ou Yellott sont convaincus depuis le début des années 1950 de la nécessité d'économiser les énergies fossiles, mais sont soucieux de proposer des alternatives crédibles et performantes ayant fait l'objet d'expérimentations rigoureuses. Les réunions de l'ISES ont vraisemblablement catalysé le développement des techniques solaires passives : c'est à l'occasion de l'une d'elles que Hay et Yellott se rencontrent et qu'ils entament leur collaboration à l'origine du système *Skytherm*⁵, et c'est à la suite d'une présentation de Hay et Yellott à Palo Alto en 1968 que Baer met au point le système *Drumwall*⁶. Entre le milieu des années 1960 et le début des années 1970, les réunions de l'ISES ont permis la transmission et l'amélioration de nombreuses techniques solaires passives aux États-Unis. Le fait que de nombreuses

1 *Ibid.*, p. 24, 66.

2 « Preface and Objectives » in : *Solar Use Now - A Resource for People: Extended Abstracts. 1975 International Solar Energy Congress and Exposition July 28-August 1, 1975, University of California, Los Angeles, California, USA, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction, op. cit.*, p. 105. Traduction personnelle, citation originale : « The first solar energy convention I attended was in Palo Alto in October 1968. There were only about 65 people there, and the talks were given in a rather small room with wooden chairs. The 1974 meeting was in Fort Collins, Colorado. There were about 1000 people there, and the talks were given in a large auditorium. »

4 A. J. Drummond, « Meeting report - 1968 SES Annual General Meeting Palo Alto, California, U.S.A. 20-23 October, 1968 », *Solar Energy*, vol. 12, n° 3, 1969, p. 399.

5 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 S. Baer, « Harold Hay's influence on Zomeworks Corporation », p. 37 in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design, op. cit.*

techniques aient été mises au point à la suite de ces réunions montre que les échanges entre inventeurs, physiciens et chercheurs devaient être particulièrement animés.

Les historiens ont l'habitude de distinguer deux « profils de militants¹ » en ce qui concerne les énergies alternatives. Le premier regrouperait les « bricoleurs », qui « s'attachent à la construction – et souvent à l'auto-construction – d'un dispositif technique ou d'un convertisseur visant à répondre à un besoin spécifique et identifié². » Le second regrouperait pour l'essentiel des ingénieurs et des chercheurs qui « prennent le parti de proposer des scénarios prospectifs³ ». Si cette distinction est opérante en ce qui concerne les acteurs des énergies alternatives en général, elle est moins valide lorsqu'on l'applique aux acteurs du développement des techniques solaires passives. Certains des bricoleurs, comme Baer, ont reçu une solide formation universitaire et communiquaient au même titre que les chercheurs et les scientifiques lors de ces événements. À l'inverse, nombre de chercheurs ont bricolé eux-mêmes certains des systèmes qu'ils étudiaient et qu'ils présentaient lors de ces conférences : c'est le cas de Hay et de quelques autres.

Le fait que ces conférences réunissaient à la fois des bricoleurs et des chercheurs entraînait quelques confrontations. Baer évoque sa méfiance à l'égard des ingénieurs qui jugeaient des performances d'une technique seulement à partir de simulations thermiques dynamiques réalisées par ordinateur. À l'inverse, il évoque le mépris de certains scientifiques pour des systèmes dont les performances avaient été pratiquement démontrées par des bricoleurs⁴. On peut néanmoins supposer que ces confrontations et ces échanges ont stimulé le développement des techniques solaires passives et notamment la volonté de démontrer les performances et l'efficacité de ces techniques : c'est par l'intermédiaire des réunions de l'ISES que Hay a pu améliorer le système *Skytherm* et que Baer a multiplié les expérimentations sur le phénomène de thermosiphon. Ces réunions ont vraisemblablement créé une certaine émulation entre les acteurs soucieux des applications de ces techniques, qu'ils soient architectes ou auto-constructeurs, et ceux préoccupés par leur optimisation et leur amélioration, souvent ingénieurs ou scientifiques.

1 A. Vrignon, « Vers une société solaire ? Réflexions et expérimentations autour d'une transition énergétique potentielle dans les années 1968 », *op. cit.*, p. 348-353 ; F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, *op. cit.*, p. 301.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, *op. cit.*, p. 66.

L'ambition des réunions de l'ISES s'est conservée après le premier choc pétrolier et avec l'internationalisation de cette association. En 1975, l'ISES organise une grande conférence accompagnée d'une exposition à Los Angeles intitulée *Solar Use Now – A Resource for People* (*L'Utilisation du solaire maintenant – Une ressource pour les hommes*). L'association fédère alors près de 55 pays, comme l'Australie, la Grande-Bretagne ou la Hollande. La France est aussi représentée par l'intermédiaire du Groupe A.B.C. et de Jean-François Robert qui présente les résultats des performances du mur Trombe et des maisons solaires d'Odeillo-Font-Romeu¹, à partir des travaux de Bernard Sésolis², devant une audience composée entre autres de Balcomb, Hay, Yellott et van Dresser. L'architecte français d'origine suisse Gerber assiste aux conférences et s'intéresse de près au système *Skytherm* de Hay et à la maison d'Atascadero qui fait l'objet de plusieurs communications. Il réalise des croquis techniques et note des détails de conception dans les marges des communications dédiées à ce système (*figure 102*). Bien qu'il n'ait pas repris ce système par la suite, le fait que Gerber ait eu connaissance des détails techniques du système *Skytherm* lors de cet événement montre que les réunions de l'ISES ont largement contribué à la transmission des connaissances sur les techniques solaires passives et plus largement à leur diffusion parmi les architectes et les ingénieurs.

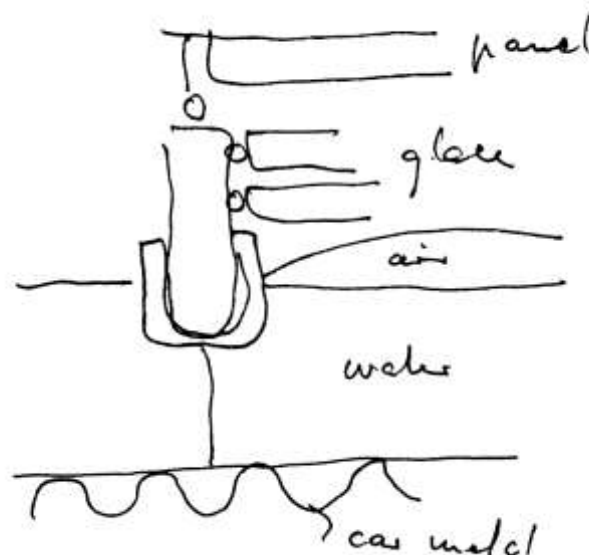


Figure 102 : Croquis du système Skytherm réalisé par M. Gerber lors d'une présentation d'H. Hay en 1975.
(archives de M. Gerber)

-
- 1 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Some Performance Characteristics of the CNRS Solar Houses », p. 366-367 in : *Solar Use Now - A Resource for People: Extended Abstracts. 1975 International Solar Energy Congress and Exposition July 28-August 1, 1975, University of California, Los Angeles, California, USA, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

III.1.3.3. Les *Passive Solar Conferences* et la constitution d'un champ de recherche sur les techniques solaires passives

À partir de 1976, ce type d'événement se multiplie avec la même ambition scientifique portée par les réunions de l'ISES, mais avec le souhait de promouvoir des techniques facilement appropriables, dans l'esprit de la conférence sur *Les Sources nouvelles d'énergie* de 1961. L'étude des techniques solaires passives devient entre 1976 et 1978 un champ de recherche à part entière qui occupe la majorité des ingénieurs, architectes et inventeurs préoccupés par les applications domestiques de l'énergie solaire¹. La majorité d'entre eux sont membres de l'ISES et sont soucieux de légitimer les performances des techniques solaires passives par l'intermédiaire d'expérimentations et de simulations thermiques dynamiques. L'enjeu principal consiste à prouver l'efficacité de ces techniques contre leurs détracteurs, qu'ils soient promoteurs des techniques solaires actives ou défenseurs des techniques de chauffage et de climatisation conventionnelles.

C'est dans ce contexte que se tient les 18 et 19 mai 1976 à Albuquerque dans le Nouveau-Mexique la *Passive Solar Heating and Cooling Conference* (*Conférence sur le chauffage et le rafraîchissement solaire passif*). Organisée par le groupe « énergie solaire » du Los Alamos Scientific Laboratory, sous la direction de Balcomb, elle réunit l'intégralité des principaux acteurs américains de la conception solaire passive². Plus de 600 personnes venues de tous les États-Unis y assistent³. Les différentes communications faites à cette conférence couvrent « pratiquement tous les projets solaires passifs connus⁴ » en 1976, et même les réalisations de Trombe à Odeillo-Font-Romeu qui sont présentées comme l'un des « projets étrangers les plus importants⁵ ». Certaines communications prennent la forme de récits, comme celle de Paul Davis à propos de sa maison et des techniques à thermosiphon⁶, mais d'autres présentations qui concernent la simulation thermique sont particulièrement techniques et mobilisent d'importantes compétences en mathématiques. Si aucun témoignage ne permet

1 R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 11.

2 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 *Ibid.*

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The numerous presentations covered virtually every known passive solar project »

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « most significant foreign project »

6 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 40-45 in : *ibid.*

d'affirmer que des architectes français étaient présents à cette édition, les actes de cette conférence ont été diffusés en France.

Cette première édition des *Passive Solar Conferences* contribue à définir un domaine de recherche scientifique et technique propre aux techniques solaires passives et à la conception bioclimatique. Si les performances et les améliorations possibles de ces techniques sont abondamment discutées, certains architectes proposent pour la première fois des méthodes de conception permettant d'intégrer ces techniques à la pratique des architectes. C'est le cas de Jeffrey Cook (1934-2003), qui présente des « stratégies de conception pour le contrôle solaire¹ » en s'appuyant notamment sur *Design with Climate* d'Olgyay. Il insiste sur l'importance des « critères bioclimatiques² » (« *bioclimatic criteria* ») et encourage l'enseignement du contrôle solaire dans les écoles d'architecture, par l'intermédiaire d'exercices sur la conception des protections solaires inspirés des premiers travaux de Victor et Aladár Olgyay³. La première édition des *Passive Solar Conferences* marque à la fois l'apparition d'un champ de recherche sur les techniques solaires passives et sur les méthodes de conception à partir de ces techniques, souvent dérivées de l'approche bioclimatique imaginée par Olgyay. Le but de cet événement est à la fois de montrer l'originalité des techniques solaires passives et de distinguer le champ de recherche sur ces techniques de l'ensemble des recherches sur les applications de l'énergie solaire qui foisonnent durant cette période.

À partir de 1976, ces grandes conférences consacrées à la conception solaire passive seront organisées annuellement aux États-Unis. En 1977, un congrès organisé à Aspen dans le Colorado sur le thème de l'architecture solaire réunit plus de 500 personnes⁴. David Wright, Mazria et de très nombreux autres architectes participent à la deuxième édition des *Passive Solar Conferences* qui est organisée à Philadelphie en mars 1978 par le ministère de l'Énergie du gouvernement américain et la section américaine de l'ISES. Envisagée comme un état de l'art des techniques solaires passives, cette conférence est un événement important qui réunit un nombre de participants et de spectateurs bien supérieur à celle de 1976⁵. En plus des participants déjà présents en 1976, on peut citer Ralph Knowles, Mária Telkes, Day Chahroudi

1 J. Cook, « Design Strategies for Solar Control », p. 63-69 in : *ibid.*

2 *Ibid.*, p. 63.

3 *Ibid.*, p. 67-68.

4 G. Franta *et. al.* « Preface », p. III in : G. E. Franta, K. R. Olson (éds.) *Solar Architecture. Proceedings of the Aspen Energy Forum 1977, May 27, 28 and 29, 1977, Aspen, Colorado*, Ann Arbor : Ann Arbor Science, 1978. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

5 D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

ainsi que Lisa Heschong, architecte auteure du célèbre ouvrage *Architecture et volupté thermique* qui va contribuer à promouvoir une approche sensible des phénomènes thermiques¹.

Cet état de l'art des techniques solaires passives est l'occasion d'inscrire le développement de ces techniques dans une évolution historique et de légitimer les recherches dans ce domaine en montrant que certaines de ces techniques ont déjà été étudiées par le passé. C'est notamment l'objet de la communication de Yellott et de celle de van Dresser, qui est consacrée à l'architecture vernaculaire et traditionnelle². Cette volonté de produire un état de l'art complet des techniques solaires passives et d'inscrire leur évolution dans la continuité des productions vernaculaires et des recherches de différents inventeurs au XIX^e siècle est remarquable. Elle invalide la thèse de l'historien Reyner Banham qui soutient que les acteurs de cette période ignoraient complètement les techniques solaires passives antérieures et les productions architecturales passées. Sur un ton particulièrement hostile, Banham écrit en effet en 1984 :

« Ces fanatiques de l'énergie solaire "passive" étaient si peu préoccupés de l'histoire et des traditions de l'architecture que la plupart d'entre eux n'avaient aucune idée même de la préhistoire immédiate du solaire et ignoraient les expériences fructueuses menées dans les années 40. On peut cependant leur pardonner de n'avoir pas connu l'un des grands bâtiments solaires les plus aboutis et les plus réussis des années 60³ ».

Or il s'avère que les réalisations de George F. Keck des années 1940, auxquelles Banham fait référence, ont été longuement présentées par Yellott en 1978 lors de la première conférence qui introduit cet événement⁴. De même, l'annexe de l'école secondaire de Saint-Georges à Wallasey, qui date du début des années 1960 et qu'évoque également Banham, avait fait l'objet d'une communication spécifique en 1976⁵. Si le public qui participait à ces conférences ne représente pas l'intégralité des « fanatiques » de l'énergie solaire passive, ce souci de présenter des

1 L. Heschong, *Thermal Delight in Architecture*, Cambridge/London : The MIT Press, 1979. Trad. *Architecture et volupté thermique*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. de l'anglais par H. Guillaud, 1981, 93 p.

2 P. van Dresser, « The Growth of Folk Solar Architecture in New Mexico », p. 781-783 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 278.

4 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 2-4 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

5 J. E. Perry Jr., « The Wallasey School », p. 223-237 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

techniques, de communiquer leurs performances et de les inscrire dans une évolution plus générale invalide les thèses de Banham sur les acteurs de la conception solaire passive.

Plus généralement, il apparaît que Banham ignore complètement que les recherches sur les techniques solaires passives se sont structurées comme un champ de recherche scientifique et technique. S'il est vrai que les acteurs accordaient une préférence délibérée aux technologies « basses¹ », elle n'impliquait nullement « un rejet du patrimoine technologique de l'Occident² » comme il l'affirme. L'étude du système *Skytherm*, qui peut être considéré comme une « technologie basse », faisait appel aux instruments les plus aboutis à disposition des ingénieurs (thermocouples, modélisation par réseau thermique...). Les analyses des performances du mur Trombe ou du système *Drumwall* réalisées par Balcomb et son équipe au LASL, et présentées lors des *Passive Solar Conferences*, mobilisaient les ordinateurs les plus performants de l'époque afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques. À l'inverse de ce qu'affirme Banham, l'intérêt pour les « technologies basses » hérité de la contre-culture ne supposait pas un rejet des technologies de mesure et de simulation les plus avancées puisqu'elles étaient garantes de l'efficacité des techniques solaires passives, et par extension de leur crédibilité auprès des ingénieurs ou des architectes qui étaient susceptibles de les reproduire et parfois de les améliorer. Les participants des *Passive Solar Conferences* avaient à cœur de justifier les performances des systèmes mis au point en vue du chauffage ou du rafraîchissement des habitations, et éventuellement de circonscrire les climats où les performances de ces systèmes pouvaient être considérées comme satisfaisantes. Ce type d'événement servait à discuter de ces résultats.

Les différentes *Passive Solar Conferences* ont permis de constituer progressivement des règles de conception et une meilleure connaissance des techniques solaires passives. Balcomb estimait même qu'en accumulant les résultats et en généralisant l'emploi des simulations par ordinateur, il serait possible d'accélérer la mise au point de ces règles « sans attendre plusieurs générations³ ». En définissant un champ de recherche sur les techniques solaires passives relativement autonome par rapport aux autres recherches sur les énergies alternatives à cette période, les *Passives Solar Conferences* ont permis de constituer progressivement un ensemble

1 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 278.

2 *Ibid.*

3 J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation as a Design Tool », p. 239 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) Traduction personnelle, citation originale : « without waiting through several generations. »

de connaissances sur ces techniques en capitalisant sur les résultats obtenus par les ingénieurs, architectes, inventeurs et centres de recherche qui communiquaient au même titre à ces événements. L'ambition de ces conférences était de transmettre des connaissances techniques accessibles mais suffisamment rigoureuses, afin de crédibiliser les performances des techniques solaires passives.

III.1.3.4. Les *Passive Solar Conferences* et la diffusion de la conception bioclimatique en France

À partir de 1978, les *Passive Solar Conferences* ont fédéré un nombre croissant d'architectes et d'ingénieurs venus d'Europe. La troisième édition de cet événement intitulée « *Passive Solar Takes Off* » (« Le solaire passif prend son envol ») a lieu du 11 au 13 janvier 1979 à San José, en Californie¹, qui mène à l'époque une politique avant-gardiste de promotion de l'énergie solaire passive². Cette troisième édition qui réunit plus de 1 300 spectateurs marque l'apogée des *Passive Solar Conferences* et confirme l'avance des États-Unis dans les recherches sur les techniques solaires passives. Quelques architectes et ingénieurs français y assistent : c'est le cas de Traisnel, co-auteur de l'ouvrage *La Face cachée du soleil* et de Georges Wursteisen, accompagné par Bazan qui est alors professeur à l'école d'architecture de Montpellier³. Très enthousiasmés par la qualité des présentations, Wursteisen et Bazan rédigent à leur retour en France un dossier intitulé *L'Architecture solaire passive aux U.S.A., Californie et Nouveau-Mexique* pour cette école d'architecture, qui résume l'essentiel des techniques et des réalisations présentées lors de cet événement⁴. Selon eux, l'avance prise par les architectes américains dans le développement des techniques solaires passives tient à trois caractéristiques importantes de leur pratique :

- « l'innovation technique appuyée sur le goût de l'expérimentation pratique⁵ ; »
- « la confrontation du produit de leurs recherches avec d'autres chercheurs dans la même discipline et une collaboration étroite avec les chercheurs des autres disciplines⁶ ; »

1 H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 J. Cook, « *Passive Solar Patterns in 1978* », p. 505 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 Entretien avec Georges Wursteisen, le 15/10/2019 à Cabestany.

4 P. Bazan, G. Wursteisen, *L'Architecture solaire passive aux U.S.A., Californie et Nouveau Mexique*, s.l., 1979, 14 p. (Archives personnelles de Georges Wursteisen – Cabestany)

5 *Ibid.*, p. 1.

6 *Ibid.*

- « le souci de solutions très économiques¹. »

Le deuxième point est particulièrement important et caractérise l'attitude des architectes et des ingénieurs associés à la conception solaire passive, qui se considéraient comme des chercheurs et qui profitaient des *Passive Solar Conferences* comme d'un événement de présentation de leur travail, mais aussi de collaboration voire de confrontation avec les autres architectes, ingénieurs ou chercheurs. De par l'importance de ces échanges, Wursteisen et Bazan affirment qu'« architecture solaire passive et démarche scientifique rigoureuse sont loin d'être contradictoires aux U.S.A.² ». Bien que cette approche expérimentale soit systématique, elle ne tend pas à standardiser les systèmes proposés : la diversité des techniques solaires passives montre que « l'adaptation bio-climatique n'est pas une formule magique³ », mais « le résultat d'une démarche originale dans chaque cas⁴. » Les observations de Wursteisen et Bazan à propos du développement des techniques solaires passives aux États-Unis mettent en évidence l'importance des *Passives Solar Conferences*, qui héritent d'une part de l'ambition de diffuser des techniques économiques, dans la continuité de la conférence de Rome en 1961 et de la contre-culture, et d'autre part des exigences scientifiques de confrontation déjà portées par les réunions de l'ISES.

Les premières *Passive Solar Conferences* ont profondément marqué les architectes et les ingénieurs français associés à la conception bioclimatique et les actes de ces conférences ont circulé en France⁵. D'autres architectes et ingénieurs français comme Gerber⁶ ou Alain Cordier⁷ participeront aux éditions suivantes des *Passives Solar Conferences*, bien que le succès de ces événements se soit progressivement atténué au début des années 1980, avec le désintérêt progressif pour toutes les énergies alternatives. Des événements semblables aux *Passives Solar Conferences* ont été organisés en Europe à partir de la fin des années 1970. C'est le cas de la conférence internationale consacrée aux « technologies solaires du bâtiment⁸ » organisée en

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 14.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 Entretien avec Georges Wursteisen, le 15/10/2019 à Cabestany.

6 M. Gerber, « Solar and Regional Architecture », p. 758 in : G. Franta (éd.), *Proceedings of the 4th National Passive Solar Conference, Oct. 3-4-5, 1979, Kansas City, Missouri*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1980.

7 A. Cordier, C. Daroui, « Visualization by Holographic Interferometry of Temperatures in Passive Components », p. 205-209 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980, op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

8 United Nations Educational and Scientific Organization, North East London Polytechnic (éds.), *International Conference & Exhibition on Solar Building Technology, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

1977 à Londres, qui réunit Balcomb, van Dresser et de nombreux architectes français, de celle qui s'est déroulée à Cannes en 1982¹, et plus tard des conférences du PLEA² (*Passive and Low Energy Architecture*).

Des événements d'une moindre ampleur mais inspirés des *Passive Solar Conferences* ont été organisés en France durant la même période. Certains colloques sur l'architecture solaire, comme ceux qui se sont tenus à Collioure en 1977 puis en 1978, ont connu un succès très important³ et l'intérêt pour l'énergie solaire paraissait alors « invraisemblable⁴ » pour les organisateurs de ces événements. Un des événements les plus importants est vraisemblablement le colloque intitulé « Énergies nouvelles et développement régional » qui s'est tenu à Castres en juin 1978⁵. Parmi les participants, on trouve Trombe, Gerber, Wursteisen, Laignelot et Cordier, ainsi que l'architecte américain David Wright, qui a été invité en France par Gerber afin de présenter ses réalisations et son approche de la conception bioclimatique⁶. Les retranscriptions des échanges qui ont eu lieu lors de cet événement montrent que les discussions ont essentiellement concerné les performances des différentes techniques solaires passives : Trombe et Jean-Pierre Cordier ont par exemple débattu du rôle des parois massives dans l'inertie thermique d'une serre⁷. Ces discussions étaient vraisemblablement très semblables à celles qui avaient lieu lors des réunions de l'ISES ou des *Passive Solar Conferences*, puisqu'elles permettaient de confronter des résultats divergents et d'affiner progressivement la compréhension des techniques solaires passives. D'autres événements de même nature seront organisés par la suite au début des années 1980⁸, avant que l'intérêt pour ces sujets disparaisse complètement⁹.

Des événements comme les *Passive Solar Conferences* ou les colloques internationaux étaient aussi l'occasion d'organiser des visites de certaines constructions solaires passives. Lors de la première édition à Albuquerque, près de 600 personnes participent à une visite des

1 Commission des Communautés européennes (éd.), *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 S. Yannas, A. Bowen, (éds.) *Passive and Low Energy Architecture. Proceedings of the Second International PLEA Conference. Crete, Greece 28 June-1 July 1983*, Oxford : Pergamon Press, 1983, 853 p.

3 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 34.

4 Entretien avec Mimi Tjoyas et David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan.

5 Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 68-88 in : *ibid.*

7 J. P. Cordier, « Présentation de plusieurs projets de maisons solaires bioclimatiques », p. 72 in : *ibid.*

8 D. Roditi, *Autobiographie*, s. l. n. d., n. p. (Archives personnelles de David Roditi – Perpignan)

9 Entretien avec Mimi Tjoyas et David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan.

principales réalisations solaires passives situées à Santa Fe et à Albuquerque¹. Ces visites constituent un vecteur important de transmission et d'échange entre architectes et ingénieurs. C'est lors d'une visite à Santa Fe, à l'occasion de sa participation à la troisième édition des *Passive Solar Conferences*, que Wursteisen découvre la technique des capteurs à air sans inertie². Indépendamment de ces événements, de nombreux architectes et ingénieurs français associés à la conception bioclimatique ont visité les réalisations situées au Nouveau-Mexique, en Arizona et en Californie durant les années 1970 et le début des années 1980 : c'est notamment le cas de Bardou, Arzoumanian et Hubert Guillaud³, de Marc Vaye et Frédéric Nicolas⁴, de Michel Raoust⁵ et de Robert Célaire⁶. Ces visites, qui prenaient la forme de véritables tours, étaient l'occasion de rencontrer les architectes ou ingénieurs américains connus grâce à des publications, comme Baer, et de collecter des photographies et des documents sur les techniques passives qui circulaient de main en main.

Pour de nombreux architectes et ingénieurs français, Santa Fe apparaît comme un lieu mythique qui a concentré de nombreuses réalisations solaires passives, conçues par David Wright ou van Dresser⁷. Il existe véritablement un « mythe de Santa Fe⁸ » lié à la conservation d'un style et des techniques traditionnelles de construction en terre crue dans cette région qui a marqué de nombreux architectes⁹. Pour Frédéric Nicolas, le Nouveau-Mexique « était un peu la Mecque¹⁰ » en ce qui concerne les constructions solaires passives. Mais si cette région a fasciné de nombreux acteurs français, les réalisations de Trombe à Odeillo-Font-Romeu en France semblent avoir exercé une fascination analogue sur les architectes et les ingénieurs américains. Wursteisen se rappelle avoir conduit lui-même l'architecte américain Mazria et l'ingénieur Balcomb à Odeillo-Font-Romeu, afin qu'ils puissent visiter les premières

1 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 Entretien avec Georges Wursteisen, le 15/10/2019 à Cabestany.

3 C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 73 ; Entretien avec Patrick Bardou, le 09/10/2019 à Marseille.

4 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 13/06/2019 à Paris ; C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 173.

5 Entretien avec Michel Raoust, le 21/02/2020 à Paris.

6 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

7 *Ibid.*

8 C. Wilson, *The Myth of Santa Fe: Creating a Modern Regional Tradition*, Albuquerque : University of New Mexico, 1997, p. 291-296.

9 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, [1ère éd. 1977], Santa Fe : The Lightning Tree, 1979, p. 79-80 ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 35-45.

10 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

réalisations employant le mur Trombe¹. Pour lui, les acteurs américains considéraient la visite de ces réalisations comme un genre de « pèlerinage² ». Pour les acteurs de la conception solaire passive, Odeillo-Font-Romeu en France et Santa Fe aux États-Unis, étaient appréhendés comme des hauts lieux de culture, à l'origine du développement des techniques solaires passives. Ils paraissaient chargés d'une importante dimension symbolique sur laquelle nous reviendrons.

Ces événements et ces visites ont eu une importance cruciale dans la structuration d'un réseau d'acteurs associés à la conception bioclimatique et dans la transmission puis la diffusion des connaissances relatives aux techniques solaires passives. Les actes des conférences évoquées précédemment ont été des documents de travail pour certains architectes, dans la mesure où ils regroupaient différentes méthodes de calcul, mises au point par Balcomb et Mazria notamment, ainsi qu'un aperçu très détaillé du fonctionnement de certaines techniques. C'est notamment à partir des connaissances scientifiques et techniques diffusées lors de ces conférences que les principaux manuels que nous avons évoqués ont été rédigés.

Ces chapitres ont mis en évidence les motivations des acteurs de la conception bioclimatique, ainsi que les modes de diffusion de cette méthode de conception et des techniques qu'elle mobilise par l'intermédiaire des manuels et des événements qui rassemblaient les principaux architectes et ingénieurs américains et français. Nous avons particulièrement insisté sur la spécificité des connaissances scientifiques et techniques diffusées par l'intermédiaire des publications et des conférences internationales, qui devaient être à la fois appropriables mais suffisamment rigoureuses. Les chapitres suivants sont consacrés à l'étude de la conception bioclimatique telle qu'elle a été concrètement comprise et employée, entre autres par les architectes et les ingénieurs français à partir des éléments que nous avons évoqués précédemment. Ces acteurs partageaient la majorité des motivations que nous avons signalées, notamment le désir de minimiser l'emploi des énergies fossiles pour le fonctionnement des constructions qu'ils ont conçues. Nous verrons que les architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive peuvent être caractérisés par au moins deux traits communs : le souhait de respecter les contraintes dimensionnelles des techniques solaires passives tout en privilégiant leur intégration esthétique, et le désir de vérifier la pertinence de

1 Entretien avec Georges Wursteisen, le 15/10/2019 à Cabestany.

2 *Ibid.*

leurs choix techniques *a posteriori* par le recours à l'étude expérimentale de leurs réalisations via leur instrumentation.

III.2. Concevoir et construire suivant la conception bioclimatique

L'ensemble des publications et des événements évoqués précédemment ont contribué à diffuser la conception bioclimatique et à propager l'intérêt pour cette méthode de conception chez de nombreux architectes et ingénieurs. Nous avons pu nous entretenir avec la majorité des architectes et ingénieurs français associés à la conception bioclimatique entre le milieu des années 1975 et le début des années 1980 afin de comprendre comment ils avaient progressivement intégré la conception bioclimatique à leur pratique professionnelle pour la mise au point de leurs projets. La conception d'un projet en architecture nécessitant des résolutions et des compromis, notre hypothèse principale est que l'utilisation de la conception bioclimatique a été revendiquée comme une démarche de conception plus que comme une véritable méthode, selon une approche essentiellement qualitative des phénomènes climatiques et thermiques.

Les architectes associés à la conception bioclimatique ont également revendiqué l'emploi des techniques solaires passives, qu'ils ont systématiquement préférées aux techniques solaires actives. Nous verrons que cette revendication s'explique à la fois par des motivations éthiques, mais aussi par la possibilité de concilier l'emploi de ces techniques avec certaines exigences esthétiques et architecturales. Lorsqu'elles ont été employées, ces techniques ont bénéficié d'une mise en œuvre soignée, les architectes étant soucieux de valoriser les performances de leurs réalisations et de justifier l'intérêt de la conception bioclimatique, ainsi que le surcoût éventuellement engendré par l'emploi de techniques solaires passives auprès de leurs clients. Bien qu'ils s'en soient tenus à d'importantes approximations pour la conception de leurs réalisations, ne disposant pas de méthodes de calcul très performantes, les architectes associés à la conception bioclimatique peuvent être caractérisés par une grande sensibilité aux phénomènes thermiques et par le souci de justifier la légitimité des choix qu'ils effectuaient.

III.2.1. La démarche bioclimatique et le problème de l'intégration des techniques solaires passives

III.2.1.1. Une démarche qualitative et déductive

En 1963, Victor Olgyay envisageait la conception bioclimatique comme une méthode regroupant une série de « procédures¹ » qui puisse être employée par les architectes pour la résolution et la mise au point de leurs projets. Les différents manuels que nous avons évoqués présentaient encore la conception bioclimatique et solaire passive comme pouvant être décomposée en une série de procédures, moins strictes que celles d'Olgyay, mais néanmoins contraignantes à suivre. En pratique, les contraintes qui pèsent sur un projet en architecture (programme, budget...) ne permettent pas d'employer intégralement ce type de méthode et des compromis doivent nécessairement être trouvés entre ce qui peut être déduit par la conception bioclimatique et les contraintes qui s'imposent à un projet, et qui ne peuvent être négligées.

La conception bioclimatique, d'abord envisagée comme une méthode – c'est-à-dire comme une suite d'opérations ordonnées suivant une procédure – a évolué vers une démarche, moins rigide et plus apte à s'intégrer aux contraintes d'un projet. Cette démarche se caractérise par le souci de justifier le plus possible l'intégralité des choix de conception effectués par référence à des phénomènes climatiques, microclimatiques ou physiologiques. Ce point nous paraît fondamental : si l'on envisage la conception d'un objet comme le résultat d'une série de résolutions ou de choix techniques, la démarche bioclimatique vise à informer le plus possible ces résolutions par le recours à des phénomènes qui relèvent de la climatologie, de la thermique des matériaux ou de la physiologie. *A posteriori*, ce sont ces mêmes phénomènes qui justifient les résolutions et les choix effectués. La démarche bioclimatique se caractérise par une référence constante à des phénomènes d'ordre climatique.

En règle générale, il semblerait que les architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive aient privilégié une analyse qualitative du climat local et du microclimat, sur laquelle ils s'appuyaient ensuite pour effectuer un certain nombre de choix et pour déduire l'emploi d'une ou plusieurs techniques solaires passives, dont ils fixaient ensuite les dimensions. Cette procédure, très simplifiée, correspond à celle présentée dans le manuel de David Wright². Bien que les architectes aient pu occasionnellement recourir aux données

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 10.

2 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, *op. cit.*, p. 31, 219-220.

météorologiques de la station la plus proche du site où était envisagée une construction, afin d'en déterminer qualitativement le climat local à partir de données numériques comme la durée d'ensoleillement annuel ou la fréquence des vents, les choix qu'ils effectuaient étaient essentiellement guidés par une connaissance du « type de temps¹ » du lieu considéré. L'étude empirique du microclimat pouvait être complétée par le recueil de témoignages auprès d'habitants ou d'agriculteurs².

La méthode présentée par Victor Olgyay pour traduire numériquement les données météorologiques en choix techniques et architecturaux³ n'a donc jamais été reprise par la suite, les architectes préférant raisonner par déduction à partir du type de temps et du microclimat d'un lieu, sans recourir à ces procédures complexes et contraignantes. Cette prise en compte du type de temps nécessite cependant une série longue d'observations afin de caractériser assez précisément le climat régional. Un type de temps désigne la série des événements météorologiques « se produisant fréquemment et cycliquement sur un même lieu et se traduisant aussi par des effets analogues⁴. » Le type de temps de la Provence par exemple, peut être caractérisé par un ensoleillement important, les effets du mistral et d'un vent fort de secteur nord-ouest, ainsi qu'une faible amplitude des températures bien que l'humidité soit généralement faible⁵. Cette approche par types de temps, qui ne se prête cependant pas à tous les climats, est essentiellement qualitative et consiste à relever les singularités d'un climat régional, local ou d'un microclimat.

La connaissance des types de temps d'une région était facilitée par le fait que de nombreux architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive ont réalisé plusieurs projets dans une même région ou zone géographique, qu'ils habitaient souvent eux-mêmes : c'est par exemple le cas de David Wright à Santa Fe, de Gerber dans les Corbières et de Cordier dans la région toulousaine. Leur connaissance des types de temps était acquise par leur expérience, les observations qu'ils effectuaient eux-mêmes et sur leurs propres réalisations, plus que par l'étude de longues séries de données météorologiques, parfois difficilement accessibles. Comme l'explique Jean-Pierre Ménard à propos des architectes associés à la conception bioclimatique, « habiter vingt ou trente ans un lieu permet de connaître, de prédire

1 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 15.

2 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 197-199.

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 126-152.

4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 123.

5 *Ibid.*, p. 15.

le climat¹. » La prise en compte des brises et vents locaux est particulièrement caractéristique de cette acquisition de connaissance par l'observation et l'expérience. Les architectes français Laignelot et Gerber, qui ont tous deux travaillé dans les Corbières, considèrent ces vents locaux (cers, marin) comme particulièrement déterminants et les mentionnent à de nombreuses reprises pour justifier leurs choix d'orientation et la morphologie de leurs constructions². Ce type d'information pouvait être obtenu par l'observation attentive du microclimat lors des visites de sites, la végétation étant par exemple considérée comme un des « indicateurs permanents³ » les « plus riches d'enseignement⁴ » pour la connaissance des vents locaux, de leur fréquence et de leur intensité. Exceptionnellement, plusieurs réalisations construites successivement sur des sites proches ou analogues permettaient d'évaluer *a posteriori* les choix effectués et d'apporter des modifications aux réalisations ultérieures.

Le développement d'un projet suivant l'approche bioclimatique consiste à opérer un ensemble de choix suivant les règles que nous avons évoquées précédemment (orientation, morphologie...). Le choix d'un site favorable constitue la première résolution technique cruciale pour le développement d'un projet, dont dépendent de nombreux choix techniques suivants. L'étude des microclimats et la compréhension des phénomènes microclimatiques ont précisément pour fonction de fournir des critères de décision afin de sélectionner un site favorable ayant, par exemple, un minimum de masques garantissant une exposition au rayonnement solaire maximale en hiver dans les zones climatiques froides ou tempérées. Pour ce faire, l'observation de l'exposition du site à différentes périodes de l'année est présentée comme indispensable par l'ensemble des architectes. Afin de faciliter l'observation de l'ensoleillement d'un site, Mazria propose de reporter sur un diagramme solaire les masques créés par les éléments environnants (arbres, collines, autres constructions...), permettant ainsi d'estimer la quantité de rayonnement solaire reçu en un point donné sur le site selon une orientation sud et pour chaque moment de l'année⁵ (*figure 103*). Il écrit :

1 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, *op. cit.*, p. 197.

2 R. Laignelot, « L'Expérience d'un architecte habitant sa propre maison solaire », p. 73 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) ; M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 65-67.

3 A. Guyot, « Le Vent et la ventilation en architecture » in : J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 28-31.

4 *Ibid.*, p. 30.

5 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 255-256.

« Pour bien comprendre et utiliser l'influence du soleil dans le choix et le traitement d'un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du soleil dans le ciel. Cette information est absolument nécessaire pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'aménagement des parties extérieures voisines, la disposition des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires, de la végétation et des capteurs solaires¹. »

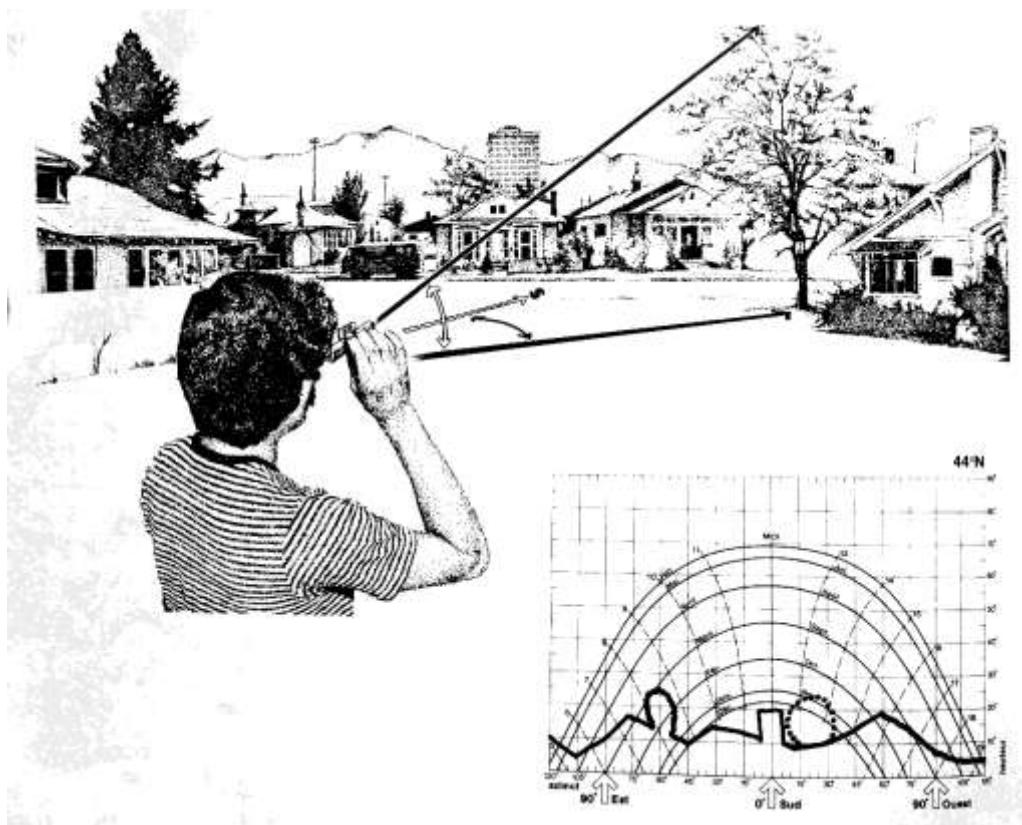


Figure 103 : Exemple d'utilisation d'un diagramme solaire pour le tracé des masques permanents sur un site. (E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1981, p. 256)

La recherche d'une exposition maximale au rayonnement solaire dans les zones froides et tempérées nécessite le choix d'un site en dehors d'une agglomération urbaine, sur un terrain surélevé ou dégagé pour être à l'écart des masques créés par les constructions voisines. Ceci explique que la majorité des constructions bioclimatiques réalisées durant la période qui nous intéresse soient généralement des maisons individuelles, construites en dehors des agglomérations ou dans un tissu pavillonnaire, ce qui a justifié certaines critiques par la suite qui mettaient en évidence l'inadéquation de la conception bioclimatique ou solaire passive avec

1 *Ibid.*, p. 239.

les problématiques de la construction en milieux urbain ou dense¹. Ce rejet des problématiques urbaines est particulièrement manifeste chez certains architectes associés à la conception bioclimatique, comme David Wright, qui affirme que c'est « dans les sites sauvages ou naturels que l'intégration à la nature est la plus aisée². » L'inadéquation entre les exigences d'exposition au rayonnement solaire dans les climats tempérés ou froids, et la nécessaire densité du parcellaire en milieu urbain a abouti à quelques tentatives pour incorporer un « droit au soleil³ » dans les documents urbanistiques réglementaires dès les années 1970⁴, notamment aux États-Unis⁵.

III.2.1.2. L'importance du confort d'hiver et le choix des techniques solaires passives

Une fois le choix d'un site réalisé, le problème qui se pose au concepteur peut être résumé de la manière suivante : « comment peut-on, en n'utilisant que des dispositions purement architecturales, fournir aux occupants des bâtiments que l'on construit aujourd'hui des ambiances intérieures confortables, en dépensant le minimum d'énergie⁶ ? » L'opération de déduction de ces techniques est réalisée à partir de l'identification des besoins majoritaires de la construction sur une année, en vue d'y maintenir une ambiance confortable le plus simplement possible et en minimisant le recours aux systèmes de chauffage ou de climatisation artificiels, qui restent néanmoins inévitables durant certaines périodes⁷. Ainsi, lorsque l'utilisation de ces systèmes est nécessaire, « l'architecture bioclimatique permet de dépenser une quantité d'énergie réduite (chauffage ou climatisation) et de réaliser des économies⁸. »

Les périodes de chauffage étant à l'époque considérées comme bien supérieures à celles de rafraîchissement aux latitudes tempérées, ce sont d'abord les techniques solaires passives de chauffage qui ont été majoritairement employées dans les constructions bioclimatiques et solaires passives en France, comme aux États-Unis, à quelques exceptions près. Pour ces climats, les problèmes du confort d'hiver primaient ceux du confort d'été, cette considération

1 C. Chaline, J. Dubois-Maury, *Énergie et urbanisme*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1983, p. 102.

2 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 33. Sur les origines de cette idéologie anti-urbaine aux États-Unis, voir : C. Maumy, *Usonia ou le mythe de la ville-nature américaine*, Paris : La Villette, (coll. Penser l'espace), 2008, 239 p.

3 Entretien avec Robert « Bob » Laignelot, le 28/01/2020 à Ventenac-Cabardès.

4 C. Chaline, J. Dubois-Maury, *Énergie et urbanisme*, op. cit., p. 107.

5 D. Siret, *L'architecture au soleil. De l'hygiénisme à la ville durable*, op. cit., p. 107-108.

6 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 5.

7 *Ibid.*, p. 8 ; J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 17.

8 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 8.

étant invalidée pour d'autres latitudes et dans d'autres climats (climats froids, tropicaux...). Les projets dans les climats tempérés étaient donc structurés autour d'une ou plusieurs techniques solaires passives de chauffage, les techniques de rafraîchissement étant à cette époque considérées comme secondaires, car utilisées seulement une petite partie de l'année, bien que des systèmes de ventilation naturelle aient été systématiquement intégrés. Même s'ils ont parfois été sous-estimés, les besoins de rafraîchissement dans les constructions bioclimatiques ou solaires passives étaient donc toujours anticipés et faisaient l'objet d'une étude spécifique (ventilation transversale, inertie...).

Ce privilège accordé aux techniques solaires passives de chauffage s'explique d'abord par l'importance des besoins de chauffage relativement aux besoins de rafraîchissement aux latitudes qui nous concernent, et par le fait que l'isolation thermique des constructions était techniquement limitée et insuffisante à cette époque en France comme aux États-Unis, même dans les constructions bioclimatiques ou solaires passives pourtant très bien isolées par rapport aux standards de cette période¹. Le chauffage pour le confort d'hiver des habitations était alors considéré comme le principal problème à résoudre. La recherche de la satisfaction des besoins de chauffage peut aussi s'expliquer par l'importance psychologique accordée au chauffage et le symbolisme riche associé au foyer dans la culture occidentale². Aujourd'hui et pour les mêmes latitudes, certains ingénieurs considèrent que l'intégration d'une technique de rafraîchissement prime sur celle d'une technique de chauffage, étant donné le développement de l'isolation thermique et surtout le changement climatique, qui amplifie le problème du confort d'été en durée et en intensité³.

En pratique, le choix d'une ou plusieurs techniques solaires passives de chauffage comporte une dimension rationnelle, justifiée par le climat, l'orientation ou son coût, et une dimension irrationnelle, notamment la sensibilité et la préférence de l'architecte pour une technique qu'il apprécie ou qu'il a déjà expérimentée, voire un désir de son client. Différents outils ont néanmoins été mis au point pour assister le concepteur dans le choix des techniques les mieux appropriées en fonction de ses observations climatiques et microclimatiques. C'est le cas des diagrammes bioclimatiques mis au point par Olgyay et par Givoni qui avaient

1 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

2 S. Marot, « Hearthbreaking. Sur l'évacuation du foyer de l'architecture », *Marnes, documents d'architecture*, vol. 4, 2016, p. 415-467. ; L. Hescong, *Architecture et volupté thermique*, op. cit., p. 28-29.

3 *Ibid.*

essentiellement une fonction indicative¹. D'autres outils du même type avaient été mis au point à la même période par Carl Mahoney pour la conception dans les zones tropicales², mais n'ont manifestement jamais été utilisés dans les climats tempérés. Il est plus vraisemblable que les architectes choisissaient de directement spatialiser leur choix à travers des croquis ou des esquisses de plans-masses permettant de situer les éléments sur le site³ (espaces-tampons, brise-vent...) plutôt que par l'intermédiaire de ces outils analytiques relativement complexes à employer. Ce type de croquis était utilisé par David Wright⁴ (figure 104) ou Anthony Adams⁵ (figure 105). Une fois choisies, ces techniques devaient ensuite être dimensionnées selon certaines approximations et règles de conception afin d'être correctement intégrées à la construction définitive.

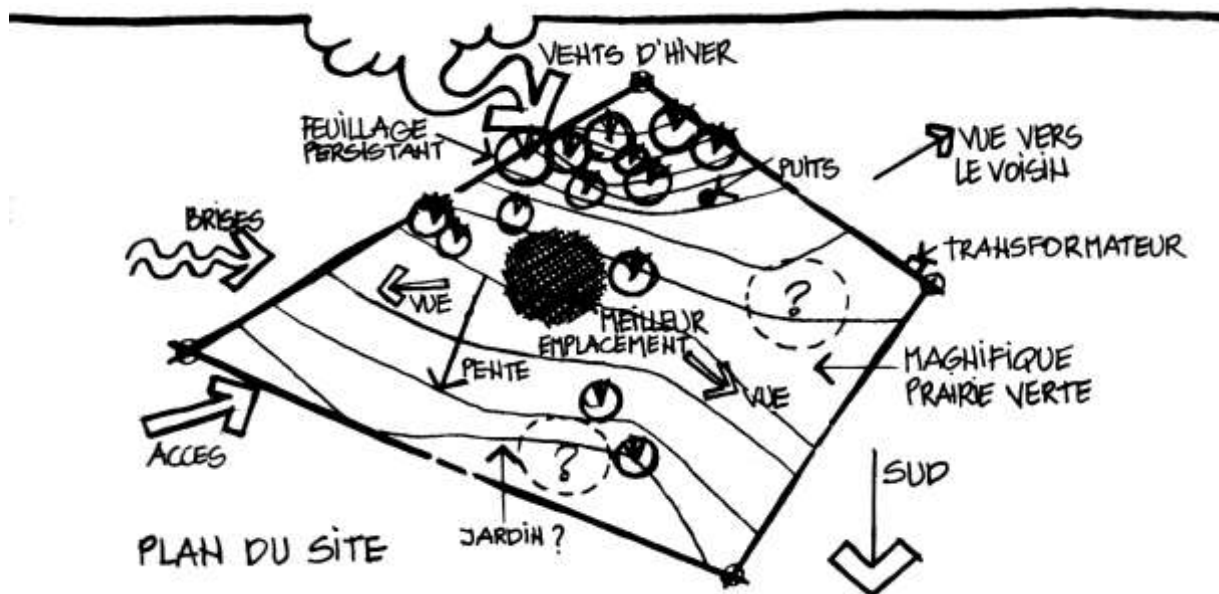


Figure 104 : Exemple de croquis de conception de D. Wright.

(D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, Roquevaire : Parenthèses, trad. et adaptation de l'anglais par P. Bazan, 1979, p. 220)

- 1 R. Dabat, A. Guyot, J.-L. Izard, R. Perrin, « Architecture et climat », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 31. ; J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 47-50.
- 2 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, *op. cit.*, p. 239-246, 306-309.
- 3 P. Fernandez, *De l'architecture bioclimatique au développement urbain durable*, H.D.R., Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007, p. 14-16. Dir. O. Simonin.
- 4 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, *op. cit.*, p. 220.
- 5 *Le Sauvage*, « La Maison écologique », *op. cit.*, p. 51.

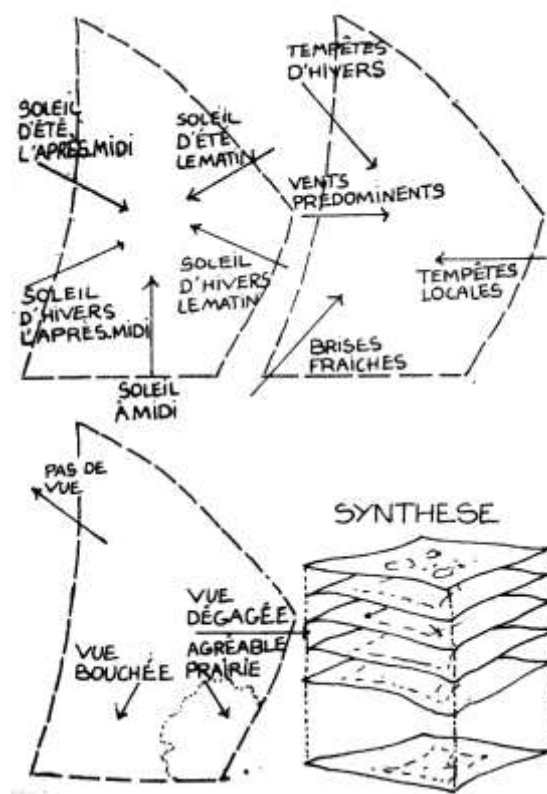


Figure 105 : Exemple de croquis de conception d'A. Adams.
(*Le Sauvage*, « La Maison écologique », n° 34, octobre 1976, p. 51)

III.2.1.3. Le problème de l'intégration des techniques solaires passives

Il ressort de l'intégralité des entretiens que nous avons menés qu'un problème central rencontré par l'ensemble des architectes associés à la conception bioclimatique concerne l'intégration esthétique et architecturale des techniques solaires passives. Ce problème, à l'origine de nombreux débats¹, a fait l'objet d'études spécifiques par les architectes à cette période². Ce problème tient au fait que les architectes devaient à la fois conserver les éléments fonctionnels et respecter les règles de dimensionnement parfois contraignantes des techniques solaires passives, mais aussi modifier suffisamment ces techniques pour qu'elles soient intégrées dans les contraintes d'un projet de construction et qu'elles respectent certains critères esthétiques ou architecturaux.

1 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 279-284.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

Cette tension entre la nécessité de conserver les éléments fonctionnels des techniques, tout en les adaptant, explique que les architectes associés à la conception bioclimatique aient généralement été très critiques des constructions dites « solarisées¹ », selon l'expression de Vaye et Nicolas, qui étaient essentiellement des bâtiments conventionnels sur lesquels étaient « plaqués² » des techniques solaires actives sans effort d'intégration esthétique et architecturale³. Certains architectes estiment même que la démarche associée à l'emploi des techniques solaires actives « est non architecturale au sens littéral du terme, puisque ce ne sont pas des éléments propres à l'architecture qui permettent l'utilisation du soleil, mais des équipements d'ingénierie (capteurs, stockage, plomberie, équipements traditionnels pour restitution⁴). » Cette critique des techniques solaires actives concernait aussi les maisons dites « solaires », qui étaient parfois considérées comme étant conçues en contradiction avec d'autres facteurs climatiques déterminants, comme le vent. Elle s'explique également par une défiance vis-à-vis des politiques d'économie d'énergie, qui incitaient à l'achat d'équipements sans exigences relatives à leur intégration : en France, seule l'installation de l'ensemble des composants d'un chauffe-eau solaire (capteur et ballon) permettait de bénéficier d'aides financières, à l'exclusion des systèmes architecturalement mieux intégrés, mais qui n'avaient pas été achetés ni installés en une seule fois⁵.

À l'inverse, les architectes valorisaient les possibilités d'intégration esthétique et architecturale des techniques solaires passives. Le choix des systèmes à gain direct, indirect ou isolé concerne directement le gros œuvre de la construction⁶ et les choix d'orientation, de la volumétrie et des matériaux *mobilisent essentiellement* les compétences généralement associées au métier d'architecte, comme la sensibilité aux volumes, aux proportions ou aux textures. L'intégration des techniques solaires passives permet de valoriser une démarche plus générale, guidée par la recherche de « compromis⁷ » qui caractériserait la conception bioclimatique et qui s'exprimerait par une « synthèse, au moment de la conception, de composants ou de

1 F. Nicolas, M. Vaye, *Recherches sur les enveloppes bioclimatiques*, Paris : Plan Construction, mars 1977, p. 9-10. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 55.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 42.

4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 10. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

5 Entretien avec Georges Wursteisen, le 15/10/2019 à Cabestany.

6 M. Rubinstein, J.-P. Lepoivre, « Recherche scientifique et conception architecturale dans le domaine des composants », p. 402 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles) ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

7 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

systèmes¹. » Ce point de vue s'accorde avec celui des ingénieurs, comme Balcomb, qui reconnaît que les techniques solaires passives « sont architecturalement plus compatibles avec les pratiques de construction normales et esthétiquement plus agréables² ». Il correspond également à l'approche défendue par d'autres ingénieurs, comme Ayoub, qui critique le surcoût engendré par les techniques solaires actives et affirme concevoir des habitations confortables simplement par le « contrôle solaire³ » et la suppression de « l'intermédiaire mécanique⁴ ».

La critique des techniques solaires actives ou des constructions « solarisées » et la valorisation des techniques solaires passives ne nous paraît pas seulement idéologique, mais traduit une problématique propre à la conception bioclimatique, et peut-être plus généralement à toute opération d'invention. Il existe une véritable tension entre cette recherche d'intégration architecturale des techniques passives revendiquée par les architectes, et la nécessité d'en conserver les éléments fonctionnels qui sont susceptibles d'être correctement dimensionnés, sans aboutir à une « juxtaposition de techniques⁵ » dont ils critiquent l'esthétique et la finalité. Du point de vue de la philosophie des techniques, cette tension s'exprime clairement à travers la distinction établie par le philosophe Gilbert Simondon entre un objet technique dit « concret » et un objet dit « abstrait⁶ » que nous avons déjà utilisée. Si dans l'objet « concret » toutes « les fonctions que remplit la structure sont positives, essentielles, et intégrées au fonctionnement de l'ensemble⁷ », celles-ci sont dissociées dans l'objet « abstrait » qui peut être considéré « *partes extra partes*⁸ », c'est-à-dire que ses éléments sont fonctionnellement isolés les uns des autres et travaillent indépendamment de l'ensemble. Selon Simondon, il existe des degrés d'abstraction ou des degrés de concrétisation selon l'intégration relative des différents éléments ou sous-ensembles qui composent un objet technique⁹.

1 *Ibid.*, p. 45.

2 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « architecturally more compatible with normal building practices and aesthetically more pleasing ».

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 81.

4 *Ibid.*

5 J.-L. Izard, *Approche de l'architecture bio-climatique*, p. 56 in : P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, *op. cit.*

6 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 21.

7 *Ibid.*, p. 35.

8 *Ibid.*, p. 21.

9 *Ibid.*, p. 25.

Ainsi, lorsque les architectes critiquent les maisons solaires ou « solarisée¹ » *a posteriori*, ils dénoncent essentiellement le caractère abstrait de ces constructions, qui résultent de l'adjonction d'éléments techniques indépendamment de l'unité fonctionnelle, esthétique et architecturale qu'ils forment. Intégrer une série d'éléments formant une unité abstraite dans un ensemble concret, où chacun des éléments apparaît comme indissociable de fonctionnement général, constitue un problème central de la conception bioclimatique qui engage l'architecte à réaliser un certain nombre de compromis techniques, mais aussi parfois esthétiques ou économiques. Cela explique que les architectes associés à la conception bioclimatique aient cherché à intégrer des éléments plurifonctionnels dans leurs constructions², comme les réflecteurs isolants ou les systèmes conçus pour assurer à la fois la distribution de la chaleur et le rafraîchissement par effet de cheminée.

III.2.1.4. Schématiser pour manipuler mentalement les techniques solaires passives

L'opposition entre « actif » et « passif » nous place au centre des problèmes de conception rencontrés par les architectes et de cette tension entre « abstrait » et « concret ». Concevoir une construction comme un ensemble concret implique de manipuler mentalement et graphiquement les techniques solaires passives choisies durant la mise au point d'un projet, afin de les intégrer et de les dimensionner correctement, suivant différentes contraintes. Ce problème nécessite que le concepteur ait assimilé le fonctionnement de ces techniques et qu'il ne les considère pas comme des solutions déjà données à insérer telles quelles dans le volume de sa construction. Bardou et Arzoumanian affirment que « [la] définition même du bioclimatisme exclut toute forme de modèle idéal, universellement performant³ », mais qu'elle suppose de connaître et de comprendre les techniques solaires passives afin d'étudier leur intégration à la fois esthétique et architecturale lors de la phase de conception.

Pour surmonter cette difficulté, les architectes associés à la conception bioclimatique avaient développé une connaissance des « schèmes⁴ » de fonctionnement de ces techniques, largement diffusée par l'intermédiaire des manuels et des *Passive Solar Conferences*. Selon

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 45.

2 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 16. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

Simondon, le « schème » d'un objet technique définit « sa fonction idéale¹ » qui peut être représentée sous une forme graphique ou symbolique et reste « transposable en d'autres structures² ». Ainsi le schème d'un système à gain direct est du type « soleil → espace → masse³ » et celui d'un système à gain indirect du type « soleil → masse → espace⁴ », si l'on considère que les flèches servent essentiellement à symboliser le sens des « chemins thermiques⁵ » ou « le cheminement des flux thermiques⁶ » à partir d'une source (ici, le soleil) jusqu'à sa dissipation (dans ce cas à travers la masse et l'air intérieur). Ainsi, une fenêtre comprise selon le schème « soleil → espace → masse » engage l'architecte à définir sa fonction selon son orientation et une certaine inertie thermique adjacente durant la phase de conception, sans pour autant en fixer définitivement la forme. Le schème « soleil → espace → masse » exprime une fonction climatique transposable dans différentes constructions.

En abordant les techniques solaires passives par l'intermédiaire de leur schème de fonctionnement, les architectes associés à la conception bioclimatique pouvaient plus facilement étudier leur intégration esthétique et architecturale et ne risquaient pas de « plaquer » abstraitement ces techniques. Une fois effectuée l'analyse climatique et microclimatique du site, ainsi que la déduction de la morphologie générale de la construction et des différentes techniques solaires passives, les architectes devaient arbitrer entre ces différents choix et trouver des compromis. Ils devaient ensuite être capables de « retraduire en termes de perception thermique leurs options volumiques⁷. » Réduites à des schèmes, les techniques solaires passives pouvaient être mieux manipulées et étaient susceptibles d'être employées malgré d'autres contraintes économiques ou légales. Ceci explique le fait que des maisons bioclimatiques ou solaires passives ont pu être réalisées malgré des contraintes esthétiques relativement strictes, comme celles imposées par les permis de construire⁸. L'idéal d'intégration des techniques solaires passives était tel que certains architectes ont affirmé qu'elles pouvaient être visuellement indécélables et qu'une construction bioclimatique était susceptible d'avoir le

1 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 42.

2 *Ibid.*

3 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28.

4 *Ibid.*

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 18.

6 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 84.

7 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 134.

8 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 194.

même aspect qu'une construction conventionnelle¹. Cela a permis à certains architectes de continuer à concevoir des maisons solaires passives malgré le désintérêt dont elles ont fait l'objet à partir du milieu des années 1980².

Malgré la possibilité de manipuler mentalement les techniques solaires passives par l'intermédiaire de leurs schèmes de fonctionnement, nous avons évoqué le fait que l'intégration de ces techniques se heurtait au délicat problème de leur dimensionnement qui nécessitait une approche quantitative. Les architectes étaient confrontés à la nécessité de réaliser des calculs prévisionnels des performances réalisées par ces techniques, à partir des choix effectués durant la phase de conception afin d'ajuster leur dimensionnement et d'anticiper les besoins de chauffage d'appoint. Nous verrons que dans ce domaine, les architectes s'en sont tenu à de nombreuses approximations qu'ils ont néanmoins essayé de progressivement affiner. Malgré la complexité des phénomènes thermiques à l'œuvre dans les maisons bioclimatiques et solaires passives, ils ont essayé d'anticiper ces phénomènes le plus précisément possible, en étudiant particulièrement les détails de leurs réalisations et en développant une approche expérimentale que nous allons présenter.

III.2.2. Dimensionner et quantifier suivant la démarche bioclimatique

III.2.2.1. Déterminer quantitativement un effet qualitatif

Il importe de distinguer nettement d'une part les méthodes de calcul et les règles de dimensionnement, qui sont des outils d'assistance à la conception qui permettent de déterminer les proportions d'un élément et d'estimer quantitativement ses effets, et d'autre part les méthodes de calcul réglementaires, qui servent à vérifier la conformité légale d'un projet achevé et que nous aborderons dans un second temps³. Malgré les règles proposées dans certains manuels, le dimensionnement d'un système de captage direct, indirect ou isolé reste une opération délicate durant les décennies 1970 et 1980 et souvent laissée à l'appréciation de l'architecte. Même pour les méthodes de calcul les plus élaborées, une marge d'erreur de 10 à 20 % était souvent observée⁴. Certains architectes ont à l'époque dû réaliser eux-mêmes les

1 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 34 ; Échange avec Jean-Roch Peres, le 29/04/2020 (à distance).

2 Entretien avec Bernard Banyuls, le 19/06/2019 à Perpignan.

3 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

4 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, *op. cit.*, p. 98.

calculs thermiques de dimensionnement des techniques solaires passives qu'ils choisissaient, par manque de connaissance des ingénieurs ou des bureaux d'études¹, mais ils étaient généralement soucieux de collaborer avec les thermiciens dès les premières phases d'un projet². Leurs estimations étaient souvent pessimistes et envisageaient les scénarios d'ensoleillement les moins favorables³.

Du point de vue des ingénieurs, il apparaît que « les systèmes de chauffage solaires passifs ne sont pas bien compris⁴ » à cette période. Cette observation de Balcomb faite en 1976 justifie les recherches qu'il mène au LASL et l'importance des *Passive Solar Conferences* qui permettaient de transmettre et de diffuser les connaissances sur ces techniques. Par la suite, les architectes et les ingénieurs ont bénéficié de la généralisation des ordinateurs et des logiciels de simulation thermique dynamique dans les bureaux d'études thermiques. Cette absence d'outils performants et la dimension à la fois rationnelle et irrationnelle des choix effectués expliquent pourquoi le comportement thermique de certaines techniques solaires passives a souvent mal été anticipé, et a conduit à des résultats décevants dans certains climats.

Avant d'aborder le cas des techniques solaires passives, il importe de préciser que l'estimation quantitative du rôle de l'aménagement à l'échelle du microclimat constituait déjà une difficulté importante en l'absence d'outils de simulation. Elle apparaît dès les travaux d'Olgyay, qui sont pourtant caractérisés par leur rigueur. À titre d'exemple, lorsqu'il conçoit une maison pour le climat chaud et sec de Phoenix, Olgyay estime que l'adjonction d'un petit jardin à l'angle sud-est de la construction réduit les températures de l'air au voisinage des façades de 5 °F, soit environ 2,8 °C⁵. Mais comment peut-il s'assurer que cette réduction est effective et qu'elle correspond à la valeur qu'il évoque ? Pour donner cette estimation, il s'appuie sur sa connaissance qualitative des phénomènes microclimatiques et souhaite utiliser l'effet de régulation des températures produit au voisinage d'une surface végétalisée⁶. Il reprend

1 Entretien avec Jean-Pierre Cordier, le 22/05/2019 à Toulouse.

2 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

3 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 84 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « The problems which remain are that passive solar heating systems are not well understood »

5 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 145.

6 *Ibid.*, p. 51.

cette valeur d'une réduction de 5 °F de la température de l'air au voisinage d'une surface enherbée aux travaux de Landsberg en microclimatologie¹.

Le caractère approximatif de ce chiffre provient du fait qu'Olgyay n'est pas sûr que le jardin qu'il envisage puisse réduire aussi sensiblement la température de l'air au voisinage de la construction. Que la température de l'air soit inférieure de 2,8 °C à celle de l'air ambiant à 10 cm d'un sol enherbé ne signifie pas que ce refroidissement soit encore sensible à 50 cm, 1 m ou 2 m de celui-ci². Il est circonscrit à un certain ordre de grandeur qui définit un microclimat. Quantifier ce phénomène est cependant important, d'une part pour justifier de l'intérêt de cet aménagement et du surcoût éventuel qu'il peut engendrer, et d'autre part pour montrer que celui-ci peut produire un rafraîchissement sensible et non négligeable. Donner la valeur du rafraîchissement obtenu par un choix d'aménagement permet de donner une idée approximative de l'importance de ce rafraîchissement : il y a une différence qualitative entre un rafraîchissement de 0,5 °C et de 5 °C et il existe un seuil à partir duquel il doit être considéré comme non négligeable. En pratique, les architectes associés à la conception bioclimatique ont considéré très approximativement ce type de phénomènes et se sont contentés d'anticiper qualitativement les effets de leur aménagement à l'échelle du microclimat. Le seul moyen de les quantifier précisément a consisté à réaliser des mesures *a posteriori*, via l'instrumentation des constructions. Les tentatives pour mesurer ces effets (température, vitesse de l'air, humidité...) à l'aide de maquettes ou de modèles réduits où sont simulés différents facteurs climatiques ont été considérées comme très peu fiables³.

III.2.2.2. Le problème du dimensionnement des techniques solaires passives et de l'approximation des méthodes de calcul

Nous avons évoqué précédemment les règles de dimensionnement des techniques solaires passives qui ont pu circuler grâce aux différents manuels, et particulièrement celui de Mazria qui contient des règles relativement précises. En pratique, ces règles ne constituaient pas des prescriptions strictes mais permettaient de fixer certaines proportions générales, ce qui explique que de légers sous-dimensionnements ou surdimensionnements aient été considérés comme négligeables. En ce qui concerne le stockage et l'inertie thermique d'une structure

1 *Ibid.*, p. 187.

2 R. Geiger, *The Climate Near the Ground*, *op. cit.*, p. 179.

3 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 184-185.

massive par exemple, un premier calcul approximatif pouvait être réalisé à partir de la masse totale des matériaux de la structure et de leur capacité thermique massique, comme le propose Givoni¹. Ce calcul peut néanmoins induire en erreur dans la mesure où seule une petite partie de la structure est effectivement susceptible d'accumuler de l'énergie thermique, soit en étant exposée au rayonnement solaire direct et diffus², soit en communiquant directement avec un volume d'air nettement plus chaud, comme dans une serre. Guidés par cette approximation selon laquelle l'inertie thermique d'une construction est directement fonction de sa masse de matériau, les architectes ont systématiquement eu tendance à maximiser la quantité de matériaux massifs dans leurs constructions en climat tempéré, et il est courant que le poids des murs et du radier d'une maison bioclimatique de taille modeste dépasse une centaine de tonnes³, parfois augmentée par l'utilisation de contenants remplis d'eau.

On pourrait objecter que pour certaines techniques solaires passives bien étudiées comme le mur Trombe, des règles de dimensionnement suffisamment robustes ont circulé (1 m² de mur pour 10 m³ de volume habitable⁴) et son rendement ainsi que ses performances étaient connus dans plusieurs climats régionaux. Bien que cette règle de dimensionnement soit donnée indépendamment du climat, ces éléments permettaient en théorie au concepteur de dimensionner assez précisément ce système avec une bonne certitude en ce qui concerne ses performances. En pratique, ils ne permettaient aucunement de garantir les performances d'un mur Trombe, dans la mesure où celles-ci sont intimement dépendantes du climat local et du microclimat où il est utilisé, ainsi que des caractéristiques de la construction. De plus, la diffusion des règles de dimensionnement que nous avons évoquées a pu être brouillée par les nombreuses publications où les performances du mur Trombe et d'autres techniques solaires passives étaient exagérées, tandis que les contraintes qui pèsent sur l'emploi de ces systèmes étaient passées sous silence⁵.

Même l'expérience acquise par les architectes avec une technique solaire passive ne permettait pas de garantir ses performances dans un autre climat ou un autre type de construction. Certaines maisons conçues par Michel, pourtant familier de la technique des murs Trombe, sont apparues très inconfortables à l'usage⁶. Dans une maison de 1974 située près de

1 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, op. cit., p. 390.

2 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 112-113.

3 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 42.

4 Entretien avec Jean-François Tricaud, le 18/10/2019 à Odeillo-Font-Romeu.

5 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 91.

6 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 66-68.

Valence, la température à l'intérieur des chambres placées derrière des murs Trombe orientés à l'ouest pouvait atteindre 35 °C, au point que son propriétaire ait envisagé d'y installer une isolation par l'intérieur¹. Étant donné la difficulté pour concevoir et réaliser des protections solaires fixes pour les orientations ouest, ce problème aurait pu être résolu par l'emploi de protections mobiles ou amovibles, ou par la disposition de végétation à feuillage caduc devant les murs Trombe. Bien que l'orientation ouest soit unanimement considérée comme la plus défavorable pour une chambre, ces mauvaises performances obtenues par un architecte connaissant ce type de système et ces problèmes de surchauffe illustrent le caractère approximatif des règles que les architectes ont pu employer.

Dans l'hypothèse où les architectes auraient eu des règles de conception suffisamment fiables pour dimensionner certaines techniques solaires passives et qu'ils aient pu résoudre les problèmes relatifs à leur intégration dans une construction, une difficulté importante aurait été de ne pas les surdimensionner inutilement. Si l'on s'intéresse aux techniques solaires passives de chauffage, les épisodes de froid en climat tempéré varient en intensité au cours de l'année. Le concepteur peut alors choisir de concevoir un système en fonction de la période la plus froide de l'année, au risque qu'il entraîne une surchauffe des locaux à d'autres périodes et que sa surface de captage dépasse une centaine de mètres carrés dans les climats les plus favorables². Une seconde option consiste à dimensionner la surface du système de captage indépendamment de ces périodes extrêmes, afin que celui-ci assure une part appréciable des besoins de chauffage (de l'ordre de 50 % par exemple), en prévoyant un système de chauffage d'appoint³ (poêle, convecteur électrique...). En pratique, c'est la seconde solution qui a systématiquement été adoptée, ce qui montre que les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique n'envisageaient pas les maisons bioclimatiques et solaires passives comme des maisons autonomes du point de vue des apports énergétiques pour le chauffage.

Une donnée intéressante pour dimensionner un système de chauffage ou de rafraîchissement, qu'il soit solaire ou conventionnel, est le nombre de degrés-jours du site où est située la construction. Cette valeur, déjà utilisée par les industries du chauffage et les chauffagistes au XX^e siècle, ne traduit aucune réalité physique, elle représente la somme des « écarts cumulés pendant une période de n jours entre la température de base intérieure et la

1 *Ibid.*, p. 68.

2 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 46-47, 76.

3 *Ibid.*

température extérieure moyenne ¹ » de l'air. Elle est calculée à partir de données météorologiques facilement accessibles, notamment la température maximale et minimale quotidienne, la température de base intérieure étant généralement fixée à 18 °C². Un climat local peut ainsi être défini par son nombre de degrés-jours annuels. Selon des données publiées en 1978, la ville de Nice comptait 1465 degrés-jours annuels, Paris en comptait 2220 et Strasbourg 2827³. Les degrés-jours cumulés pour chaque mois et pour de nombreuses stations françaises⁴ comme américaines⁵ ont été diffusés dans les manuels. Malgré les limites de cette valeur et le fait qu'elle soit inadaptée aux calculs thermiques en régime périodique ou variable⁶, les méthodes de calculs présentées par Chareyre⁷ et Mazria⁸ utilisent néanmoins les degrés-jours. Elles permettent de déterminer les déperditions thermiques et les besoins de chauffage mensuels d'une construction⁹. Une fois ces besoins de chauffage estimés, il est possible de fixer approximativement les dimensions des surfaces de captage pour différentes techniques solaires passives afin d'assurer une part de ces besoins, en prenant en compte leur rendement et les données météorologiques relatives à l'ensoleillement¹⁰. On peut ainsi fixer la « contribution du chauffage solaire ¹¹ » pour chaque mois et corrélativement les « besoins en chauffage d'appoint¹² ».

Quoique laborieux, ces calculs pouvaient être réalisés manuellement par un architecte ou un ingénieur en suivant la méthode proposée, compte tenu des limites techniques des possibilités de calcul de cette époque. Seuls quelques organismes comme le LASL aux États-Unis ou le COSTIC en France bénéficiaient d'ordinateurs susceptibles de réaliser des simulations thermiques dynamiques, et seule la généralisation des calculatrices programmables au début des années 1980 puis des ordinateurs personnels a progressivement rendu accessible ce type de calcul aux ingénieurs et aux bureaux d'études¹³. Cette puissance de calcul était

1 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 122.

2 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 27-28.

3 *Ibid.*, p. 28.

4 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 296-299.

5 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 272-273.

6 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 49.

7 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 74-79.

8 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 312-314.

9 *Ibid.*, p. 312-314.

10 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 74-77.

11 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 314.

12 *Ibid.*

13 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris. Voir par exemple : R. Lebens, *Passive Solar Heating Design*, Londres : Applied Science Publishers, 1980, 234 p. Trad. *Habitat solaire passif. Méthodes de*

nécessaire pour affiner les calculs thermiques, ne serait-ce que pour faire le bilan des apports et des déperditions thermiques quotidiens, ainsi que du stockage ou du déstockage éventuel de la chaleur dans les éléments massifs. C'est ce qu'explique l'ingénieur et architecte Jean-Pierre Auriault, qui fut une figure importante pour la promotion de la conception bioclimatique en France par l'intermédiaire du Plan Construction où il a travaillé et qui a participé à la mise au point de la réglementation thermique de 1982 :

« Dans ce cas [de la prise en compte des apports solaires], le calcul thermique devient plus complexe car à un instant donné on doit envisager les déperditions, les apports solaires combinés au stockage/déstockage des calories solaires. Selon les conditions climatiques, les caractéristiques du bâtiment, il faut donc, à tout instant, faire la somme algébrique des échanges thermiques [...]. Plus question alors de calcul annuel. Faire la différence, par exemple, entre les besoins annuels de chauffage et les apports solaires sur la même période masque les aspects de concomitance¹. »

Ainsi, « [évaluer] correctement l'aspect gain-déperdition-stockage-déstockage nécessite donc de faire des calculs par tranches de temps : la semaine est plus précise que le mois, l'heure plus précise que le jour²... » Si ces calculs peuvent encore être réalisés manuellement pour chaque mois, les calculs au pas de temps horaire ou journalier deviennent trop laborieux et doivent être automatisés³. En plus de permettre ces calculs affinés, l'utilisation de programmes de calcul a également permis de réaliser des simulations en régime dynamique qui nécessitent de « revenir aux équations fondamentales de la thermique⁴ » pour « étudier l'influence des différentes sollicitations (soleil, température, chauffage) sur une construction, éléments par éléments⁵ », permettant ainsi d'introduire des propriétés fondamentales comme l'inertie thermique. En

conception et de calcul avec programmes de simulation pour calculatrices, Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par M. Parizel, 1983, 244 p.

1 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 39.

2 *Ibid.*

3 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 84 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 39.

5 *Ibid.* L'étude de ces différentes sollicitations avaient déjà été entreprise par Mackey et Wright à travers la définition de la température air-soleil.

l'absence de ces outils, les architectes et les ingénieurs ont été contraints d'estimer ces phénomènes et de les anticiper avec des méthodes de calcul relativement imprécises.

III.2.2.3. L'évolution réglementaire et l'incitation à la quantification

L'évolution du cadre réglementaire et institutionnel a permis d'imposer des exigences parfois favorables à la conception bioclimatique¹, particulièrement en incitant à quantifier la part des besoins de chauffage assurée par l'énergie solaire et en diffusant des méthodes de calcul. Les architectes français associés à la conception bioclimatique ont pu profiter des règles imposées dans certains programmes institutionnels, comme le concours annuel HOT (Habitat Original par la Thermique) initié en 1974², ainsi que le concours des 5 000 maisons solaires lancé en janvier 1980³, qui a été l'occasion de diffuser une nouvelle méthode de calcul thermique conçue par l'ingénieur Michel Raoust nommée « Méthode 5 000⁴ », qui prenait en compte les apports solaires par les vitrages, les murs Trombe ou les serres⁵. Les premiers projets présentés en mars 1980 pour ce concours estiment que les techniques solaires passives peuvent assurer près de 35 % des besoins de chauffage, qui sont eux-mêmes réduits de 45 % par rapport à une maison conventionnelle⁶. Ce concours est cependant jugé assez sévèrement par certains acteurs de la conception bioclimatique qui lui reprochent d'encourager la reproductibilité de modèles (maisons à serres, maisons à mur Trombe...) indépendamment du climat⁷. D'autres concours du même type ont eu lieu en France⁸ et en Europe⁹. Ils ont permis de promouvoir l'emploi de la conception bioclimatique et ont encouragé l'estimation des apports solaires dès la phase d'avant-projet par différentes méthodes de calcul.

-
- 1 M. Chauvin-Michel, *Architectures solaires et politiques énergétiques en France de 1973 à 1985*, op. cit.
 - 2 P. Dard, *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat*, Paris : Plan Construction, 1986, p. 19.
 - 3 Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie/COMES-Plan Construction, *Projets pour 1000 Maisons Solaires*, Paris : Le Moniteur, 1981, p. 5.
 - 4 P. Achard, R. Gicquel (éds.), *European Passive Solar Handbook. Basic Principles and Concepts for Passive Solar Architecture*, Bruxelles : Directorate-General XII for Science, Research and Development, Solar Energy Division, 1986, 5.29 – 5.31.
 - 5 *Concours 5000 Maisons Solaires – Annexes*, Paris : Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, 1979, p. 11. (Archives personnelles de Michel Raoust – Paris)
 - 6 Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie/COMES-Plan Construction, *Projets pour 1000 Maisons Solaires*, op. cit., p. 8.
 - 7 M. Gerber, « Toward a Bioclimatic Architecture », p. 669 in : J. Hayes, W. A. Kolar (éds.), *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference*, op. cit. ; Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.
 - 8 Association pour l'Étude de l'Énergie Solaire de Veynes, *L'Architecture Solaire*, Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble, 1978, 117 p.
 - 9 R. Lebens, (éd.), *Passive Solar Architecture in Europe. The Results of the 'First European Passive Solar Competition – 1980'*, Londres/New York : The Architectural Press/John Wiley & Sons, 1981, 218 p.

Parallèlement à ces programmes et concours, les années 1970 et 1980 sont également marquées par l'apparition de réglementations thermiques plus contraignantes qui imposent des méthodes de calcul afin de vérifier la conformité légale d'un projet neuf. L'évolution de la réglementation thermique pour les logements neufs en France a vraisemblablement encouragé la pratique des architectes français associés à la conception bioclimatique, bien qu'elle ait été aussi critiquée à cause de ses simplifications. À la suite du premier choc pétrolier, cette évolution est d'abord marquée par la définition de coefficients de déperditions volumiques réglementaires¹ (le « coefficient G ») pour tous les bâtiments à partir du décret du 10 avril 1974². Ce coefficient qui fixe l'isolation minimum des constructions, dépend du type de logement et varie suivant trois zones climatiques³. Cette réglementation conduit à quelques absurdités pour les acteurs de la conception bioclimatique : ne prenant pas en compte les apports solaires, certaines techniques solaires passives comme les serres sont largement défavorisées. C'est ce qu'explique Frédéric Lewino en 1979 :

« Cette conception de la paroi sud [comme caprice] va à l'encontre de la législation française en matière d'isolation. En effet, celle-ci impose un coefficient d'isolation maximum de 1,35 W/m³ h/°C pour une maison individuelle en zone climatique moyenne (B). L'administration n'a absolument pas prévu que la façade puisse servir de capteur solaire, elle peut donc refuser le projet de construction d'une maison bioclimatique pour manque d'isolation⁴. »

Une nouveauté majeure apparaît à partir de la réglementation thermique de 1982 qui introduit un coefficient volumique des besoins de chauffage prenant en compte les apports solaires à travers les vitrages, comme à travers d'autres techniques solaires passives⁵. Cette prise en compte des apports solaires est une véritable nouveauté, qui témoigne de l'influence de la conception bioclimatique et solaire passive sur l'évolution de la réglementation⁶. Elle augmente également les exigences en termes d'isolation et limite le renouvellement d'air⁷. Les objectifs

1 G. Olive, « La Conception de la réglementation : à propos du programme H2E85 », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », *op. cit.*, p. 91.

2 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 343-344.

3 *Ibid.*

4 F. Lewino, « Guide de la construction », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 66, *op. cit.*, p. 25.

5 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris ; G. Olive, « La Conception de la réglementation : à propos du programme H2E85 », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », *op. cit.*, p. 91.

6 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris

7 *Ibid.*

de la réglementation de 1982 seront encore accentués par la réglementation H2E85 (Habitat Économe en Énergie pour 1985¹) puis celle de 1988. D'autres méthodes de calcul conçues par les ingénieurs et architectes associés à la conception bioclimatique seront développées au début des années 1980 : c'est le cas de la « Méthode B-Sol », conçue comme une adaptation de la méthode de calcul américaine développée par Balcomb aux États-Unis², où des réglementations relatives à la limitation de la consommation énergétique des bâtiments avaient été mises en place dès le milieu des années 1970 dans certains États.

III.2.2.4. Anticiper dans le détail le comportement thermique d'une construction bioclimatique

Malgré les difficultés pour dimensionner les techniques solaires passives et l'incitation à la quantification des phénomènes thermiques à l'aide de méthodes de calcul souvent très imprécises, les architectes associés à la conception bioclimatique ont essayé de dépasser ces approximations en anticipant très précisément le comportement thermique de leurs constructions. Ils ont ainsi été soucieux de concevoir très rigoureusement certains éléments indispensables au contrôle climatique. En ce qui concerne les protections solaires, celles-ci étaient conçues géométriquement grâce aux diagrammes solaires. Ces diagrammes permettent de lire rapidement l'azimut et l'altitude du soleil en degrés : à partir d'une coupe, il est alors relativement simple de déterminer la longueur d'une saillie pour réaliser une occultation complète ou partielle durant une partie de l'année³. Cependant, cette opération devient vite fastidieuse lorsqu'elle est répétée pour différentes ouvertures ou orientations⁴. Parmi l'ensemble des outils graphiques que nous avons évoqués, les diagrammes solaires sont véritablement les seuls à avoir été largement utilisés et à être mentionnés par les différents acteurs.

Mais la conception de protections solaires rigides à l'aide des diagrammes solaires pose certains problèmes en ce qui concerne les apports favorables et défavorables à la mi-saison dans les climats tempérés. C'est ce que fait remarquer l'architecte David Wright à propos de la conception d'une de ses maisons, où « l'auvent a été calculé comme si le solstice d'hiver était

1 *Ibid.*

2 R. Célaire, P. Diaz-Pedregal, J-L. Izard, *Méthode B-Sol. Calcul du coefficient volumique des besoins de chauffage des logements*, s.l., 1985, p. III. (Archives personnelles de Robert Célaire – Lambesc)

3 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

4 Entretien avec Jean-Luc Lauriol, le 06/02/2021 (à distance).

le moment le plus froid¹ », ce qui a pour conséquence « [qu'en] automne, le soleil rentre dans la maison quand il fait encore chaud, tandis qu'en mars, il ne pénètre plus assez quand on en a encore besoin². » Dans la maison qu'évoque David Wright, ce problème de conception est apparu à l'usage et a été résolu par l'emploi de canisses et de tonnelles qui doivent être manipulées par les habitants³. D'autres architectes ayant anticipé ce problème ont prévu des protections solaires horizontales en façade sud dont l'inclinaison ou le débord peut être modifié en fonction des saisons : c'est le cas de Gerber qui a conçu un système de volets manipulables à l'aide d'une manivelle dans l'une de ses réalisations⁴. Alors que les meilleures méthodes de calcul de l'époque ne prenaient que très grossièrement en compte les apports solaires, les architectes concevaient des dispositifs pour contrôler finement ces apports à la mi-saison.

Ce type de système manipulable se retrouve dans de nombreuses réalisations bioclimatiques et solaires passives. Ces systèmes, souvent conçus par les architectes eux-mêmes et spécialement fabriqués pour chaque réalisation, permettent de résoudre les fonctions antagonistes de certains éléments, notamment pour tout ce qui concerne les ouvertures, à la fois source d'apports et de déperditions thermiques. Nous avons évoqué le système d'isolation mobile *Nightwall*⁵ commercialisé par Zomeworks qui permet de résoudre cet antagonisme. D'autres architectes ont mis au point des occultations du même type en France, notamment pour l'isolation nocturne des serres et leur protection estivale⁶. On trouve également très souvent des systèmes de volets, rideaux, registres ou clapets amovibles ou mobiles placés entre le système de captage et l'espace habitable, afin de contrôler l'admission de la chaleur accumulée pour le chauffage de l'habitation. Tous ces systèmes sont conçus pour permettre un contrôle très précis des apports et des déperditions thermiques qui étaient largement ignorés par les règles de dimensionnement des techniques solaires passives et les méthodes de calcul, à cause de leurs nombreuses simplifications. Dans la mesure où ils nécessitent souvent des manipulations quotidiennes, certains de ces systèmes étaient parfois automatisés et leur ouverture pouvait être asservie à un thermostat différentiel ou plus rarement à un système au fréon, comme pour le

1 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 81 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 39.

5 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 230-231.

6 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 24.

Skylid. En l'absence d'automatismes, ces éléments mobiles devaient parfois être manipulés quotidiennement par les habitants et nécessitaient une attention constante de leur part.

Si ces systèmes donnent un aspect « bricolé » à certaines réalisations bioclimatiques, ils traduisent plus fondamentalement l'importance que les architectes accordaient aux détails constructifs et techniques pour le contrôle des phénomènes thermiques. Malgré la difficulté pour concevoir, intégrer et dimensionner une technique solaire passive en pratique, les architectes associés à la conception bioclimatique ont souvent soigné la réalisation de certains détails qu'ils estimaient importants. C'est par exemple le cas des réflecteurs, dont la conception a fait l'objet d'études assez poussées menées à l'Université d'Oregon en 1977¹, mais qui constituent des détails délicats à dimensionner en pratique étant donné la variation continue de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Gerber a vraisemblablement intégré des réflecteurs à certaines de ses réalisations afin d'améliorer le captage des systèmes à gain direct, comme dans une maison construite à Ginestas en 1979 (*figure 106*), qui intègre un réflecteur en façade, juste au-dessus des fenêtres orientées au sud. Ce réflecteur forme également une saillie qui protège ces ouvertures du rayonnement solaire direct en été. D'autres architectes ont été jusqu'à concevoir des détails relatifs à l'aménagement intérieur. Nous avons évoqué l'utilisation de bidons et de fûts remplis d'eau placés à l'intérieur des constructions ou dans le mobilier pour en augmenter l'inertie thermique. Toujours pour favoriser l'inertie thermique, Cordier a modifié la texture des matériaux intérieurs de certaines de ses constructions afin d'en augmenter la surface d'échange. Pour une de ses réalisations, achevée en 1980 et située à Gaillac, en Haute-Garonne (*figure 107*), il explique que « [l'espace] de séjour en contact direct avec la serre comporte une dalle pleine, coulée sur des briques creuses dont les canaux, éclatés ensuite au marteau, forment des ailettes favorisant l'échange thermique² » (*figure 108*). Ce type de détail était conçu par anticipation des échanges thermiques et suivant des hypothèses sur le comportement thermique global de la construction qui dépassaient les possibilités de calcul de cette époque. Ces hypothèses ont parfois été infirmées à l'usage ou sont rentrées en contradiction avec les exigences d'habitabilité.

Bien que le dimensionnement des techniques solaires passives soit une opération approximative, souvent laissée à l'appréciation de l'architecte et délicate à réaliser par un ingénieur en l'absence de méthodes de calcul performantes, les architectes et les ingénieurs

1 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 190-191.

2 *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Solaire : passif ou actif ? », n° 209, juin 1980, p. 52.

associés à la conception bioclimatique souhaitaient dépasser ces limitations et essayaient d'anticiper très précisément le comportement thermique de leurs constructions. Afin de valider leurs intuitions, ils étaient généralement soucieux de vérifier les performances de leurs réalisations et les règles de conception qu'ils avaient adoptées *a posteriori*, une fois une réalisation achevée et habitée. En pratique, ces vérifications étaient réalisées en instrumentant les constructions bioclimatiques, dans le but de réaliser un suivi de leur comportement thermique. L'instrumentation servait à la fois à confirmer des intuitions afin de vérifier les choix effectués durant la phase de conception et permettait le cas échéant de corriger certaines règles de conception ou de mettre en évidence les phénomènes thermiques qui avaient été négligés ou mal anticipés. C'est pourquoi la pratique des architectes associés à la conception bioclimatique peut être qualifiée d'expérimentale et c'est sous cet angle que nous souhaitons l'aborder à présent.



Figure 106 : Réflecteur d'une maison conçue par M. Gerber à Ginestas.
(photographie de L. Vico-Gerber)



Figure 107 : *Maison bioclimatique conçue par J.-P. Cordier et située à Gaillac.*
(*L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Solaire : passif ou actif ? », n° 209, juin 1980, p. 52)



Figure 108 : *Intérieur de la maison conçue par J.-P. Cordier.*
On remarque le plafond formé de briques creuses éclatées au marteau.
(*L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Solaire : passif ou actif ? », n° 209, juin 1980, p. 53)

III.2.3. L'approche expérimentale des réalisations bioclimatiques et solaires passives

III.2.3.1. L'instrumentation des constructions bioclimatiques et solaires passives

On peut envisager très grossièrement un projet d'architecture selon deux phases : la phase de conception et la phase de construction. Pour les architectes associés à la conception bioclimatique, une construction réalisée suivant cette démarche n'est pas seulement un bâtiment susceptible d'être habité, mais aussi un objet d'étude. La démarche bioclimatique doit alors être décomposée selon trois phases : conception, construction et instrumentation. Cette dernière phase est cruciale étant donné les nombreuses approximations et l'insuffisance des méthodes de calcul disponibles à l'époque, car elle permet de confirmer ou d'infirmer les choix opérés durant la phase de conception et parfois d'affiner certaines règles. Les architectes étaient soucieux de valider expérimentalement les choix de conception effectués et de justifier de leurs surcoûts éventuels au regard des économies de fonctionnement qu'ils pouvaient permettre par la suite. L'instrumentation est un ensemble de mesures thermométriques réalisées sur une période représentative et directement *in situ*. La consommation des systèmes de chauffage auxiliaires était également soigneusement relevée, par l'habitant ou par un compteur dédié, afin de la comparer à celle des maisons conventionnelles de même surface situées dans le même climat local et ainsi d'estimer l'économie réalisée¹.

Étant donné la quantité de constructions instrumentées, il est possible d'affirmer que les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont développé une approche expérimentale des constructions, selon une méthode essai et erreur assez simplifiée. Cette méthode est déjà perceptible dans les évolutions relativement rapides de certaines techniques solaires passives comme le mur Trombe, à mesure qu'il a été employé et que ses défauts ont été constatés. Le problème de la conception des clapets anti-retour, qui sont essentiels au bon fonctionnement du mur Trombe afin de limiter l'inversion de la thermocirculation, s'est posé dans de très nombreuses constructions et a conduit les architectes ou les habitants à inventer des systèmes plus ou moins bien adaptés (clapets automatisés, volets manuels, simple feuille

1 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 65, 74.

de celluloïd¹...). Ces recherches témoignent d'une méthode essai et erreur qui fait appel à des observations empiriques pour résoudre un problème constaté *a posteriori*. Le recours à des mesures de températures de différents éléments grâce à l'instrumentation d'une construction était justifié par la même méthode et par le désir d'améliorer les constructions futures intégrant les mêmes techniques solaires passives. Ainsi, plutôt que de considérer que la conception bioclimatique était limitée par les approximations et l'imprécision des règles de dimensionnement, il semblerait que la conscience des limites de ces approximations ait stimulé l'intérêt des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique pour la mesure des constructions déjà réalisées. Ils envisageaient l'instrumentation des constructions déjà existantes comme une manière d'affiner ces approximations et de les préciser expérimentalement, afin d'obtenir des règles de conception suffisamment fiables par la suite.

Dans le but d'étudier ces constructions et de juger de la performance des techniques solaires passives employées, de très nombreuses constructions bioclimatiques ont été instrumentées à l'aide de thermocouples placés à certains points-clés de la construction ainsi qu'à l'extérieur². Ces thermocouples étaient reliés à un enregistreur qui relevait périodiquement les températures, souvent sur une année complète ou durant plusieurs saisons. Ces opérations d'instrumentation étaient généralement placées sous la supervision du département de physique de l'université la plus proche ou d'un organisme de recherche, comme le CSTB ou le COSTIC en France, ou le LASL aux États-Unis. Ces constructions instrumentées ne doivent pas être confondues avec les prototypes et les cellules-tests réalisés par ces mêmes organismes pour tester la performance d'un système. Pour les architectes Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, qui ont dressé une typologie des différents types de réalisations, ces prototypes sont essentiellement des « maisons-laboratoires³ » construites « sous la direction d'universitaires (physiciens) ou dans des centres de recherche, avec pour objectif principal l'établissement de séries de mesures⁴ ». Ils n'étaient pas conçus pour être habités et pouvaient parfois être temporairement occupés pour les besoins d'un projet de recherche où l'habitant adoptait alors le « comportement de cobayes volontaires⁵ », comme dans le cas des premières maisons de Trombe à Odeillo-Font-Romeu. Comme ils le précisent, les occupants à l'intérieur de ces

1 *Ibid.*, p. 55.

2 *Ibid.*, p. 35.

3 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 216-217.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

prototypes pouvaient également être « simulés thermiquement¹ » par des lampes infrarouges. Pour eux, ces prototypes se distinguent nettement des « maisons écologiques² » réalisées en auto-construction par des particuliers ou des « individus isolés³ ».

En pratique cette distinction n'est pas si précise et de nombreuses maisons auto-construites ont été instrumentées et étudiées comme une réalisation expérimentale par des organismes de recherche. Mis à part leur destination initiale, cette différence entre les maisons habitées et les maisons prototypes est ténue. Certaines constructions conçues pour être habitées ont d'abord été étudiées comme des prototypes, afin de vérifier expérimentalement les performances de certaines techniques solaires passives dans un climat donné et d'en ajuster les règles de dimensionnement⁴. De plus, toute construction bioclimatique peut être considérée comme un prototype, dans la mesure où au moins un système expérimental pouvait y être intégré, ce qui explique ce souci d'instrumenter le maximum de réalisations. Selon Auriault, l'intérêt d'étudier ces réalisations expérimentales paraissait fondamental compte tenu de l'insuffisance des connaissances sur les techniques solaires passives, comme il l'écrit en 1979 :

« Ces constructions [expérimentales] ont tout d'abord le mérite de vérifier plus ou moins grossièrement les prévisions de calcul tant au niveau du comportement thermique que des coûts d'investissement. [...] Mais ces opérations permettent aussi de tester pragmatiquement ce que l'on ne sait pas (ou mal) calculer, comme les serres par exemple. Le savoir scientifique n'a pas tué le bon sens thermique. Elles peuvent aussi montrer toutes les limites de nos calculs, soit dans leurs précisions illusoire, soit dans leurs hypothèses de départ⁵. »

Il affirme que si les « principes thermiques de base⁶ » à l'œuvre dans ces constructions sont « connus depuis longtemps⁷ », le problème principal concerne l'application de ces principes et les règles de dimensionnement qu'ils impliquent. Dans ce domaine, il note en 1979 qu'un « savoir se construit lentement⁸ » principalement grâce aux ingénieurs et aux architectes américains, et particulièrement du LASL, qui menait un ambitieux programme

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 191.

5 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 41.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*

d'instrumentation au Nouveau-Mexique¹. Pour Auriault, cette approche expérimentale des réalisations existantes distingue les acteurs de la conception bioclimatique, et particulièrement les ingénieurs, des autres acteurs de la construction. Il écrit :

« [Il] faut rappeler, pour ceux qui véhiculent encore l'image de l'ingénieur, que 80 % de la thermique du bâtiment n'est que l'application servile d'une réglementation qui réduit la conception à une somme de multiplications et d'additions fastidieuses. Il y a longtemps que le thermicien n'invente plus. Il y a longtemps aussi que l'architecte ne demande plus à son bureau d'étude que d'être conforme à la réglementation garde-fou. Là, comme ailleurs, pourquoi faire mieux que ce qui est demandé² ? »

À l'opposé de cette routine introduite par la réglementation qu'évoque Auriault, les acteurs associés à la conception bioclimatique ont manifestement cherché à inventer, ne serait-ce qu'en essayant de préciser leurs approximations et d'affiner les règles de conception des techniques solaires passives qu'ils employaient.

III.2.3.2. L'exemple de la maison *L'Estradelle* dans les Corbières

Un exemple de cette approche peut être illustré par la maison *L'Estradelle*, qui est la rénovation d'une ancienne bergerie réalisée entre 1976 et 1977 par Gerber à Treilles, qu'il habitait lui-même et qui a été instrumentée³ (*figure 109*). En plus d'être particulièrement bien abritée des vents dominants (cers) par sa morphologie et un ensemble de haies⁴, cette construction intègre de nombreuses techniques solaires passives orientées au sud-est, notamment une galerie vitrée qui fonctionne comme un système à gain direct ou indirect en fonction du positionnement du vitrage ainsi qu'une serre, l'ensemble étant associé à une importante inertie thermique formée par les tomettes, les murs en maçonnerie de pierre ainsi qu'une cuve remplie de 5 000 litres d'eau de pluie⁵.

-
- 1 R. D. McFarland, J. D. Balcomb, « The Effect of Design Parameter Changes on the Performance of Thermal Storage Wall Passive Systems », p. 54-60 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off, op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 2 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 39.
 - 3 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans, op. cit.*, p. 31.
 - 4 *Ibid.*, p. 31.
 - 5 M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 65 ; J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans, op. cit.*, p. 32.

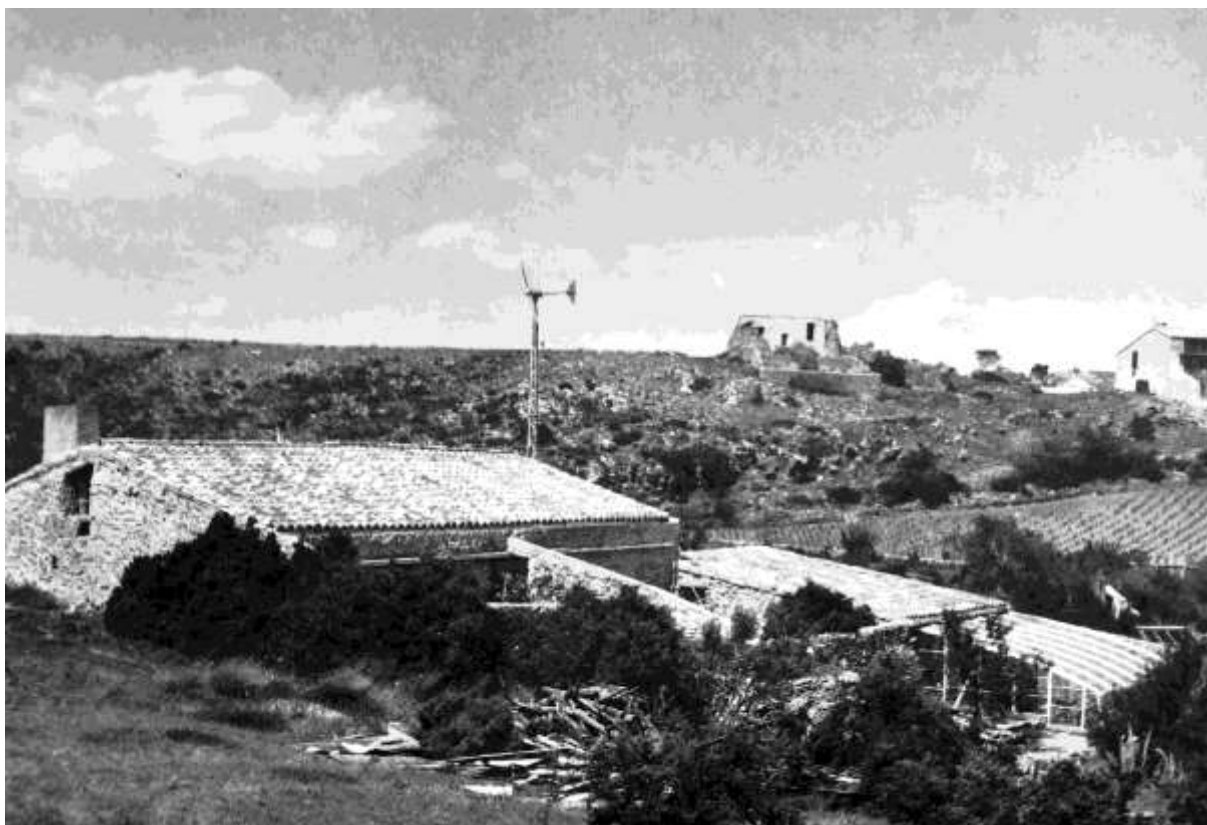


Figure 109 : *Maison de l'Estradelle conçue par M. Gerber. On remarque que la maison est particulièrement bien abritée par des plantations brise-vent.*
(J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 34)

Cette instrumentation a consisté à relever les températures à différents points-clés de la construction à l'aide de thermocouples répartis entre la serre, la chambre, l'atelier et l'extérieur¹. Les mesures ont abouti à plusieurs résultats importants. Tout d'abord, l'intérêt de la serre est apparu plus sensible le matin que l'après-midi, où elle peut occasionner certaines surchauffes, ce qui amènerait à privilégier une orientation est afin de les minimiser². Les effets de l'isolation du toit sont apparus comme globalement favorables, de même que l'importante inertie thermique³. Les mesures ont aussi montré que la température de la cuve d'eau enterrée à l'extrémité de la serre était « remarquablement stable⁴ », malgré la grande amplitude des températures de l'air à l'intérieur de la serre. Enfin, il est apparu que « l'ouverture et la fermeture des portes des pièces et de la serre [étaient] déterminantes quant aux résultats, à tel

1 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, *op. cit.*, p. 35.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

point qu'une automatisation de la communication entre l'espace habité et la serre serait souhaitable¹. » Cette automatisation aurait pu être réalisée à l'aide d'un thermostat différentiel ou d'un moteur à gravité, comme une bascule au fréon, utilisée dans le système *Skylid*. Ce dernier résultat montre l'importance des manipulations effectuées par les habitants afin de bénéficier au maximum des apports thermiques d'une serre et l'intérêt d'automatiser ces manipulations.

L'instrumentation de cette construction a également confirmé certains détails de conception en ce qui concerne la ventilation : les ouvertures basses, qui permettent à l'air de circuler au-dessus de la cuve d'eau en entrant dans la serre², produisaient un meilleur rafraîchissement que les ouvertures hautes, tandis que les ouvertures hautes étaient plus utiles en hiver où elles permettaient de ventiler tout en limitant le refroidissement des murs³. Ces observations ont confirmé la majorité des décisions effectuées par Gerber lors de la conception de cette maison et vérifiaient certaines de ses approximations initiales. Dans le même souci expérimental, il choisira d'équiper sa réalisation suivante de nombreux thermocouples⁴. En revanche, nous verrons par la suite que les résultats obtenus dans la serre de cette réalisation ont manifestement mal été interprétés : les surchauffes proviennent moins de l'orientation de la serre que de son importante surface oblique, très largement exposée au rayonnement solaire estival⁵. Ce problème de surchauffe avait été résolu par l'emploi de protections amovibles (canisses) positionnées en été⁶.

Cet exemple illustre parfaitement l'approche expérimentale des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique. De très nombreuses constructions bioclimatiques ont été instrumentées, que ce soit en France comme aux États-Unis. Cependant des résultats aussi précis obtenus pour une construction restent difficilement généralisables. Les architectes considéraient généralement ces résultats comme indissociables d'un ensemble de facteurs déterminants, comme le climat local où est située la construction. Olgyay affirmait en 1963 que les réalisations expérimentales et leurs résultats « ne sont pertinents que pour la zone

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 32.

3 *Ibid.*, p. 35.

4 M. Gerber, « Architecture Bioclimatique dans les Corbières », p. 75 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

5 *Ibid.*

6 M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 65.

dans laquelle elles sont construites¹ » et qu'elles permettent d'étudier « qu'un seul type de conception ou d'orientation à la fois². » Pour les mêmes raisons, Bardou et Arzoumanian estimaient qu'il « faut se garder de prendre à la lettre les résultats annoncés au sujet des maisons solaires³ » qui omettent souvent de nombreux facteurs, comme les données climatiques locales ou le niveau de confort à l'intérieur de ces constructions⁴.

III.2.3.3. L'exemple du *Sundwellings Program* au Nouveau-Mexique

Malgré ces limites, ce type d'instrumentation a été étendu à plusieurs constructions réalisées simultanément afin de comparer les performances relatives de différentes techniques solaires passives dans un même climat local et microclimat. C'est par exemple le cas d'un ensemble de petites habitations achevées au printemps 1977 dans le cadre du *Sundwellings Program* à Abiquiú (36 °N) au Nouveau-Mexique, à l'initiative de van Dresser⁵. Ce programme a été conçu comme un « laboratoire populaire⁶ », permettant de valoriser les techniques de construction traditionnelles de cette région tout en y intégrant différentes techniques solaires passives à travers des formations et des réalisations expérimentales⁷. Les quatre habitations réalisées pour ce programme sont des dortoirs comprenant deux chambres orientées au sud et organisées selon le même plan rectangulaire de 6 par 12 mètres⁸ (*figure 110*). Elles sont toutes réalisées avec les mêmes matériaux locaux et suivant les mêmes techniques constructives traditionnelles : brique de terre crue (*adobe*) et charpente en troncs écorcés (*vigas*)⁹. L'isolation est réalisée par de la sciure de bois sous la toiture et une couche de pierre ponce située entre deux rangées de brique pour le mur nord¹⁰. Les constructions bénéficient toutes du même système de ventilation naturelle par effet de cheminée à travers un conduit dont l'ouverture est

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 180.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The test facilities, and thus the results, are pertinent only to the area in which they are constructed, and without extensive rebuilding can investigate only one type of design or orientation at a time. »

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 45.

4 *Ibid.*

5 P. van Dresser, « The Growth of Folk Solar Architecture in New Mexico », p. 781 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 *Ibid.*, p. 781-782. Traduction personnelle, citation originale : « folk laboratory »

7 *Ibid.*

8 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 112.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

manipulable grâce à une trappe¹ (*figure 111*). Elles diffèrent seulement par les techniques solaires passives qui y sont intégrées. Deux maisons ont été équipées de techniques à gain direct : l'une avec une large baie double vitrage, l'autre avec une serre (*figure 112*). Une troisième maison intègre un mur Trombe, tandis que la dernière sert de maison témoin et ne dispose d'aucune technique solaire passive particulière, mis à part deux fenêtres orientées au sud².

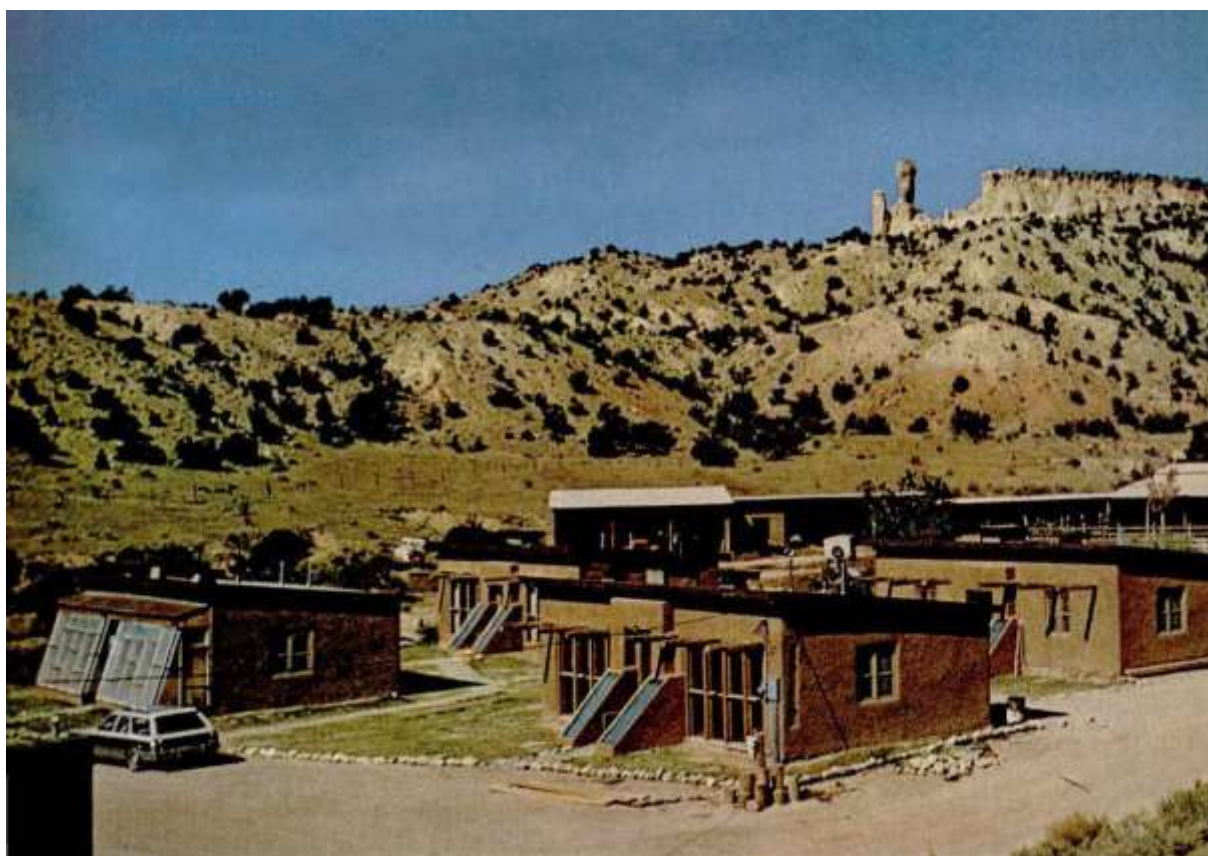


Figure 110 : *Ensemble des quatre habitations du Sundwellings Program conçues par P. Van Dresser à Ghost Ranch.*

(A. Fisher, « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », *Popular Science*, vol. 212, n° 4, avril 1978, p. 77)

1 A. Fisher, « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », *Popular Science*, vol. 212, n° 4, avril 1978, p. 77.

2 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, *op. cit.*, p. 112.

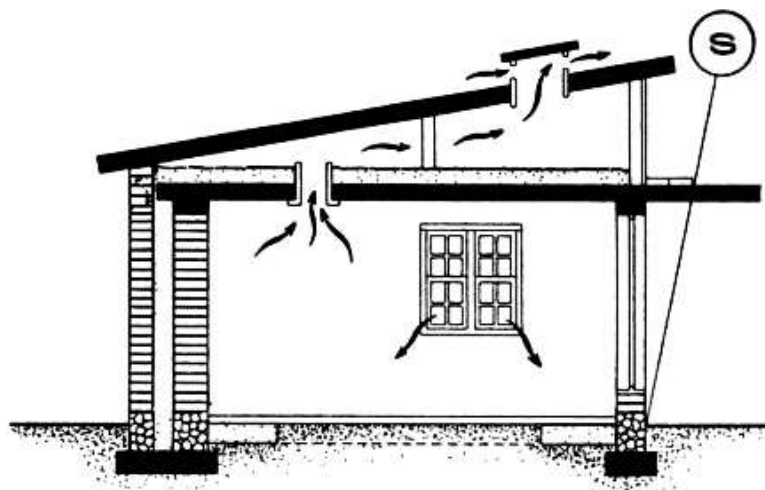


Figure 111 : Principe de ventilation des maisons du Sundwellings Program.
(A. Fisher, « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », *Popular Science*, vol. 212, n° 4, avril 1978, p. 79)

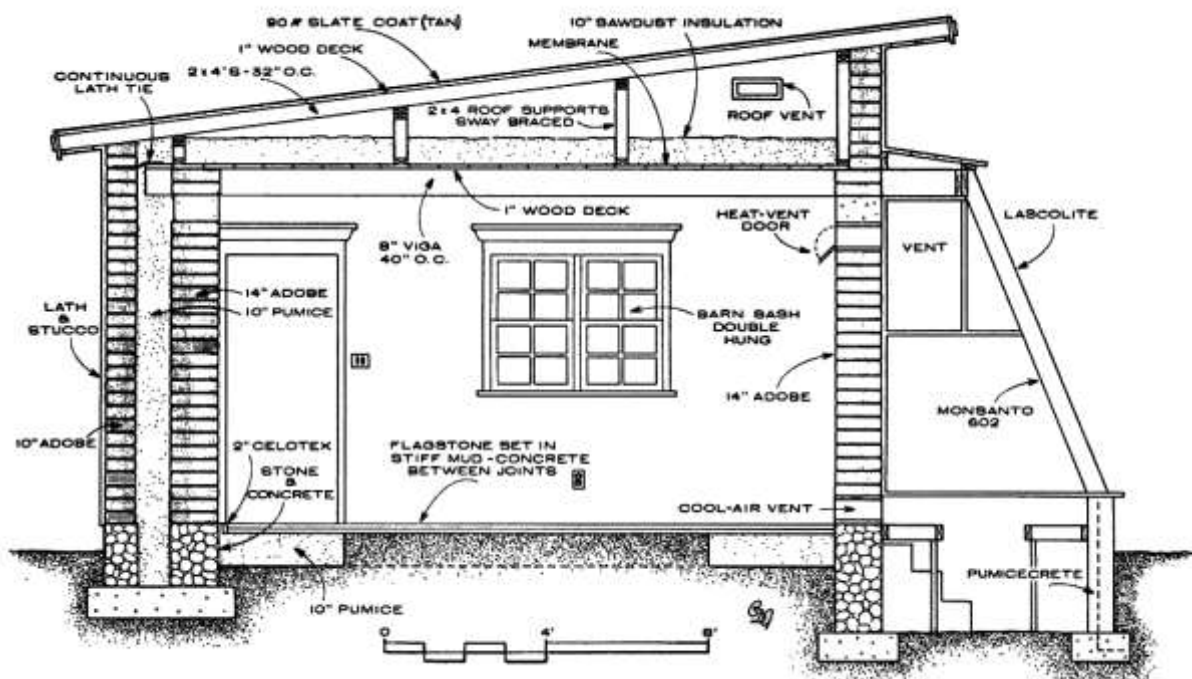


Figure 112 : Coupe détaillée de la maison équipée d'une serre du Sundwellings Program. On remarque que l'isolation thermique a été soignée.
(A. Fisher, « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », *Popular Science*, vol. 212, n° 4, avril 1978, p. 78)

Le fait que van Dresser ait choisi de construire une maison témoin plutôt qu'une quatrième maison équipée d'une autre technique solaire passive, comme un *Drumwall* par exemple, confirme selon nous l'approche expérimentale des architectes associés à la conception bioclimatique. Ce choix témoigne d'une volonté de démontrer le plus rigoureusement possible l'intérêt des techniques solaires passives et leur bonne intégration à des constructions réalisées suivant les techniques traditionnelles de cette région du Nouveau-Mexique, qui disposent d'une inertie thermique importante¹. Selon ses estimations, elles devaient pouvoir assurer entre 65 et 70 % des besoins de chauffage². L'instrumentation de ces bâtiments a été placée sous la supervision du LASL³. C'est la première fois que ce laboratoire a pu comparer précisément les performances de ces différentes techniques solaires passives entre elles et par rapport à une maison témoin⁴. Chaque habitation a été équipée de 50 thermocouples placés à des points-clés pendant la phase de construction⁵ (sol, mur, isolant...) tandis que le climat local était relevé par une petite station météorologique mesurant également l'énergie solaire reçue par une surface horizontale et verticale à l'aide de pyranomètres⁶. Le but était d'obtenir les données les plus représentatives du climat local qui peuvent être sensiblement différentes de celles relevées par la station voisine, d'autant plus que le site de Ghost Ranch où sont situées les constructions est particulièrement vallonné. La mise en place d'une station météorologique pour une opération d'instrumentation est exceptionnelle et le plus souvent seules les températures extérieures étaient relevées par un ou plusieurs thermocouples abrités.

Les mesures ont d'abord permis de mettre en évidence l'efficacité du système de ventilation naturelle par effet de cheminée. Van Dresser relate que les températures intérieures n'ont pas dépassé 24 °C alors qu'elle atteignait 35 °C à l'extérieur⁷. En hiver, les performances de la serre ont paru satisfaisantes pour les occupants et permettaient de maintenir la température intérieure entre 16 et 20 °C malgré des températures extérieures négatives⁸. En l'absence d'occupants et de chauffage d'appoint, l'instrumentation a mis en évidence l'importante différence entre les habitations à mur Trombe et la maison témoin et celles équipées de systèmes

1 P. van Dresser, « The Growth of Folk Solar Architecture in New Mexico », p. 782-783 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 *Ibid.*, p. 782.

3 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 112.

4 A. Fisher, « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », op. cit., p. 78.

5 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 112.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*, p. 113.

8 A. Fisher, « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », op. cit., p. 78-79.

à gain direct. L'amplitude des températures à l'intérieur de ces dernières était considérablement plus importante et elle variait d'environ 9,5 °C au cours d'une journée¹. Pour le début du mois de février 1978 où les températures extérieures ont varié entre -9 et 13 °C, les températures à l'intérieur de la maison témoin se sont maintenues aux alentours de 10 °C et entre 13 et 17 °C à l'intérieur de la maison équipée d'un mur Trombe². Pour les deux autres maisons équipées de systèmes à gain direct, les températures intérieures ont oscillé entre 13 et 22 °C sur la même période³ et ces systèmes ont assuré environ 75 et 65 % des besoins de chauffage contre moins de 60 % pour le mur Trombe⁴. Dans la maison témoin, qui bénéficiait malgré tout d'une bonne isolation, d'une importante inertie et de fenêtres orientées au sud, près de 30 % des besoins de chauffage ont été assurés par le rayonnement solaire, ce qui constituait un résultat très surprenant selon van Dresser⁵.

À partir des réalisations du *Sundwelling Program* les chercheurs du LASL ont travaillé à modéliser le comportement thermique de la maison équipée d'une serre à l'aide d'un « réseau thermique⁶ » (*figure 113*) afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques sur ordinateur et de comparer les résultats obtenus par cette modélisation à ceux mesurés lors de l'instrumentation⁷. Les mesures réalisées sur la construction ont permis de calibrer le modèle sur différentes périodes représentatives entre 1977 et 1978⁸. La simplification de ce modèle, comme de toutes les simulations thermiques dynamiques réalisées à cette période jusqu'à très récemment⁹, ne permettait pas de modéliser l'impact du microclimat sur le comportement thermique des constructions, qui était considéré comme négligeable par Balcomb et les autres ingénieurs du LASL¹⁰.

1 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 130.

2 *Ibid.*, p. 127.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 128.

5 *Ibid.*, p. 129.

6 R. W. Jones, R. D. McFarland, « Simulation of the Ghost Ranch Greenhouse-Residence », pp. 35-40 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

7 *Ibid.*, p. 35, 37.

8 *Ibid.*

9 Entretien avec Bruno Peuportier, le 01/07/2020 (à distance).

10 J. D. Balcomb, « State of the Art in Passive Solar Heating and Cooling », p. 10 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

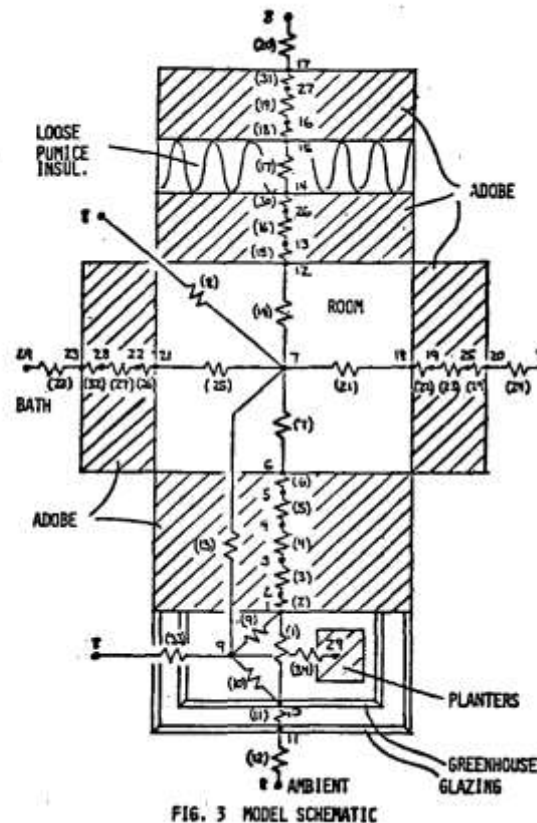


FIG. 3 MODEL SCHEMATIC

Figure 113 : « Réseau thermique » utilisé par le LASL pour la modélisation de la maison équipée d'une serre.
 (R. W. Jones, R. D. McFarland, « Simulation of the Ghost Ranch Greenhouse-Residence », pp. 37 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off: Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference: January 11-13, 1979, San Jose, California*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1979)

Une fois le modèle réalisé et considéré comme suffisamment fiable, les chercheurs du LASL ont utilisé les données météorologiques de Los Alamos, situé à une cinquantaine de kilomètres d'Abiquiú, pour simuler le comportement thermique de la construction sur une année complète¹. Leur but était d'étudier dans le détail le comportement thermique de la serre dans ce type de climat. Leur modèle a montré que près de 80 % de l'énergie solaire reçue par le mur sud derrière la serre était perdu vers l'extérieur². Ils estimaient que « l'isolation nocturne du vitrage de la serre serait par conséquent susceptible d'avoir un effet appréciable³. » Sans

1 R. W. Jones, R. D. McFarland, « Simulation of the Ghost Ranch Greenhouse-Residence », pp. 39 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 *Ibid.*, p. 40.

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Night insulation of the greenhouse glazing would, therefore, be expected to have an appreciable effect. »

nécessairement isoler la serre, le modèle a montré qu'une grande partie de ces pertes provenaient du rayonnement de grande longueur d'onde du mur sud. Les chercheurs du LASL en ont déduit qu'une « importante part des déperditions de la serre pendant la nuit pourrait être contrôlée avec des rideaux réfléchissants¹ » placés le long du mur. Nous ne sommes pas en mesure de savoir si les recommandations émises par le LASL à partir de leur modèle ont été concrètement adoptées, mais ces propositions d'améliorations montrent comment les croisements entre les réalisations expérimentales et la modélisation thermique dynamique ont pu alimenter le développement des techniques solaires passives.

III.2.3.4. Développement et limite de l'instrumentation des constructions bioclimatiques

Le *Sundwelling Program* est une opération d'instrumentation exceptionnelle de par sa durée et l'ampleur des moyens mobilisés. Elle constitue l'une des plus importantes opérations d'expérimentation des techniques solaires passives des années 1970². Ce type d'expérience a néanmoins été encouragé par les acteurs de la conception bioclimatique à des échelles plus modestes. En France, Cordier a mené une étude analogue en 1986 avec la construction de cinq maisons individuelles dans un lotissement à proximité de Toulouse³ (*figure 114*). Elles sont conçues sur le même plan hexagonal et intègrent toutes des systèmes à gain direct, sous la forme de fenêtres double vitrage en façade orientée au sud-sud-ouest, qui regroupe à elles seules 90 % de la surface vitrée totale de la construction⁴. Bien que les façades soient toutes recouvertes de profilés en terre cuite, ces maisons diffèrent par leur technique de construction : l'objet de cette opération était précisément de déterminer le type de système constructif le plus approprié pour le climat de Toulouse grâce à leur instrumentation⁵. Les techniques de construction employées ont été les suivantes : trois constructions disposent respectivement d'une isolation à l'extérieur, à l'intérieur ou prise en sandwich entre deux murs en brique⁶. Une quatrième construction comporte une structure en ossature bois et la dernière emploie un « système d'isolation dynamique⁷ » : le mur en brique creuse permet à l'air neuf de circuler verticalement afin de le

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « a substantial nighttime greenhouse loss might be controlled with reflective drapes which have no significant conduction resistance. »

2 L. Kallipoliti, *The Architecture of Closed Worlds, or, What is the Power of Shit?*, *op. cit.*, p. 169.

3 Entretien avec Jean-Pierre Cordier, le 22/05/2019 à Toulouse.

4 *Project Monitor*, n°30, octobre 1988, p. 4. (Archives personnelles de Françoise Monchoux – Toulouse)

5 *Ibid.*, p. 2.

6 *Ibid.*, p. 3-5.

7 *Ibid.*, p. 3.

préchauffer par effet de cheminée¹. Deux types de planchers lourd et léger ont également été testés².



Figure 114 : Maisons individuelles du lotissement des Pradettes conçues par Cordier.
(*Project Monitor*, n°30, octobre 1988)

Ces constructions ont été instrumentées entre 1987 et 1989, inhabitées la première année puis habitées la seconde. Différentes données météorologiques et microclimatiques ont été collectées afin de mesurer précisément les besoins de chauffage des différentes constructions dont la température de consigne était fixée à 19 °C. Les résultats de la première année ont mis en évidence que les apports solaires ont assuré entre 17 et 25 % des besoins de chauffage suivant les constructions³. Les mesures ont montré que le comportement thermique des différentes constructions variait considérablement⁴. La maison à ossature bois est apparue comme la plus économe, ses besoins de chauffage étant moindres et assurés à près de 23 % par les apports solaires, bien que des surchauffes aient été relevées⁵. La maison à « isolation dynamique » a été

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 4.

3 *Ibid.*, p. 6.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 6-7.

considérée comme la plus équilibrée, avec près de 25 % des besoins de chauffage assurés par les apports solaires, tandis que les surchauffes ont été limitées par le plancher lourd en béton¹. Étrangement, les résultats les plus décevants ont été obtenus avec la maison bénéficiant d'une isolation thermique par l'extérieur : ses apports solaires mesurés sont les plus faibles et ses besoins de chauffage étaient plus importants que les quatre autres maisons². Ces mauvais résultats proviendraient d'une inertie thermique trop importante par rapport à la surface des vitrages, ainsi qu'à la présence de ponts thermiques liés à la mise en œuvre³.

Ce type d'opération, dont il existe de nombreux exemples, illustre l'importance de l'instrumentation pour les architectes associés à la conception bioclimatique, soucieux de confirmer ou d'infirmer les choix qu'ils envisageaient et de préciser leurs approximations. Ces architectes mettent aujourd'hui en avant une certaine expérience acquise grâce à leurs réalisations, qui leur permet de dimensionner intuitivement et avec une bonne approximation les techniques solaires passives après plusieurs années d'exercice⁴. Malgré son importance pour le développement de la conception bioclimatique, cette approche expérimentale sera parfois critiquée à cause des contraintes qu'elle impose et du caractère toujours partiel des résultats qu'elle permet d'obtenir. Pour Vaye et Nicolas, « [la] quantité de paramètres mis en cause, et particulièrement leur interdépendance, rend difficile – voire impossible – un suivi expérimental contrôlable ⁵ ». Ainsi quantifier expérimentalement « l'incidence de la variation d'un paramètre⁶ », comme les dimensions d'une serre par exemple, ne peut se faire qu'en fixant l'intégralité des autres paramètres (matériaux, masse, couleur...), d'où les limites de cette approche expérimentale qui ne permet pas d'étudier plusieurs paramètres simultanément⁷. Cette critique rejoint d'autres objections relatives à la généralisation des résultats obtenus lors de ces expérimentations, compte tenu de la complexité des phénomènes thermiques à l'œuvre dans les constructions bioclimatiques et solaires passives⁸.

En pratique et malgré ces limites, l'instrumentation restera considérée comme le principal moyen de valider expérimentalement les choix de conception effectués. L'intérêt pour

1 *Ibid.*, p. 7.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

5 F. Nicolas, M. Vaye, *Recherches sur les enveloppes bioclimatiques*, *op. cit.*, p. 3. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 45 ; G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 279-284.

les résultats obtenus était tel que les architectes regrettaient quand elle n'avait pas pu être réalisée pour différentes raisons (économique, technique...) et pouvaient réclamer l'aide de certains organismes pour les réaliser¹. Instrumenter une construction pouvait être considéré comme une manière de « terminer l'expérience² ». Bien entendu, le ressenti qualitatif des habitants était également considéré comme nous le verrons par la suite, mais l'intérêt de l'instrumentation était de pouvoir valider ou infirmer expérimentalement des choix techniques. Les résultats obtenus permettaient de comparer les performances théoriques ou estimées et les performances réelles d'une maison bioclimatique ou solaire passive. Mis en regard avec les relevés de la consommation des systèmes de chauffage ou de climatisation d'appoint, ils permettaient de dresser un bilan des économies d'énergie non renouvelables réalisées au cours d'une année. Pour les États-Unis, le pourcentage réel de chauffage assuré par le rayonnement solaire pouvait varier de 50 à 80 % et se situait en moyenne aux environs de 65 %³. Ce pourcentage moyen était vraisemblablement plus faible en France, de l'ordre de 40 à 50 %. Dans la plupart de ces réalisations, la majorité des besoins d'eau chaude sanitaire étaient assurés par un chauffe-eau solaire.

S'ils confirmaient généralement les intuitions des architectes et des ingénieurs, les résultats obtenus par l'instrumentation les ont parfois infirmées et ont mis en évidence l'inadaptation d'une technique solaire passive pour un climat local donné. Les chapitres suivants s'intéressent plus précisément aux limites des maisons solaires passives et bioclimatiques, qui tiennent à leur situation géographique et aux problèmes entraînés par la diffusion des techniques solaires passives qui sont parfois apparues comme inappropriées à certains types de climats locaux. Nous étudierons tout particulièrement le cas des serres qui ont cristallisé de nombreux débats relatifs à leur inconfort thermique et à l'ambiguïté de leur fonction climatique. Enfin, nous aborderons un problème central de la conception bioclimatique relatif à l'habitabilité des réalisations et au rôle déterminant des habitants.

1 R. Laignelot, « L'Expérience d'un architecte habitant sa propre maison solaire », p. 74 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*

3 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 67.

III.3. Problèmes et limites des réalisations bioclimatiques

Les chapitres suivants peuvent être considérés comme un bilan critique des réalisations bioclimatiques construites entre le début des années 1970 et le milieu des années 1980 en France et aux États-Unis selon quelques points choisis. Il vise à étudier certaines limites qui sont apparues au fur et à mesure que la conception bioclimatique s'est diffusée parmi les acteurs de cette démarche. Elles ont parfois été reprises par certains détracteurs de la conception bioclimatique, soucieux de démontrer les défauts de cette démarche et ses apories¹. Notre perspective est différente. En anticipant sur notre dernière partie, nous essaierons de développer la signification de ces limites et de montrer en quoi celles-ci sont positives et traduisent une remise en question des acteurs de la conception bioclimatique eux-mêmes. Ce chapitre, comme les deux précédents, s'appuie essentiellement sur les témoignages de ces acteurs et les limites que nous allons évoquer ont été relevées par les architectes ou les ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Nous aurons l'occasion de voir que si l'instrumentation des réalisations a permis de mettre en évidence certains problèmes d'intégration des techniques solaires passives, l'inconfort thermique ressenti par les habitants a également été un indicateur primordial pour les architectes, soucieux de minimiser l'inconfort de leurs réalisations.

Cette partie développe trois problèmes qui ont émergé à partir de la multiplication des constructions bioclimatiques et solaires passives en France et aux États-Unis à la fin des années 1970. Le premier problème concerne l'abstraction relative du climat local lors de la diffusion de ces réalisations par l'intermédiaire des publications. Les réalisations les plus largement diffusées bénéficiaient d'une implantation climatique et géographique particulièrement favorable, mais que paradoxalement les caractéristiques de cette implantation n'étaient que rarement communiquées dans les différentes publications. Ce premier problème en entraîne un autre, relatif à la diffusion des techniques solaires passives et au problème de leur reproductibilité. De nombreuses techniques solaires passives comme les serres ont été diffusées et vantées pour leurs performances, indépendamment du climat local où ces performances étaient effectives. Dans le cas des serres, leur multiplication et les difficultés liées à leur conception et leur dimensionnement ont abouti à de nombreuses réalisations inconfortables qui ont pu décrédibiliser l'intérêt de la conception bioclimatique aux yeux du public et des

1 Voir par exemple : L. Fernández-Galiano *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge/Londres : The MIT Press, (coll. Writing Architecture), trad. de l'espagnol par G. Cariño, 2000, p. 164.

professionnels. Cette seconde limite nous conduit à notre dernier problème qui concerne la place de l'habitant dans une maison bioclimatique et solaire passive. Nous verrons que l'habitabilité de ces maisons a souvent primé sur leur bon fonctionnement thermique et les habitants ont pu adopter des habitudes qui ont déjoué les anticipations des architectes et des ingénieurs. Dès lors, le problème de l'automatisation de nombreux systèmes conçus comme manipulables s'est posé, afin de ne pas gêner les habitudes des habitants et de garantir l'efficacité des techniques solaires passives.

III.3.1. La diffusion des techniques solaires passives et le problème de l'abstraction du climat

III.3.1.1. Le paradoxe de la diffusion des techniques solaires passives

Il peut paraître paradoxal qu'une méthode de conception mise au point dans le but de tirer parti du climat local et du microclimat d'un lieu, suivant des choix de conception effectués par référence à des phénomènes climatiques, microclimatiques ou physiologiques ait pu en négliger l'importance. Cependant, la diffusion des réalisations bioclimatiques par l'intermédiaire des publications et des manuels que nous avons évoqués a parfois eu tendance à valoriser les réalisations indépendamment du climat dans lequel elles étaient situées, et à négliger la mise en correspondance des choix effectués dans ces réalisations avec les données climatiques qualitatives ou quantitatives prises en compte par les concepteurs. Ainsi le fait que certaines techniques solaires passives aient « des *spécificités* et des *climats préférentiels d'utilisation*¹ », selon l'expression de Bardou et Arzoumanian ne transparaît pas véritablement à travers ces publications qui tendent à valoriser les constructions elles-mêmes, au détriment des caractéristiques du climat local.

Cette tendance a vraisemblablement entretenu l'idée que certaines de ces techniques étaient directement transposables d'un climat régional à un autre. Des techniques solaires passives conçues à Santa Fe au Nouveau-Mexique ont été employées dans le sud de la France², et de nombreux murs Trombe, initialement inventés à Odeillo-Font-Romeu, ont été construits à Santa Fe. Un exemple de cette transposition est la maison de l'architecte américain Douglas Kelbaugh construite en 1975 à New Jersey (*figure 115*). Kelbaugh a pris connaissance de

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

2 Entretien avec Georges Wursteisen, le 18/06/2019 à Cabestany.

l'existence du mur Trombe à partir de l'article de Moorcraft de 1973 que nous avons déjà évoqué¹, où cette technique est succinctement décrite². Enthousiasmé par son fonctionnement, il s'est appuyé sur les seuls documents diffusés dans cet article afin de concevoir sa maison, ne souhaitant pas solliciter l'équipe de Trombe³. Cet article illustré par quelques photographies et coupes donne l'épaisseur conventionnelle du mur Trombe-Michel (35 cm). Il présente également la règle de dimensionnement, selon laquelle 1 m² de mur capteur permet de chauffer 10 m³ du volume habité pour un bâtiment bien isolé, mais l'article précise que cette valeur n'est valable qu'aux latitudes voisines d'Odeillo-Font-Romeu⁴ (42° nord), alors que New Jersey est à une latitude légèrement plus basse (40° nord). Le cas de Kelbaugh n'est pas isolé et de nombreux architectes ou auto-constructeurs se sont lancés dans la construction de murs Trombe dès le milieu des années 1970 et ne disposaient que d'informations très incomplètes sur son fonctionnement et ses règles de dimensionnement, même en France⁵.

Kelbaugh a conçu un mur Trombe sur deux étages associé à une serre, l'ensemble étant protégé par des arbres à feuillage caduc⁶ (*figure 116*). Bien que située dans un climat nettement moins froid que celui d'Odeillo-Font-Romeu, l'isolation de la maison a été particulièrement soignée⁷. Le premier hiver, près de 75 % des besoins de chauffage ont été assurés par le rayonnement solaire, ces économies se faisant au prix d'une légère variation de la température de l'air intérieur et d'une limitation de la température de consigne à 14 °C la nuit, et à 16 ou 18 °C en journée⁸. Cette maison a été instrumentée par le LASL et a permis de mettre au point une méthode de calcul thermique simplifiée pour les murs Trombe⁹. Des problèmes liés au fonctionnement du mur Trombe sont néanmoins apparus à l'usage dès 1976. En l'absence de clapets anti-retour, la thermocirculation s'inversait la nuit et refroidissait l'air intérieur¹⁰. Pour résoudre ce problème, rencontré dans de nombreux murs Trombe, Kelbaugh a choisi d'installer des clapets automatiques asservis à un système de bascule au fréon commercialisé par

1 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *Architectural Design*, « At the Rally », vol. XLVI, 11/1976, p. 653 ; *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 80.

2 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *op. cit.*, p. 652-653.

3 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *op. cit.*, p. 653.

4 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *op. cit.*, p. 653.

5 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, *op. cit.*, p. 73.

6 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *op. cit.*, p. 653-654.

7 *Ibid.*, p. 653.

8 *Ibid.*, p. 654.

9 D. Kelbaugh, J. Tichy, « A Proposed Simplified Thermal Load Analysis Technique for Trombe Wall Passive Solar Heating Systems », p. 403 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

10 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *op. cit.*, p. 656.

Zomeworks¹. Ces améliorations, ainsi que d'autres détails, ont permis d'assurer 84 % des besoins de chauffage l'hiver suivant². Un second problème a concerné le refroidissement du mur Trombe : les ouvertures conçues par Kelbaugh en partie supérieure sont apparues trop étroites et dépendaient d'un petit ventilateur mal adapté à une abondante ventilation³. Cette moindre importance accordée au rafraîchissement lors de la conception provenait d'une transposition directe du mur Trombe, alors que les températures estivales à New Jersey sont très nettement supérieures à celles d'Odeillo-Font-Romeu.

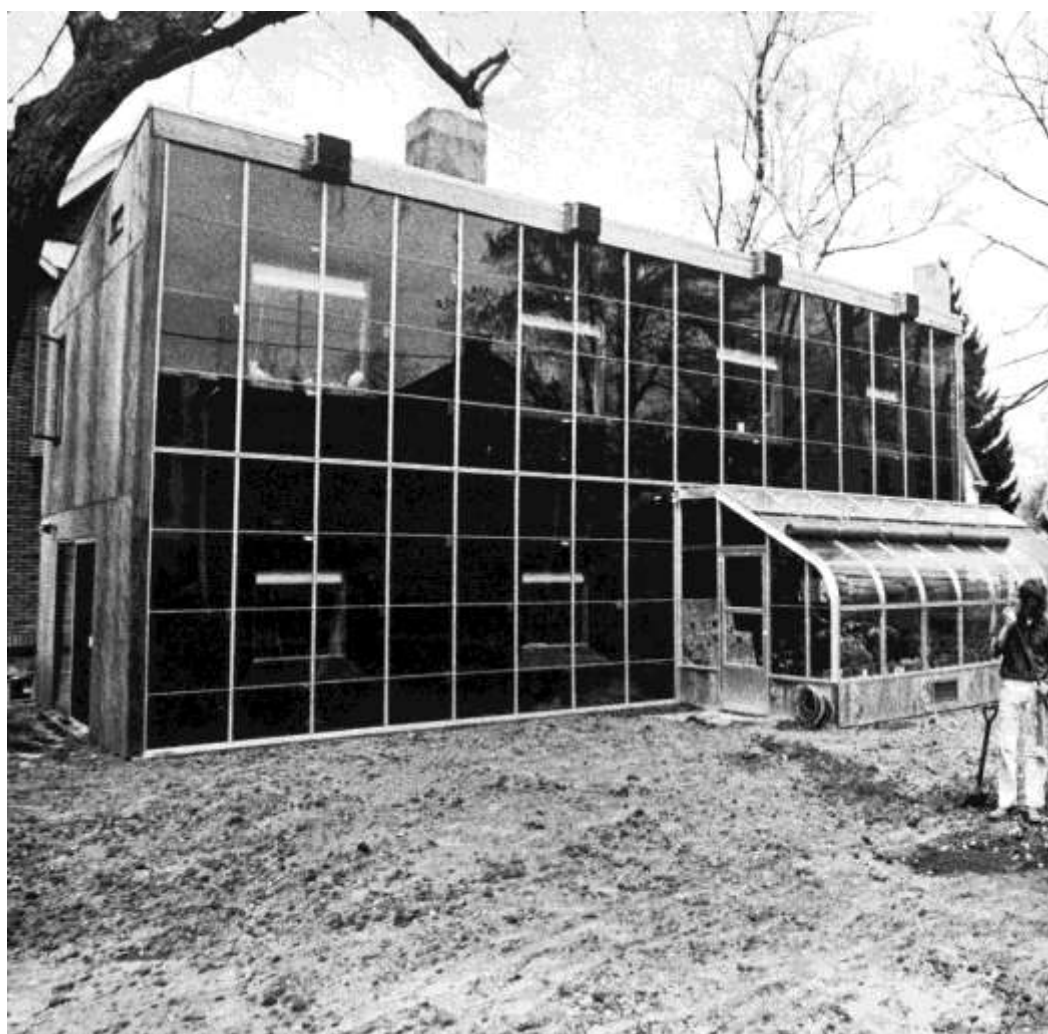


Figure 115 : Maison de D. Kelbaugh à New Jersey.

(N. Skurka, J. Naar, *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, New York : Ballantine Books, 1976, p. 122)

1 *Ibid.*

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 68. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », op. cit., p. 656.

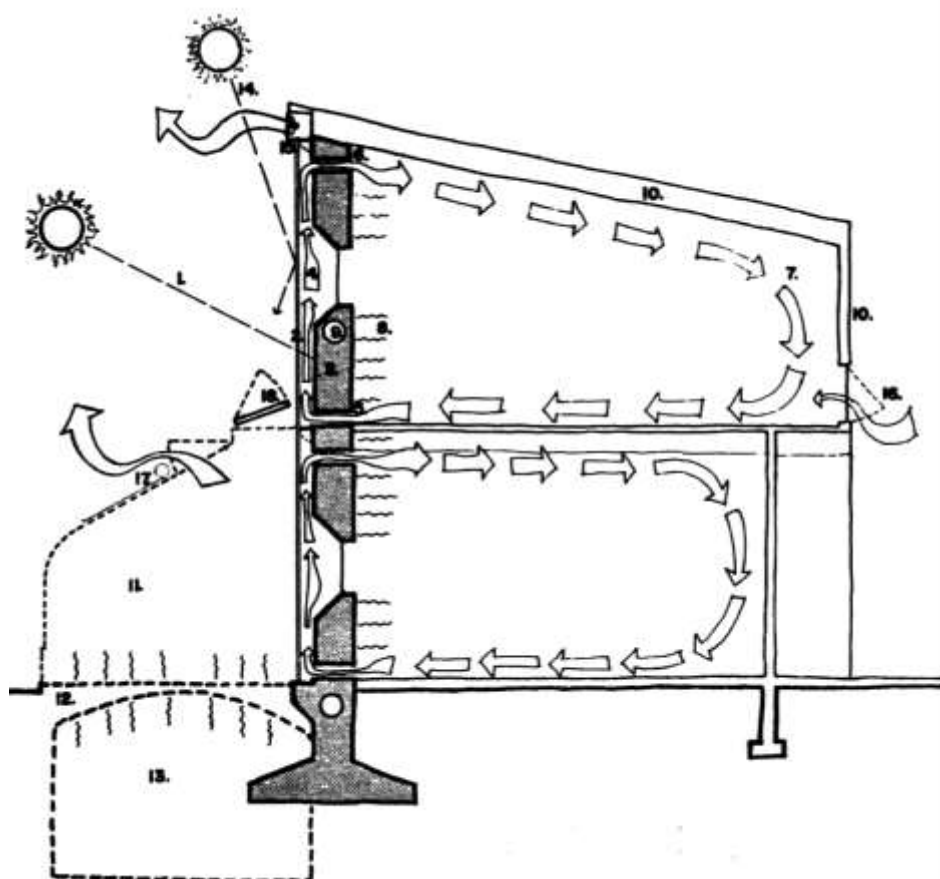


Figure 116 : *Coupe du mur Trombe sur deux niveaux de la maison de D. Kelbaugh.*
(D. Kelbaugh, « Kelbaugh House », p. 128 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit.)

Du point de vue de l'étude des techniques, cette transposition d'une technique solaire passive conçue pour un climat donné dans un autre climat régional d'une zone tempérée pose le problème de la relation entre les « faits techniques » et les « tendances techniques » étudiée par André Leroi-Gourhan en 1943¹. Leroi-Gourhan envisage le développement des techniques selon des tendances générales qui ont « un caractère inévitable² » et « prévisible³ », comme la recherche de l'abri ou du chauffage. Ces tendances s'expriment à travers différents « degrés du fait technique⁴ », qui permettent de répartir les objets techniques des plus génériques (1^{er} degré)

1 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. L'Homme et la matière*, op. cit., p. 27.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 29-35.

aux plus spécifiques, qui renvoient à une culture ou à un milieu déterminé (3^e ou 4^e degrés¹). Selon lui les faits techniques se spécifient soit par l'invention, c'est-à-dire par « la rencontre de la tendance et des mille coïncidences du milieu² », soit par l'emprunt.

Il semblerait que de nombreuses techniques solaires passives correspondent initialement à des faits techniques inventés pour un milieu climatique déterminé, mais leur diffusion par l'intermédiaire de publications et d'événements a rendu possible leur emprunt dans des climats très différents les uns des autres. Cet emprunt a été possible en faisant parfois abstraction du climat local où elles avaient été conçues, transformant ces faits techniques d'un degré assez élevé car assez spécifiques en faits techniques plus généraux, susceptibles d'être reproduits et empruntés. Sans affirmer que ces techniques fonctionnaient nécessairement moins bien dans d'autres climats, ces emprunts et ces phénomènes de transpositions créent une véritable tension entre d'une part la volonté de concevoir des constructions à partir du climat local et du microclimat suivant la conception bioclimatique, et d'autre part la possibilité de transposer indifféremment ces techniques dans d'autres climats. Chez les architectes, cette tension est illustrée par la volonté de concevoir et de produire des constructions qui puissent être qualifiées de vernaculaires³, c'est-à-dire par référence à un contexte géographique localisé, et la dimension nécessairement véhiculaire des modes de diffusion des techniques solaires passives et des réalisations sous la forme de publications ou de conférences. On aboutit ainsi à ce paradoxe produit par les supports de diffusion de la conception bioclimatique : plus une technique solaire passive était largement diffusée et moins son contexte climatique initial d'invention était communiqué.

III.3.1.2. Le problème des inventaires des maisons bioclimatiques et solaires passives

Bien qu'atténuée, cette tension apparaît à la lecture des différents inventaires qui ont pu être réalisés des constructions bioclimatiques et solaires passives. La fonction de ces inventaires était ambiguë puisqu'il s'agissait de témoigner de la diffusion de la conception bioclimatique et de sa fécondité, tout en montrant que son application à des climats locaux différenciés n'était pas la simple transposition d'une maison solaire archétypale, dont les acteurs critiquaient la

1 *Ibid.*, p. 33-34.

2 *Ibid.*, p. 27 ; X. Guchet, *Le Sens de l'évolution technique*, *op. cit.*, p. 126-127.

3 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 278.

pseudo-adaptation climatique¹. En France, les premiers inventaires ont été commandés à partir de 1979. Le premier a été réalisé à l'initiative du COMES (Commissariat à l'Énergie Solaire²) et du PIRDES (Programme Interdisciplinaire de Recherche pour le Développement de l'Énergie Solaire) et concerne toute l'Europe. Il regroupe soixante-dix-neuf réalisations françaises, sept réalisations britanniques, cinq réalisations en Espagne et en Suisse et quelques réalisations dans d'autres pays (Italie, Irlande³...) Vraisemblablement conseillés par le météorologue français Christian Perrin de Brichambaut, les auteurs de cet inventaire ont été attentifs à la description du climat local et du microclimat des constructions⁴. Ils soulèvent le problème central que nous avons évoqué, qui serait « de savoir si une technique solaire passive (gain direct, serre, mur accumulateur, etc.) est mieux adaptée que d'autres à un type de climat ou de microclimat donné⁵. » Afin de donner des éléments de réponse, chaque réalisation présentée dans cet inventaire est accompagnée d'un bref descriptif du climat local, qui comprend le type de temps, la latitude et l'altitude, la durée d'ensoleillement annuel et d'autres données relatives au rayonnement solaire, la température moyenne annuelle, le nombre de degrés-jours ainsi que l'orientation et la vitesse moyenne des vents dominants. Il est parfois complété par une description très lacunaire du site ainsi que de sa distance par rapport à la station météorologique la plus proche d'où proviennent les données (*figure 117*). Par comparaison aux autres inventaires réalisés ultérieurement, ces renseignements sur le climat local et le microclimat des réalisations sont particulièrement complets.

Dans un autre inventaire réalisé en 1980, Ménard s'est efforcé de décrire plus complètement le site et le microclimat des constructions qu'il a inventoriées, tout en rappelant des données climatiques essentielles comme la durée d'ensoleillement annuel ou l'orientation des vents dominants⁶. Il affirme que « [l'existence] physique du site est toujours déterminante⁷ » et qu'en l'ignorant « on s'expose aux pires aberrations⁸. » Cependant, il

-
- 1 J.-L. Izard, « Pathologie de la conception bioclimatique en architecture », p. 471 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 Le COMES a remplacé en 1978 la Délégation aux Énergies Nouvelles créée en 1975. Voir : F. Jarrige, A. Vignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, op. cit., p. 296.
 - 3 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Trad. *Survey of European Passive Solar Buildings*, Washington : US Department of Energy, trad. du français par J. Wood, 1982, 220 p.
 - 4 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, « Note des auteurs », *Constructions solaires passives européennes*, op. cit.
 - 5 *Ibid.*
 - 6 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 9.
 - 7 *Ibid.*
 - 8 *Ibid.*

rappelle que, compte tenu des techniques employées et de l'imprécision relative à leur dimensionnement, l'appréciation « de l'énergie solaire disponible et des besoins mathématiquement mesurables reste habituellement approximative¹ ». Son but n'est pas d'être exhaustif ni d'accumuler les données climatiques du site, mais de mentionner seulement les données significatives qui ont effectivement été prises en compte lors de la conception des maisons solaires passives qu'il présente. Bien que les données climatiques et microclimatiques présentées dans ces inventaires de 1979 et 1980 paraissent lacunaires, la durée d'ensoleillement annuel, la latitude et l'altitude constituent déjà des données indicatives très précieuses.

CLIMAT	
TYPE :	OCÉANIQUE ALTÉRÉ
LATITUDE :	43°N 3 - ALTITUDE : 800M
DURÉE D'ENSOLEILLEMENT ANNUELLE :	1946H
RAYONNEMENT GLOBAL - PLAN HORIZONTAL :	1356KWH/M ² .AN
RAYONNEMENT DIFFUS :	42%
VENT-DIRECTION DOMINANTE :	N.O 315° - VITESSE MOYENNE : FAIBLE 3M/S
DEGRÉS-JOURS DE CHAUFFAGE (BASE 18°C) :	3118°C
TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE :	9,5°C
TEMPÉRATURE DE BASE CHAUFFAGE :	-8°C
STATION MÉTÉO LA PLUS PROCHE :	SAINT GIRONS DISTANCE : 20KM
CARACTÉRISTIQUES DU SITE :	
PENTE SUD-EST :	30%, SITE MONTAGNEUX, PROTECTION VÉGÉTAUX ET COLLINES SUD OUEST À NORD
MASQUES MONTAGNEUX :	ENSOLEILLEMENT DE 6H30 AU SOLSTICE D'HIVER

Figure 117 : Exemple de description détaillée du microclimat et du climat local d'une construction dans l'inventaire des Constructions solaires passives européennes.

(J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, Paris : CNRS/COMES/PIRDES, 1979, n. p.)

Malgré leur importance, ces données n'apparaissent plus dans les inventaires suivants. En 1982, un nouvel inventaire réalisé en collaboration avec le COMES par l'école d'architecture de Toulouse recense plus de deux cents réalisations en France². Aucune référence n'est faite au climat local de chacune des réalisations et seules les techniques solaires passives qui sont employées et leurs performances sont mentionnées. Cet effet d'abstraction du « contexte climatique³ » des constructions est courant dans les publications françaises destinées à un public plus large, comme les périodiques qui présentaient parfois les réalisations

1 *Ibid.*

2 École d'Architecture de Toulouse, COMES (éds.), *2e Colloque Habitants de Maisons Solaires. Toulouse, 19-20 juin*, s. l., 1982, n. d. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

3 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 9.

bioclimatiques et solaires passives sans la moindre information sur le climat local. Ces publications insistaient généralement sur la reproductibilité des techniques solaires passives et sur la possibilité de généraliser leur emploi.

Cette abstraction existe également dans les inventaires américains. Certains mentionnent les données climatiques du lieu où sont situées les réalisations¹, comme la latitude et l'altitude du lieu, différentes données relatives à l'ensoleillement et aux températures moyennes pour l'été ou l'hiver. Mais d'autres inventaires très importants, comme celui réalisé par William Shurcliff et publié en 1978², font en revanche l'impasse sur ce type d'information pourtant crucial. Seules quelques communications faites lors des *Passive Solar Conferences* abordent le climat régional, local ou le microclimat des constructions³. Une exception notable concerne le système *Skytherm* : Hay et Yellott rappellent souvent lors de leurs nombreuses communications que cette technique n'est adaptée qu'aux latitudes basses et aux climats relativement secs qui présentent une faible nébulosité, en s'appuyant sur les travaux de Bliss⁴. Mais ces informations restent encore très partielles, et lors des *Passive Solar Conferences* Hay n'évoque pas le fait que la maison qu'il a conçue à Atascadero pour tester le système *Skytherm* bénéficie vraisemblablement d'un climat local et d'un microclimat nettement plus favorable au rafraîchissement que celui de Phoenix où il avait été initialement testé⁵.

Bien qu'évidente, l'idée selon laquelle « les solutions du Nouveau-Mexique ne sont pas transposables brutalement à la région parisienne⁶ » apparaît donc rarement à la lecture des publications relatives aux techniques solaires passives. On peut faire l'hypothèse que cette abstraction du climat régional, local et du microclimat des constructions bioclimatiques a permis de diffuser plus largement les techniques solaires passives et de promouvoir l'idée que

-
- 1 A.I.A. Research Corporation (éd.) *A Survey of Passive Solar Buildings*, Washington : U.S. Department of Housing and Urban Development/U.S. Department of Energy, 1978, 173 p. ; D. Wright, D. A. Andrejko, *Passive Solar Architecture, Logic & Beauty: 35 Outstanding Houses Across the United States*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1982, 255 p.
 - 2 W. A. Shurcliff, *Solar Heated Buildings of North America: 120 Outstanding Examples*, New Hampshire : Brick House Publishing Co., 1978, 295 p.
 - 3 Voir par exemple : D. B. Kazama, M. B. Hunt, « An Analysis of California's Building Climates », p. 69-72 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 4 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 56 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 5 H. R. Hay, « The California Solarchitecture House », p. EH.73-4 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne).
 - 6 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 41.

celles-ci pouvaient fonctionner dans des climats relativement différents. Cependant, même des données climatiques relativement sommaires comme la durée d'ensoleillement annuel moyenne montrent de profondes disparités climatiques entre les réalisations françaises, mais également par rapport aux États-Unis. Ces disparités apparaissent également lorsqu'on prend en compte des données géographiques comme la latitude, mais surtout l'altitude qui varie considérablement d'une construction à l'autre. Sans affirmer que les techniques solaires passives ont seulement été conçues pour un type de climat local particulier, notre hypothèse, étayée par les entretiens que nous avons pu mener, est que ces disparités sont problématiques dans la mesure où les mêmes techniques solaires passives ont été employées dans des climats régionaux ou locaux très différents.

III.3.1.3. La singularité des climats de montagne d'Odeillo-Font-Romeu et du Nouveau-Mexique

Pour le cas de la France, il existe par exemple d'importantes différences entre le climat de montagne d'Odeillo-Font-Romeu (42° nord) et celui des autres localités où on trouve des murs Trombe. Situées à 1550 mètres d'altitude, les premières maisons à mur Trombe d'Odeillo-Font-Romeu bénéficient d'un ensoleillement exceptionnel de 2 500 à 3 000 heures par an¹, d'un climat local très favorable², avec une très faible nébulosité, malgré le vent et des températures nettement plus froides qu'en plaine. Par comparaison, Chauvency-le-Château (49° nord) où a été construite une maison équipée de murs Trombe en 1969 conçue par Michel, est située à 250 mètres d'altitude et bénéficie vraisemblablement d'un ensoleillement d'environ 1 700 heures par an³, soit près de 1 000 heures de moins qu'à Odeillo-Font-Romeu si l'on tient compte des valeurs sous-estimées. Cette différence de climat régional explique l'important écart de performance du mur Trombe entre ces deux localités : s'il assure entre 60 et 70 % des besoins de chauffage à Odeillo-Font-Romeu, il n'en couvre que 35 à 45 % à Chauvency-le-Château⁴. De l'aveu même de Trombe, le mur Trombe a d'abord été conçu pour « les pays à ciel clair, soit

-
- 1 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, op. cit., F 52-F 54 ; G. Escourrou, *Le Climat de la France*, PUF : Paris, (coll. Que sais-je ?), 1982, p. 110.
 - 2 D. Behrman, *Solar Energy. The Awakening Science*, [1ère éd. 1976, 2e éd. rev. et augm. 1979], Londres : Routledge & Kegan Paul, 1979, p. 27, 38.
 - 3 G. Escourrou, *Le Climat de la France*, op. cit., p. 59.
 - 4 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.1 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

les pays froids, par exemple certaines régions de montagne, soit les pays chauds, type Sahara¹ », ce qui explique que son intégration à des climats régionaux caractérisés par une importante nébulosité soit restée imparfaite².

Comme le mur Trombe, de nombreuses autres techniques solaires passives à gain direct ou indirect sont initialement associées à un climat de montagne très ensoleillé. Le climat régional du Nouveau-Mexique est à ce titre exceptionnel : si l'on considère la quantité d'énergie reçue au sol par unité de surface horizontale, le climat de cette région fait partie des plus ensoleillés de la planète, étant donné l'altitude et la très faible nébulosité³. Les villes de Santa Fe ou d'Albuquerque (35° nord), qui ont concentré les développements de ces techniques, bénéficient de 3 400 heures d'ensoleillement annuel⁴, et sont situées à plus de 1500 mètres d'altitude. Quoique supérieure à la moyenne des États-Unis, cette durée d'ensoleillement est bien moindre que pour d'autres localités, situées dans les zones désertiques de l'Arizona par exemple, mais l'amplitude annuelle des températures y est nettement plus importante et reste caractéristique des climats secs de montagne à dominante froide. Ces qualités n'ont pas échappé à certains acteurs de la conception solaire passive, comme van Dresser, qui affirme en 1977 :

« Au Nouveau-Mexique, en particulier dans les hauts plateaux et les régions montagneuses, l'énergie solaire relève du bon sens. Ces régions ont des hivers rigoureux qui rendent difficile le maintien de nos maisons et de nos lieux de travail au chaud. Pourtant, nous vivons sous un flot de rayonnement solaire qui apporte de la chaleur et qui est inégalé dans la plupart du pays⁵. »

Elles sont aussi reconnues par Yellott, qui déclare à la même période :

« Le Nouveau-Mexique est actuellement le centre d'intérêt et d'activité du chauffage passif, comme c'est le cas depuis plusieurs années. La combinaison de la haute altitude et du ciel

1 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 110 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

2 Entretien avec Dominique Amouroux, le 06/03/2021 (à distance).

3 Y.-F. Tuan, C. E. Everard, *The Climate of New Mexico*, [1ère éd. 1969], Santa Fe : State Planning Office, 1973, p. 157.

4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit. p. 50, 54. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) ; F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, op. cit., p. 39.

5 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 21. Traduction personnelle, citation originale : « In New Mexico—particularly in the uplands and mountainous regions—solar energy makes good sense. These regions have severe winters which make it difficult to keep our homes and work places warm. Yet we live under a flood of warmth-bearing sunlight unmatched in most parts of the country. »

relativement sans nuages rend le chauffage beaucoup plus important que le rafraîchissement, contrairement à la zone de l'Arizona où la basse altitude et les températures élevées prédominent¹. »

Ces besoins de chauffage importants dans un climat régional très ensoleillé expliquent que le Nouveau-Mexique ait concentré la majorité des recherches sur les techniques solaires passives : Yellott affirme en 1978 que pratiquement « tous les types de systèmes purement passifs sont désormais représentés dans la région d'Albuquerque, Santa Fe et Los Alamos, au centre du Nouveau-Mexique². »

Ces caractéristiques climatiques exceptionnelles apparaissent à travers la méthode de calcul simplifiée proposée par Balcomb et son équipe pour prévoir la contribution aux besoins de chauffage assurée par les techniques solaires passives à gain indirect³. Cette méthode, dite méthode SLR pour *Solar Load Ratio*, a été adaptée en France au début des années 1980⁴. Elle est basée sur un « indice climatique⁵ » ou « indice de capacité solaire⁶ » calculé à partir du nombre de degrés-jours mensuels ou annuels et de l'ensoleillement reçu par une surface verticale pendant cette même période. Sans rentrer dans le détail de cette méthode de calcul complexe, l'analyse de cet indice met en évidence qu'au Nouveau-Mexique, et notamment à Santa Fe et à Albuquerque, il est théoriquement possible d'assurer presque l'intégralité (90 %) des besoins de chauffage via une très grande surface de captage de mur Trombe ou de *Drumwall*, et ce malgré l'importance de ces besoins de chauffage qui dépassent toutes les autres localités bénéficiant d'un ensoleillement comparable⁷. Dans un climat moins ensoleillé, la surface de captage pour assurer les mêmes besoins de chauffage devrait être démesurément grande et

-
- 1 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 3 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) Traduction personnelle, citation originale : « New Mexico is the present center of interest and activity in passive heating, as it has been for a number of years. The combination of high altitude and relatively cloud-free skies makes heating much more important than cooling, as contrasted with the Arizona scene where low altitude and high temperatures prevail. »
 - 2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Virtually every type of purely passive system is now represented in the Albuquerque-Santa Fe-Los Alamos area of central New Mexico. »
 - 3 J. D. Balcomb, R. D. McFarland, « A Simple Empirical Method for Estimating the Performance of a Passive Solar Heated Building of the Thermal Storage Wall Type », p. 377-389 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 4 R. Célaire, P. Diaz-Pedregal, J-L. Izard, *Méthode B-Sol. Calcul du coefficient volumique des besoins de chauffage des logements*, op. cit., p. III. (Archives personnelles de Robert Célaire – Lambesc)
 - 5 *Ibid.*, p. 2.
 - 6 J. D. Balcomb, R. D. McFarland, « A Simple Empirical Method for Estimating the Performance of a Passive Solar Heated Building of the Thermal Storage Wall Type », p. 379 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 7 *Ibid.*, p. 388.

dépasserait largement une centaine de mètres carrés. Selon cette méthode de calcul, une même construction disposant de la même surface de mur Trombe au sud située à Albuquerque pourrait assurer 50 % de ses besoins de chauffage, contre seulement 30 % si elle était située dans la ville de New Jersey¹. Bien qu'issues d'une méthode très simplifiée, ces indications mettent en évidence les qualités du climat régional du centre du Nouveau-Mexique. Au même titre qu'Odeillo-Font-Romeu et Mont-Louis bénéficient d'un climat exceptionnel du point de vue de la qualité de l'ensoleillement par rapport à l'ensemble de la France, les villes de Santa Fe ou d'Albuquerque au Nouveau-Mexique sont caractérisées par un ensoleillement très abondant ainsi qu'une très grande amplitude annuelle des températures due à l'altitude, qui les différencient des autres localités des États-Unis. On trouve dans ces climats locaux une convergence entre un ensoleillement très abondant et des besoins de chauffage très importants.

III.3.1.4. Santa Fe : un climat exceptionnel et un contexte culturel propice au développement des techniques solaires passives

Pour les architectes et les ingénieurs français associés à la conception bioclimatique, le climat du Nouveau-Mexique est cependant considéré comme bien plus favorable à l'utilisation des techniques solaires passives, notamment à gain direct. C'est ce que fait remarquer Laignelot lors d'un échange avec l'architecte américain David Wright, où il affirme que ses maisons réalisées à Santa Fe « marchent dans un climat très froid, mais très ensoleillé² », incomparable avec les climats qui existent en France. S'il existe des analogies entre les climats de montagne très ensoleillés de Santa Fe et d'Odeillo-Font-Romeu, les qualités du climat du centre du Nouveau-Mexique par rapport aux climats français les plus favorables n'ont pas échappé aux architectes et aux ingénieurs français qui s'y sont rendus. L'ingénieur Robert Célaire a vécu un an à Santa Fe entre 1979 et 1980, où il a travaillé pour la New Mexico Solar Energy Association (NMSEA) et a participé à la conception de nombreuses maisons solaires passives à Santa Fe et aux alentours³. Selon lui, le climat local de Santa Fe est exceptionnel compte tenu du fait que cette ville est située à 2100 mètres d'altitude et caractérisée par des températures très basses en

1 *Ibid.*

2 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 84 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

hiver, qui sont compensées par un ensoleillement important et régulier bien plus considérable que celui d'Odeillo-Font-Romeu¹. Il explique :

« On est au 36° parallèle, donc les journées sont beaucoup plus longues [qu'à Odeillo]. Il y a des journées en hiver de neuf heures et demie, ce qui veut dire qu'il y a une heure et demie de plus de soleil que dans le sud de la France, et qu'il y a aussi une heure et demie de nuit en moins. Cela représente une heure et demie de captage en plus et autant de déperditions en moins². »

Les caractéristiques du climat de Santa Fe expliquent la popularité des maisons bioclimatiques dans cette aire géographique et l'intérêt économique pour ces constructions. En effet, les promoteurs de la région de Santa Fe donnaient comme argument de vente des maisons solaires passives qu'elles coûtaient nécessairement moins de cent dollars de chauffage par an à leurs habitants³. À titre de comparaison, le coût du chauffage d'appoint d'une construction dotée de murs Trombe située à Briançon, en France, dans un climat très favorable puisque bénéficiant d'un ensoleillement de 2 500 heures annuellement était quatre fois supérieur⁴. Cet argument économique mis en avant dans la région de Santa Fe était susceptible de faire accepter aux yeux des particuliers le surcoût éventuel engendré par la conception et la construction d'une maison solaire passive. L'investissement pouvait être rentabilisé bien plus rapidement que dans de nombreux autres climats moins favorables.

En plus de ces caractéristiques climatiques exceptionnelles, l'intérêt pour la conception solaire passive dans cette région était encouragé par la New Mexico Solar Energy Association (NMSEA) créée par van Dresser, Baer et Haggard en 1972. Cette association toujours en activité regroupait près de 2 000 membres en 1978, ce qui en faisait « l'une des organisations de ce type les plus actives au monde⁵ ». Elle prenait la forme d'un « bureau d'étude associatif⁶ » directement financé par le gouvernement américain et avait pour but d'assister les particuliers souhaitant construire une maison solaire passive dans la région du Nouveau-Mexique et de promouvoir la conception solaire passive auprès des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage⁷.

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* ; R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 283.

4 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 74.

5 P. van Dresser, « The Growth of Folk Solar Architecture in New Mexico », p. 782 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) Traduction personnelle, citation originale : « one of the most active organization of this kind in the world ».

6 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

7 *Ibid.*

Cette association diffusait également un bulletin mensuel qui présentait de nombreuses techniques solaires passives ainsi que des manuels, comme le *Trombe Wall Design Manual* (*Manuel de conception du mur Trombe*) publié en janvier 1979¹. Le Nouveau-Mexique était plus généralement connu pour être un lieu central de la contre-culture², marqué par la présence de nombreux « marginaux³ » séduits par un mode de vie alternatif et attirés par la possibilité de réaliser des maisons solaires passives en auto-construction à moindre coût. Ces caractéristiques climatiques et culturelles du Nouveau-Mexique, et particulièrement de la région de Santa Fe, expliquent en partie pourquoi cette région a été le principal foyer de promotion et de développement de la conception bioclimatique et solaire passive qui a pu fédérer de nombreux acteurs. Ainsi, dans un rayon de 120 kilomètres autour de Santa Fe, on dénombrait plus de 200 maisons solaires en 1978⁴, alors qu'à la même période on comptait moins de cinquante réalisations de ce type dans la France entière, dont un quart étaient situées à Odeillo-Font-Romeu ou à proximité⁵.

Ces quelques éléments relatifs aux climats locaux d'Odeillo-Font-Romeu et du centre du Nouveau-Mexique, ainsi qu'au rôle de certaines organisations locales dans la promotion de la conception bioclimatique et solaire passive, mettent en évidence la profonde singularité climatique et culturelle de ces localités. En plus de ces caractéristiques climatiques, ces lieux regroupaient des centres de recherches importants sur ces sujets puisque le « Laboratoire de l'énergie solaire » du CNRS était situé à d'Odeillo-Font-Romeu, et que la ville de Los Alamos, où Balcomb et son équipe ont mené leurs recherches, est située à proximité de Santa Fe et d'Albuquerque⁶. Cette convergence de facteurs climatiques, géographiques, culturels et scientifiques a favorisé le développement des techniques solaires passives et l'application de la conception bioclimatique dans ces localités, qui ont attiré de nombreux acteurs associés à cette démarche de conception. Cette concentration a contribué à façonner l'image de lieux symboliques et exemplaires pour la conception bioclimatique : au même titre que le Nouveau-

1 *Southwest Bulletin New Mexico Solar Energy Association*, vol. 3, n°2, décembre 1978, p. 9-11. (Archives personnelles de Georges Wursteisen – Cabestany)

2 A. Kirk, « Alloyed: Countercultural Bricoleurs and the Design Science Revival », p. 315 in : D. Kaiser, W. P. McCray (éds.) *Groovy Science: Knowledge, Innovation, and American Counterculture*, op. cit. ; R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 282-283.

3 P. van Dresser, « The Growth of Folk Solar Architecture in New Mexico », p. 781 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 *Ibid.*, p. 782.

5 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, *Constructions solaires passives européennes*, op. cit.

6 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 282.

Mexique était considéré comme « la Mecque¹ » par les acteurs français en ce qui concerne les réalisations solaires passives, la visite d'Odeillo-Font-Romeu était envisagée comme un « pèlerinage² » pour les acteurs américains de passage en France. Cette dimension quasiment religieuse ou du moins symbolique s'explique en partie par cette convergence de facteurs que nous avons évoqués et par l'importante diffusion des constructions réalisées dans ces lieux, au prix d'une certaine abstraction du climat exceptionnel de ces localités.

Mais le fait qu'une grande partie des maisons bioclimatiques et solaires passives construites entre le milieu des années 1970 et le début des années 1980 se soit concentrée dans ces lieux relativise l'opinion qui voudrait que les techniques solaires passives soient facilement transposables dans d'autres climats. L'idée selon laquelle ces techniques peuvent être utilisées « de Perpignan à Dunkerque, et de Strasbourg à Brest³ » paraît être une simplification abusive. Même si des constructions solaires passives et bioclimatiques ont bien entendu été réalisées ailleurs, le fait que les constructions situées à proximité d'Odeillo-Font-Romeu ou de Santa Fe aient systématiquement été prises pour exemples et abondamment diffusées à l'époque traduit une profonde ambiguïté. Elle résulte d'une tension entre l'ambition de la conception bioclimatique, qui doit théoriquement être applicable à tous les climats, et les problèmes de conception qui apparaissent dans les climats moins favorables à l'emploi des techniques solaires passives considérées comme les plus performantes. Il y aurait alors des climats locaux ou régionaux moins favorables à l'application de la conception bioclimatique, ce qui serait contradictoire avec l'ambition initiale de cette méthode de conception. En réalité, cette contradiction ne tient pas à la conception bioclimatique elle-même, mais provient de la tendance des concepteurs à vouloir transposer des techniques solaires passives qui ont fait preuve de leur efficacité dans des climats différents. Ce point est fondamental : il marque une différence nette entre l'ambition théorique de la conception bioclimatique et les problèmes liés à son application. Pour illustrer cette tendance à la reproduction des techniques solaires passives éprouvées et les problèmes qu'elle occasionne, nous allons étudier le cas de la serre qui a cristallisé de nombreux débats.

1 Entretien avec Frédéric Nicolas, le 09/07/2019 à Apt.

2 *Ibid.*

3 F. Lewino, « Guide de la construction », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 66, *op. cit.*, p. 17.

III.3.2. Le problème de la reproductibilité d'une technique solaire passive : le cas de la serre

III.3.2.1. La serre : une technique solaire passive adaptée à tous les climats ?

Nous avons évoqué le fait que les architectes associés à la conception bioclimatique et solaire passive étaient soucieux de valider expérimentalement les choix techniques qu'ils effectuaient, afin d'affiner leurs approximations et de justifier l'intérêt économique de ce mode de conception. Mais dans quelle mesure de bons résultats obtenus avec une technique solaire passive dans un climat local déterminé permettent-ils d'en déduire qu'elle est reproductible dans d'autres climats ? Ce problème de reproductibilité d'une technique solaire passive explique la prudence de certains architectes vis-à-vis de la généralisation de ces résultats expérimentaux¹. La diffusion de ces techniques par l'intermédiaire de certaines publications a entretenu l'idée qu'elles pouvaient être reproduites dans des climats régionaux très différents, n'ayant parfois rien à voir avec les « climats préférentiels d'utilisation² » pour lesquels elles avaient été initialement conçues. Cette tendance apparaît implicitement à travers de rares projets de maisons conçues pour fonctionner « dans n'importe quelle localisation géographique ou climatique³ » imaginés par certains acteurs de la conception bioclimatique ou par des promoteurs immobiliers souhaitant capitaliser sur le succès des maisons solaires passives à la fin des années 1970. Elle constitue une contradiction importante compte tenu des exigences de cette démarche, dont l'axiome principal affirme la diversité des climats locaux et des microclimats et donc l'absurdité logique de transposer une construction d'un climat à un autre⁴. Quoique ces excès aient été marginaux, ils illustrent cette tendance à la reproduction de techniques ou de systèmes, qui a été mise en évidence et critiquée par certains acteurs de la conception bioclimatique dès la fin des années 1970. Elle a permis de révéler les problèmes que nous avons soulevés précédemment et de démontrer l'inadéquation de certaines techniques solaires passives par rapport à certains climats.

1 F. Nicolas, M. Vaye, *Recherches sur les enveloppes bioclimatiques*, op. cit., p. 3. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

3 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 38. David Wright a également proposé un projet de maison censée convenir à « tous les climats ». Voir : D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 232-233.

4 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 9.

Si l'on s'intéresse au seul cas de la France, l'utilisation des serres a concentré de nombreuses controverses et débats relatifs à la reproduction de cette technique solaire passive dans différents climats. Pour de nombreux architectes et ingénieurs, la serre constitue une technique solaire passive à gain direct privilégiée, qui permet d'étendre la surface habitable, d'éventuellement délimiter un espace cultivable, et d'offrir les bénéfices thermiques d'un espace-tampon. Cette technique solaire passive de chauffage à gain direct a été particulièrement employée par les architectes français associés à la conception bioclimatique, notamment pour les rénovations solaires passives (nommées « *passive solar retrofit* » aux États-Unis). Cet emploi a été généralisé au point que la conception bioclimatique et l'intégration des serres aux constructions ont pu être confondues en France, entre la fin des années 1970 et le début des années 1980. Durant cette période, les serres constituaient systématiquement « le centre des projets bioclimatiques¹ », au point que des acteurs ont pu parler de « serres bioclimatiques² ». Cet engouement pour les serres explique qu'elles aient parfois été présentées comme susceptibles « de satisfaire tous les cas de figure climatiques³ », à condition d'être correctement dimensionnées et intégrées. Aux yeux des non-spécialistes, les serres étaient alors généralement considérées comme un « des signes du bioclimatisme⁴ » à cette période, c'est-à-dire comme un élément caractéristique d'une maison bioclimatique.

Mais cet emploi généralisé des serres dans différents climats régionaux et locaux à travers la France s'est heurté à de nombreuses critiques de la part des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique, mais aussi des habitants, compte tenu de l'inconfort thermique qu'elles pouvaient entraîner. Ces critiques tenaient d'une part à une mauvaise conception de ces serres, mal adaptées aux climats très secs et ensoleillés, et d'autre part à l'ambiguïté initiale quant à leur fonction. Malgré ses qualités, la serre est considérée comme un « système à mettre en œuvre avec prudence car ses comportements sont opposés entre le jour et la nuit d'une part, l'hiver et l'été d'autre part⁵ » comme le note justement Izard. Ce problème, qui se traduit par de rapides variations des températures à l'intérieur de la serre, avait également été bien identifié aux États-Unis⁶. Du point de vue thermique, la serre est un

1 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 10.

2 *Ibid.*

3 D. Simonnet, « Quarante deux maisons solaires », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, op. cit., p. 61.

4 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 42.

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 71.

6 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *Architectural Design*, op. cit., p. 555-556.

« espace amplificateur¹ » et non un « espace régulateur² » puisqu'elle tend à accentuer « les minima et les maxima des températures intérieures³ », même associée à une importante inertie thermique. Bien que les serres aient fait l'objet de modélisations au LASL et au COSTIC en France, « le problème du comportement thermique réel des serres et verrières hermétiques est loin d'être élucidé⁴ » au début des années 1980 et restait embrouillé par des « facteurs affectifs⁵ » que nous avons évoqués, qui surévaluaient les bénéfices de cette technique. Malgré l'intérêt généralisé pour les serres, certains des manuels recommandent cependant de les utiliser seulement dans des climats déterminés, bénéficiant d'une importante nébulosité. C'est le cas d'*Archi bio* où l'on peut lire :

« La serre est un système complexe qu'il est difficile de maîtriser : elle semble être plus adaptée aux climats où domine le rayonnement diffus et où le rayonnement terrestre est moins intense. Dans les autres climats marqués par d'intenses rayonnements, la serre demande à être équipée d'occultations et de protections thermiques sous peine d'aggraver les conditions intérieures par rapport à celles de l'extérieur⁶. »

Les serres ont en effet la propriété d'être adaptées au captage du rayonnement diffus⁷. Ces recommandations n'ont pas empêché les architectes associés à la conception bioclimatique d'intégrer des serres à leurs constructions dans des climats pourtant très ensoleillés, comme le climat méditerranéen⁸. En plus d'être inadaptées à ces climats, certaines serres présentaient souvent des erreurs de conception préjudiciables pour le confort thermique (mauvaise orientation, protections inexistantes, vitrages obliques...).

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 67.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 155.

5 *Ibid.*

6 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 75.

7 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 10.

8 J.-L. Izard, « Pathologie de la conception bioclimatique en architecture », p. 471 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

III.3.2.2. L'inconfort thermique : un facteur d'évolution des serres et de leur dimensionnement

Toutes ces erreurs peuvent être observées chez des architectes pourtant familiers de la conception bioclimatique et connus pour leur bonne maîtrise de cette méthode de conception, ce qui montre que cette tendance à la reproduction de techniques solaires passives comme les serres dans des climats inappropriés n'était pas un phénomène isolé. Cependant, ces architectes ont réussi à contenir cette tendance grâce à l'observation, à l'instrumentation et à la critique de leurs réalisations suivant une approche expérimentale. Ils ont ainsi réussi à faire évoluer les règles de dimensionnement concernant certaines techniques : dans le cas des serres, la constatation de l'inconfort thermique important qu'elles pouvaient générer dans des constructions situées dans des climats très ensoleillés a été un facteur d'évolution dans leur conception. Un exemple caractéristique de ce type d'évolution peut être observé à travers trois rénovations de Gerber réalisées successivement et toutes situées sur le même site dans la commune de Treilles (42° nord), donc dans un même climat local et microclimat. Ces trois rénovations comportent toutes une serre, mais la forme et les dimensions ont considérablement évoluées d'une réalisation à l'autre par critique des réalisations antérieures¹.

La première rénovation concerne la maison des *Perdrigals* achevée en 1979. Elle disposait à l'origine d'une large serre, presque identique à une serre déjà réalisée par Gerber pour la maison de *L'Estradelle*, située devant la façade sud et protégée du vent d'ouest et d'est par des joues qui prennent la forme de murs en maçonnerie (*figure 118*). Cette protection n'était pas excessive puisque le vent a considérablement endommagé la serre la première année après la fin des travaux à cause d'une faiblesse dans sa construction². Une fois reconstruite à l'identique, il est apparu à l'usage que cette serre était thermiquement inconfortable, malgré les stores qui permettaient de l'occulter et la possibilité de la ventiler abondamment³. Cet inconfort thermique était vraisemblablement dû au dimensionnement de la serre : environ 80 % de sa surface vitrée est oblique (convexe) et seulement 20 % est verticale. En hiver, au moment où le soleil est plus bas, l'angle d'incidence du rayonnement solaire par rapport à la surface convexe de la serre est important et il est en grande partie réfléchi ; en été, où le soleil est plus haut dans le ciel, ce rayonnement est quasiment normal à cette surface convexe et presque intégralement

1 Entretien avec Samuel Descombe, le 17/10/2019 à Treilles.

2 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 39.

3 Entretien avec Samuel Descombe, le 17/10/2019 à Treilles.

transmis à l'intérieur de la serre, ce qui contribue à réchauffer l'intérieur. De par sa très faible surface verticale, cette serre est donc mieux dimensionnée pour le captage d'été que pour le captage d'hiver¹, ce qui est en contradiction avec les besoins effectifs de chauffage.



Figure 118 : Serre de la maison des Perdrigals conçue par M. Gerber particulièrement inconfortable en été.
(M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », n° 325, juin-juillet 1979, p. 66)

Conscients des problèmes résultant du mauvais dimensionnement de cette serre, Gerber et son associé Pous ont apporté d'importantes modifications lors de la construction d'une serre pour la rénovation de leur atelier situé à proximité (*figure 119*). Achievé en 1984, cet atelier dispose d'une serre sur deux étages, protégée à l'est et à l'ouest par deux murs et munie de deux extracteurs statiques commandés par des clapets manuels afin de la ventiler abondamment² (*figures 87 et 88*, p. 320). La grande hauteur de la serre et ces extracteurs permettaient d'améliorer la ventilation par effet de cheminée pendant les périodes de surchauffe, tandis que pendant les périodes de chauffage un système actif, asservi à un thermostat différentiel et

¹ *Ibid.*

² M. Gerber, P. Pous, « Un atelier face au sud », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », n° 354, p. 76.

alimenté par des cellules photovoltaïques, actionnait un ventilateur afin d'aspirer l'air chaud en partie supérieure de la serre, pour le souffler dans les pièces situées au nord¹. Les dimensions de la serre sont notablement différentes de celle que nous avons déjà évoquée : sa hauteur dépasse largement son emprise au sol et la majorité de ses vitrages (environ 60 %) sont verticaux, tandis que le reste des vitrages est quasiment incliné à 45°. Gerber et Pous affirment que ces évolutions ont été introduites grâce à leur expérience et sont « le résultat de toutes les conceptions de serres réalisées [par leur atelier] sous divers climats depuis 1978². »

Cette serre a bénéficié d'une instrumentation réalisée en 1984 par Jean Soum, Bernard Cabannes et Alain Châtelet du Laboratoire d'Architecture Bioclimatique de l'école d'architecture de Toulouse³. Ils ont mesuré la température à l'intérieur du bâtiment et de la serre ainsi qu'à l'extérieur, à différentes périodes en été. Selon leurs mesures, la variation des températures à l'intérieur de la serre suit très précisément la température extérieure, grâce à « l'efficacité de la ventilation naturelle⁴ », et la température à l'intérieur du bâtiment apparaît « très stable⁵ », ce qui confirme que la serre n'entraîne « aucune surchauffe inconfortable⁶ ». En revanche, les différents points de mesure ont mis en évidence une stratification thermique importante et la différence de température entre le bas et le haut de la serre pouvait atteindre 9 °C, sans que cette différence excède 2 °C à l'intérieur du bâtiment⁷. Malgré l'ingénieuse conception de cette serre, il est apparu à l'usage que son dimensionnement n'était pas optimal et a encore été revu par la suite⁸. Lors de la rénovation d'un bâtiment qui jouxte l'atelier en 1989, une serre accolée à la construction originale a été construite⁹ (*figure 120*). Dans ses dimensions, cet élément diffère des deux serres évoquées précédemment et marque une nette évolution de la serre vers l'espace-tampon : l'intégralité de sa surface vitrée est verticale afin de favoriser exclusivement les apports solaires hivernaux et cet espace-tampon n'est pas conçu comme un espace éventuellement habitable, mais comme un sas entre l'intérieur et l'extérieur. On constate cependant la persistance du risque de surchauffe rencontré dans les serres qui a

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 J. Soum, B. Cabannes, A. Châtelet, *Étude du comportement thermique d'été d'un bâtiment avec serre accolée*, Toulouse : Laboratoire d'Architecture Bioclimatique, novembre 1985, 9 p. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

4 *Ibid.*, p. 6.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 Entretien avec Samuel Descombe, le 17/10/2019 à Treilles.

9 *Ibid.*

manifestement préoccupé les architectes. Afin de limiter l'élévation de température de l'air intérieur, chaque vitrage est surmonté d'un clapet manipulable afin de ventiler cet espace sur deux niveaux. Au total, ces dix-huit éléments persiennés permettent de ventiler continuellement afin de maintenir la température intérieure au plus près de la température de l'air extérieur malgré l'abondance des vitrages.



Figure 119 : *Serre de l'atelier conçu par M. Gerber et P. Pous sujette à des surchauffes malgré les possibilités de ventilation.*

(M. Gerber, P. Pous, « Un atelier face au sud », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », n° 354, juin-juillet 1984, p. 77)



Figure 120 : *Espace-tampon qui peut être intégralement ventilé sur deux niveaux conçu par M. Gerber et P. Pous pour une rénovation.*
(photo Clément Gaillard, le 17 octobre 2019)

En dix années et pour un même climat local, l'évolution de la première serre des *Perdrigals* vers cet espace-tampon traduit une prise de conscience progressive de l'inadaptation de la forme de la serre au climat très ensoleillé et venté des Corbières, qui bénéficie de 2 700 heures d'ensoleillement annuel¹. Il est apparu à l'usage que les serres n'étaient pas adaptées à ce type de climat, particulièrement si une importante part de leur surface vitrée est oblique et non protégée. Dans la région moins ensoleillée de Toulouse, certaines maisons bioclimatiques dotées de serres obliques mal occultées et insuffisamment ventilées ont été modifiées par leurs habitants. Par exemple, dans une maison conçue par Cordier et construite en 1984, l'habitante a choisi de peindre la partie supérieure des vitrages avec une peinture blanche (blanc d'Espagne) afin de limiter la pénétration du rayonnement estival² (*figure 121*). L'inconfort thermique estival ressenti dans les serres n'a pas empêché certains acteurs de défendre malgré tout l'intérêt de cette technique solaire passive dans les climats méditerranéens ou très ensoleillés, à condition de respecter des règles de conception importantes³. La principale règle consiste à protéger les surfaces est et ouest de la serre par des murs massifs munis d'ouvertures pour la ventilation transversale, afin de limiter son exposition à ces orientations, tout en l'enchâssant dans le volume construit pour multiplier les surfaces d'échange entre les matériaux massifs et l'air réchauffé de la serre⁴. Pour prévenir les risques de surchauffe, la serre doit également pouvoir être ventilée jour et nuit par convection naturelle.

Dans le but d'anticiper ces problèmes et d'affiner le dimensionnement des serres, les architectes Isabelle Hurpy et Frédéric Nicolas avaient proposé en 1981 de définir le rapport entre les surfaces obliques et verticales des serres, ainsi que l'importance de sa protection solaire, en fonction des différents climats régionaux français⁵. Ils sont partis du principe qu'un vitrage vertical est adapté au captage d'hiver et qu'un vitrage oblique permet de capter le rayonnement solaire direct en mi-saison, ainsi que le rayonnement diffus s'il est suffisamment incliné⁶. Ils ont dressé une typologie de quatre morphologies de serres en faisant varier ces différents paramètres et les ont réparties sur une carte de la France en fonction de la latitude, de l'ensoleillement annuel et de l'amplitude des températures des différents climats régionaux⁷

1 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 36.

2 Entretien avec Françoise Montmeyrant, le 23/05/2019 à Toulouse.

3 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

4 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 56 ; Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

5 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 52.

6 *Ibid.*, p. 51.

7 *Ibid.*, p. 52.

(figure 122). Les aires grisées correspondent à des zones de transition qui réclament une hybridation entre plusieurs morphologies. Dans les climats océaniques plus ou moins ensoleillés (zones 1 et 2), la serre est dimensionnée pour capter le rayonnement diffus. Dans les climats froids et montagneux (zone 3), elle est conçue pour capter le rayonnement direct grâce à une surface oblique et dans les climats méditerranéens (zone 4), caractérisés par un risque de surchauffe important, elle est complètement verticale et occultée par une protection horizontale¹. Dans le même climat local de Treilles, qui se rapproche du climat méditerranéen par l'ensoleillement bien qu'il soit plus venté, Gerber a expérimenté successivement les serres de la zone 1 puis de la zone 2, avant d'aboutir à la serre de zone 4, qui ne comporte que des vitrages verticaux.



Figure 121 : Serre d'une maison conçue par J.-P. Cordier peinte au blanc d'Espagne par l'habitante afin de limiter la pénétration du rayonnement solaire estival et limiter les surchauffes.
(photo Clément Gaillard, le 23 mai 2019)

1 Ibid.

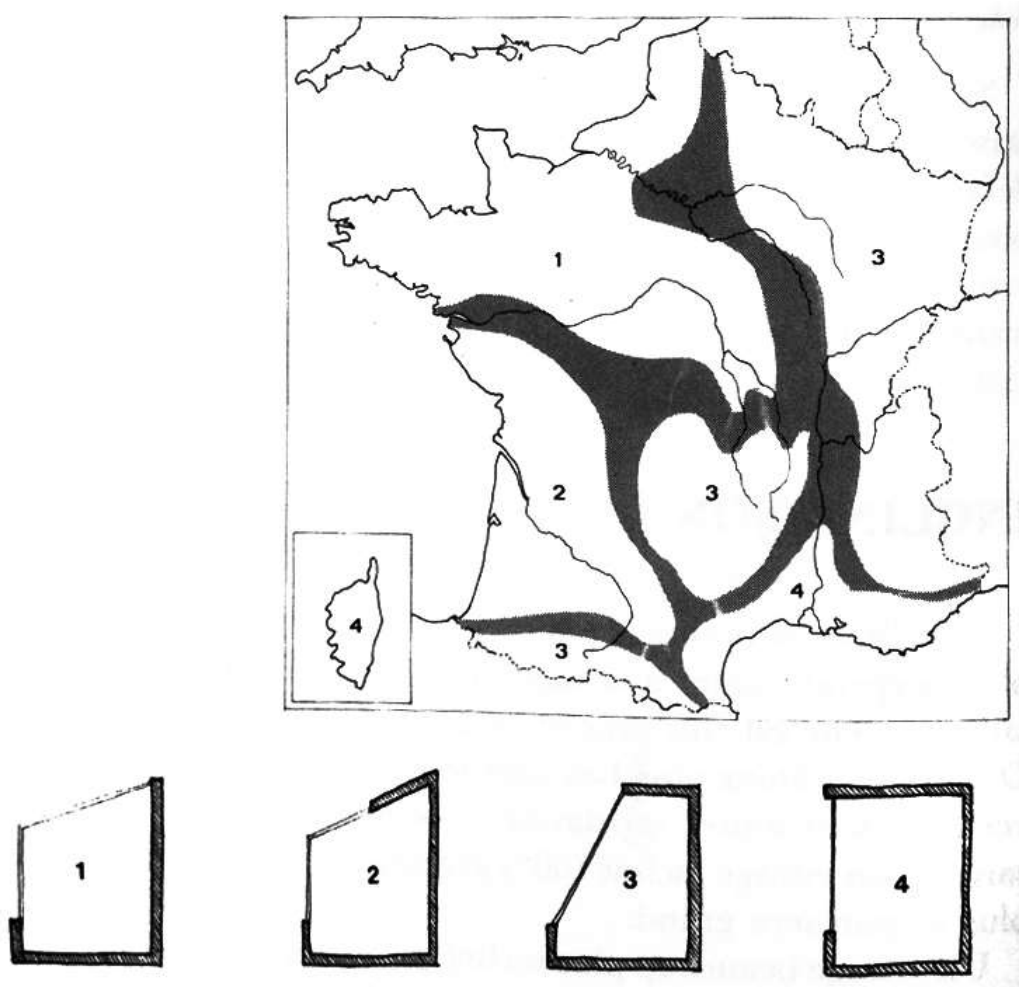


Figure 122 : Carte de la morphologie optimale des serres en fonction des climats régionaux en France.
(I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, Paris/Aix-en-Provence : Pyc/Édisud, 1981, p. 52)

III.3.2.3. Le problème de l'habitabilité des serres

Ces problèmes de conception des serres ont pu être entretenus par la profonde ambiguïté en ce qui concerne leur fonction climatique et leur bonne utilisation. Le bon fonctionnement d'une serre, comme de toute technique solaire passive, nécessite la participation de l'habitant¹, ce qui constitue un problème en soi sur lequel nous reviendrons dans le chapitre suivant. Les architectes associés à la conception bioclimatique envisageaient généralement les serres d'abord comme des systèmes de captage, et secondairement comme des espaces qui pouvaient être habitables ou cultivables durant certaines périodes². Selon ces architectes, la serre est un

¹ *Ibid.*, p. 11.

² J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 75.

« espace capteur¹ » qui peut devenir « un espace habitable quand les conditions de confort le permettent² ». Ces exigences ne seraient pas antagonistes si le stockage thermique de la chaleur accumulée dans la serre pouvait être réalisé dans un intervalle de température qui n'excède pas celles de la zone de confort. Mais pour assurer le stockage de l'énergie thermique accumulée par la serre, le gradient thermique entre l'air intérieur et les matériaux massifs qui permettent ce stockage doit être le plus important possible, afin d'augmenter la diffusion de la chaleur dans l'épaisseur de ces matériaux³. De par ces caractéristiques thermiques, à partir du moment où la serre se comporte comme un capteur sa « température de fonctionnement (25-30 °C) rend son habitabilité impossible simultanément⁴ » comme le note justement Hurpy et Nicolas.

L'importance accordée par les architectes à la fonction de captage explique que des serres thermiquement très inconfortables aient été réalisées. C'est par exemple le cas d'une maison bioclimatique équipée d'un stockage de « chliarolithe », un matériau expérimental à changement de phase, construite à proximité de Nice qui bénéficie de plus de 2 700 heures d'ensoleillement annuel⁵. La serre de cette maison positionnée à l'intérieur d'un patio est orientée au sud-est et au sud-ouest⁶, qui ne constituent pas des orientations optimales du point de vue du captage hivernal (*figure 123*). Environ 50 % de sa surface vitrée est oblique ce qui, compte tenu de ce que nous avons vu, en fait une serre particulièrement favorable au captage estival et aux surchauffes régulières. Mais bien qu'accessible aux habitants, cette serre n'est pas habitable puisqu'elle a été conçue pour accumuler le maximum d'énergie thermique dans le stockage à changement de phase situé derrière la serre. Comme l'explique Ménard, son « organisation est celle d'un capteur, c'est-à-dire que le volume vitré (serre extérieure) n'est pas destiné à être habité ni cultivé mais participe seulement au fonctionnement du système⁷. » Ces observations sont vraisemblablement confirmées par les mesures, qui ont révélé que les surchauffes dans l'ensemble de la maison étaient régulières dès le mois de mars⁸.

1 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 10.

2 *Ibid.*

3 J.-P. Cordier, « Présentation de plusieurs projets de maisons solaires bioclimatiques », p. 72 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

4 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 62.

5 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 114-117.

6 *Ibid.*, p. 117.

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*, p. 118.



Figure 123 : *Serre d'une maison à Nice orientée au sud-est et au sud-ouest et thermiquement très inconfortable en été.*
(J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, p. 119)

La conception de serres aussi thermiquement inconfortables était souvent motivée par le souhait de réaliser un stockage inter-saisonnier, qui constitue un projet théorique porté par de nombreux acteurs, mais rarement réalisé en pratique durant la période qui nous intéresse. Théoriquement, la serre était alors conçue pour capter le maximum d'énergie solaire durant l'été et l'automne. Celle-ci devait être continuellement stockée sous forme thermique dans un volume liquide (eau) ou minéral (galets, roche, terre...) durant cette période de captage, afin d'assurer une part plus importante des besoins de chauffage en hiver et éventuellement au printemps. Les serres conçues pour le chauffage inter-saisonnier ne bénéficiaient pas de protections solaires afin de maximiser les apports, et la température à l'intérieur de la serre pouvait rester très supérieure à la zone de confort pendant plusieurs jours durant les périodes de captage.

Bien qu'assez peu répandues, on trouve des serres conçues suivant ces principes dans certaines constructions, comme celles de Cordier. C'est le cas d'une maison conçue pour la famille Monchoux située dans la banlieue de Toulouse et achevée en 1982¹ (*figure 124*). Construite avec des matériaux massifs, cette maison est dotée d'une imposante serre de 13 m² sur deux étages, intégrée à l'angle sud de la maison, inclinée à 45° et orientée au sud-est et au sud-ouest afin de maximiser le captage². L'originalité de cette maison réside dans son système actif de stockage inter-saisonnier associant terre et galets : l'air chauffé par la serre est aspiré en partie supérieure et soufflé sous la maison, à 2 mètres de profondeur, dans un réseau de quatre gaines situées à l'intérieur de tranchées remplies de galets³ (*figure 125*). Le chauffage devait s'effectuer soit par conduction à travers le plancher avec un important déphasage de plusieurs mois, soit directement par air pulsé. Cordier avait envisagé qu'un stockage de cette profondeur pouvait assurer trois mois de chauffage, mais une minutieuse instrumentation a révélé que cette durée était bien moindre, de l'ordre de deux semaines⁴. Le système de stockage a été considéré comme un échec par l'architecte et a été abandonné⁵ : l'air avait tendance à systématiquement suivre le chemin de moindre perte de charge et à ne pas se diffuser uniformément à l'intérieur des galets et de la terre⁶.

Malgré la défaillance de ce système, la conception de cette maison a permis d'importantes économies de chauffage, de l'ordre de 50 %. Mais elle exemplifie les problèmes d'inconfort thermique des serres conçues exclusivement suivant leur fonction climatique. L'instrumentation a révélé que la température de l'air intérieur de la serre a atteint 53 °C durant le mois de février 1983⁷. Elle a également montré que cette température intérieure variait considérablement, particulièrement en hiver⁸. Si des températures très élevées pouvaient être atteintes en l'absence des habitants, ils ont néanmoins ressenti un inconfort thermique important, particulièrement en été⁹. La température à l'intérieur des chambres, placées derrière la serre et séparées par une fenêtre double vitrage, variait entre 20 et 30 °C en période estivale¹⁰. À cause

1 *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », *op. cit.*, p. 78-80.

2 *Project Monitor*, n°7, juin 1987, p. 3. (Archives personnelles de Françoise Monchoux – Toulouse)

3 *Ibid.*, p. 3-4.

4 *Ibid.*, p. 6.

5 Entretien avec Jean-Pierre Cordier, le 22/05/2019 à Toulouse.

6 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

7 *Project Monitor*, n°7, *op. cit.*, p. 3. (Archives personnelles de Françoise Monchoux – Toulouse)

8 *Ibid.*, p. 6.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

de l'inconfort qu'elle génère, la serre est aujourd'hui régulièrement occultée par un rideau intérieur, afin de limiter l'échauffement intérieur¹.



Figure 124 : Maison de la famille Monchoux conçue par J.-P. Cordier.
(*Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », n° 354, juin-juillet 1984, p. 80)

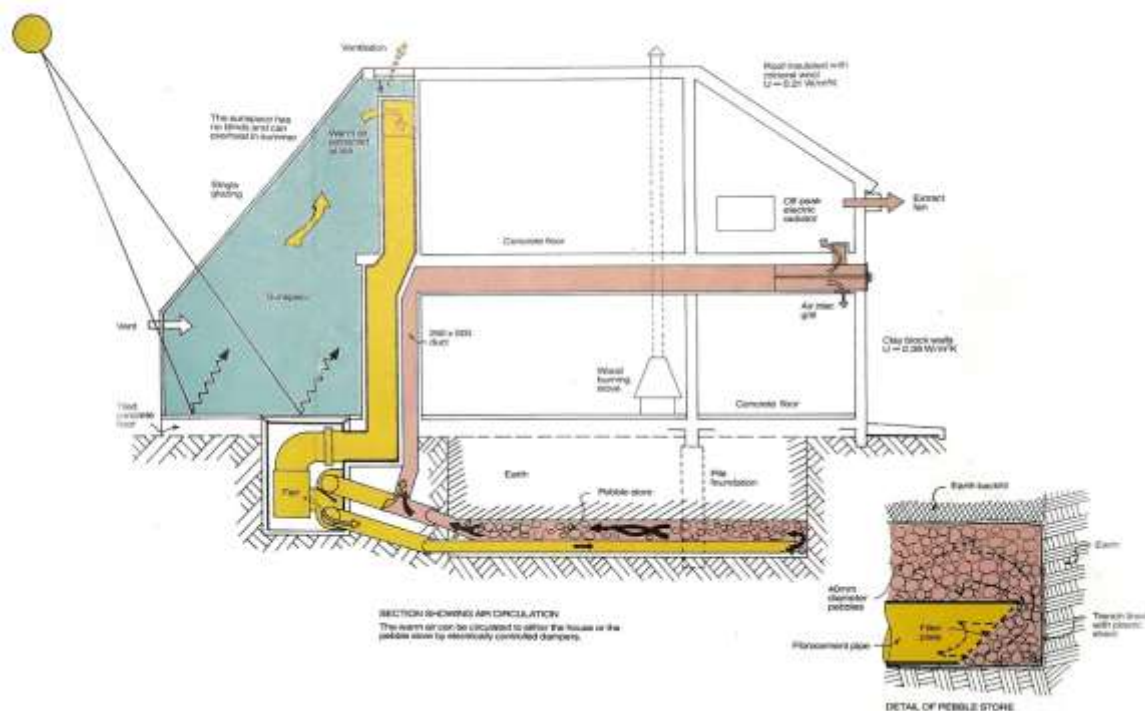


Figure 125 : Coupe et détail du système de stockage thermique de la maison de la famille Monchoux.
(*Project Monitor*, n°7, juin 1987, p. 4-5)

1 Entretien avec Jean-Pierre Cordier, le 22/05/2019 à Toulouse.

En plus de conduire à des constructions parfois inconfortables, cette approche exclusivement thermique des serres n'est pas évidente pour le non-spécialiste et peut entrer en contradiction avec les exigences des habitants d'une maison bioclimatique. Le fait que les serres aient été conçues comme des capteurs éventuellement habitables, et non comme des espaces habitables pouvant temporairement remplir les fonctions de captage de l'énergie solaire, traduit la prédominance de la fonction climatique de la serre sur ses fonctions d'usage dans l'esprit des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Mais si cette fonction climatique de la serre est connue de l'architecte ou de l'ingénieur, elle est moins facilement compréhensible par les habitants qui envisagent généralement cet espace comme une extension de la surface intérieure, et non comme un espace de captage et d'accumulation de l'énergie thermique. L'intérêt thermique d'une serre peut alors être considérablement amoindri par sa mauvaise utilisation¹. Comme le notent justement Hurpy et Nicolas, « habiter une serre s'accompagne d'un certain nombre de gestes qui ne sont pas exactement équivalents à appuyer sur un bouton² ». Par exemple, une porte laissée ouverte entre la serre et l'espace habitable pendant une nuit froide peut abaisser la température de l'air intérieur bien en dessous de celle d'une maison conventionnelle, particulièrement si la serre est en simple vitrage³. L'utilisation de ces serres pour la culture pouvait amener d'autres comportements imprévus et thermiquement aberrants : les habitants souhaitant mettre leur serre hors gel si elle était cultivée pouvaient parfois y installer un chauffage d'appoint électrique, en contradiction avec l'idée que la serre permettait justement d'économiser les énergies de ce type⁴. Ces habitudes contredisent l'idée simpliste parfois présentée selon laquelle « l'habitant, en utilisant sa serre en harmonie avec ses modes de vie pourra réduire sa consommation de chauffage⁵. »

Ce problème d'utilisation des serres et du comportement des habitants concerne toutes les techniques solaires passives. Il est particulièrement manifeste dans les serres, dont l'aménagement intérieur est laissé à l'habitant et peut entrer en contradiction avec celui souhaité par l'architecte ou l'ingénieur. La bonne utilisation d'une serre du point de vue thermique demande une certaine expérience : certains architectes enthousiastes à l'idée d'habiter une

1 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

2 I. Hurpy, F. Nicolas, *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, op. cit., p. 67.

3 Entretien avec Françoise Montmeyrant, le 23/05/2019 à Toulouse.

4 A.-F. Vergniaud *et. al.*, « Les Serres en façade », p. 160-161 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

5 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, « La Serre », op. cit., n. p.

maison solaire passive équipée d'une serre, comme Kelbaugh, ont pris conscience de l'inconfort thermique qu'elle pouvait entraîner si elle était mal utilisée¹. Il a pu observer dans sa maison que la température à l'intérieur de la serre chutait de 24 °C à 10 °C durant la nuit en été, ce qui l'a déterminé à augmenter son inertie thermique en y plaçant des bidons remplis d'eau². Nous avons déjà signalé que les manuels relatifs à la conception bioclimatique et solaire passive recommandaient que les surfaces des matériaux massifs en contact avec l'air d'un système de captage direct ne soient pas recouvertes de matériaux isolants, comme des tapis ou des moquettes, afin de ne pas perturber les échanges thermiques³. Cette recommandation était généralement respectée dans les serres des maisons bioclimatiques habitées par des architectes, comme celle de Gerber. Dans la galerie vitrée de la maison *L'Estradelle*, le sol a été carrelé avec des tomettes en terre cuite laissées volontairement découvertes afin de maximiser l'accumulation de la chaleur dans le sol⁴. Si la température du sol exposé au rayonnement solaire direct à l'intérieur d'une construction reste généralement acceptable, celle-ci peut temporairement être assez élevée. Dans une autre construction, Cordier a ainsi mesuré des températures voisines de 45 °C à la surface du sol d'un plancher de couleur verte exposé au rayonnement direct⁵.

Mais le problème d'inconfort d'un sol composé de matériaux massifs laissés découverts apparaît plus nettement durant les périodes froides, où l'effusivité de ces matériaux donne l'impression qu'ils sont considérablement « plus froids⁶ » que la peau et l'air ambiant. Si ce phénomène est toléré par les habitants conscients de la fonction thermique de ces matériaux laissés nus et peut être amoindri par l'habillement, il est moins bien accepté par d'autres habitants plus sensibles à l'inconfort thermique ressenti durant ces périodes froides. Ceci explique pourquoi les sols de certaines serres ont parfois été recouverts de tapis ou de moquettes, composés de matériaux moins effusifs qui limitent la sensation de froideur du sol. On trouve par exemple des modifications de ce type dans une maison conçue par Cordier : le sol de la

1 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *Architectural Design*, op. cit., p. 655-656.

2 *Ibid.*, p. 656.

3 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 109

4 M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 65 ; J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 32.

5 J.-P. Cordier, « Présentation de plusieurs projets de maisons solaires bioclimatiques », p. 72 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

6 Nous mettrons dorénavant entre guillemets les termes de « chaud » et « froid » lorsqu'ils se réfèrent à des sensations subjectives.

serre construit en pavés autobloquants en béton a été recouvert de tapis par l'habitante, ce qui a pour conséquence de limiter la capacité de stockage thermique du sol (*figure 126*).



Figure 126 : Intérieur de la serre d'une maison conçue par J.-P. Cordier dont le sol a été recouvert de tapis par l'habitante.
(photo Clément Gaillard, le 23 mai 2019)

Ces contradictions dans l'aménagement intérieur des serres et leur utilisation met en évidence l'importance primordiale de la compréhension du comportement thermique des maisons bioclimatiques et solaires passives par leurs habitants. La majorité des constructions que nous avons présentées jusqu'à présent étaient habitées par des architectes, ingénieurs, chercheurs ou adeptes de la conception bioclimatique, qui souhaitaient habiter ce type de construction et étaient conscients des compromis qu'ils devaient effectuer en ce qui concerne les exigences de confort thermique. Nous avons volontairement écarté leur témoignage en ce qui concerne le confort thermique de leurs maisons, qui pouvait être biaisé par leur meilleure

tolérance à l'inconfort thermique, motivée par la satisfaction psychologique d'avoir pu réaliser d'importantes économies de chauffage ou de conditionnement d'air artificiel. S'ils n'étaient pas déjà ingénieurs ou thermiciens, ces habitants avaient développé une sensibilité aux phénomènes thermiques, sans avoir nécessairement bénéficié d'une formation dans ce domaine, et ils étaient souvent soucieux d'ajuster leur manière d'habiter suivant ces phénomènes. Cependant, au fur et à mesure que la conception bioclimatique s'est diffusée à la fin des années 1970, de nombreuses maisons bioclimatiques et solaires passives ont été réalisées dans le cadre de programmes de logements. Ces réalisations étaient souvent habitées par des habitants indifférents à ces problématiques et parfois soucieux de bénéficier de la même qualité de confort que dans une maison conventionnelle. Ce contraste entre les manières d'habiter de ces deux catégories d'habitants met en lumière le problème de la compréhension d'une maison bioclimatique.

III.3.3. Habiter et comprendre une maison bioclimatique

III.3.3.1. Le problème du confort

Bien que nous ayons abordé les motifs d'adhésion à la conception bioclimatique, nous avons jusqu'à présent privilégié une étude technique des réalisations bioclimatiques et solaires passives. Les éléments précédents ont mis en évidence l'importance de la compréhension des phénomènes thermiques à l'œuvre dans ces constructions par leurs habitants, qui participent directement au bon fonctionnement des techniques solaires passives par leurs manipulations, et plus généralement par leur manière d'habiter. Il importe de prendre en considération le rôle des habitants, en gardant à l'esprit que les maisons bioclimatiques que nous avons présentées « sont des maisons et non pas seulement des systèmes de chauffage¹ ».

Un point délicat d'une telle analyse concerne la notion éminemment subjective de confort, qui regroupe celles de confort thermique et de besoins de confort. Pour de nombreux acteurs de la conception bioclimatique et solaire passive ces besoins constituent des « acquis transmis par habitude à l'intérieur d'un groupe² » et résultent d'un certain conditionnement socioculturel³. La prise en compte du confort se complexifie encore si l'on admet que le confort

1 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 8.

2 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 12.

3 R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 8-9.

thermique résulte d'une multitude de facteurs¹ (psychologiques, affectifs...) comme le notait déjà Missenard², et ne constitue qu'une petite partie de ce que certains acteurs de la conception bioclimatique nomment le « confort discret³ » ou le « confort global⁴ », qui fait intervenir d'autres sensations (auditives, olfactives...). À ce titre, le critère de satisfaction du confort thermique pour l'évaluation du bon fonctionnement d'une technique solaire passive ou plus généralement de la performance d'une maison bioclimatique est problématique. Il ne doit cependant pas être négligé ni rejeté, étant donné qu'il est un indicateur important du contentement des habitants.

Parmi les motivations secondaires des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique, on trouve une remise en question des normes de confort induites par le développement des systèmes de chauffage ou de rafraîchissement pilotables⁵ (convecteurs électriques, chaudière au gaz ou au fioul...). Contre ce confort dit « presse-bouton », qui se limite « au simple réglage d'un thermostat⁶ », ils souhaitaient promouvoir un autre confort qui ne consiste pas à limiter la température de consigne mais à conscientiser l'habitant en donnant « à chacun les moyens d'intervention sur son propre confort⁷. » Cette idée présupposait que « [la] responsabilisation de l'occupant est le préalable à toute volonté d'économies d'énergie⁸. » L'intérêt d'une maison bioclimatique repose sur le fait que les habitants privilégient d'abord les techniques solaires passives pour assurer leurs besoins de confort et qu'ils utilisent exceptionnellement les systèmes de chauffage ou de climatisation conventionnels comme des appoints temporaires et en dernier recours. Motivés par le souci de limiter leur consommation d'énergie, les architectes et les ingénieurs ont pu développer une certaine tolérance à l'inconfort thermique dans leurs habitations. Ménard, qui est allé à la rencontre de nombre de ces acteurs à la fin des années 1970 pour s'entretenir avec eux, affirme en 1980 qu'il « serait cependant ridicule de présenter les habitants des maisons passives comme des masochistes guettant en grelottant la moindre éclaircie⁹. » Si les habitants de ces maisons pouvaient tolérer un certain

1 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 11-12.

2 A. Missenard, *La Chaleur animale*, [1ère éd. 1946], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1969, p. 60.

3 J. Dreyfus, *La Société du confort, quel enjeu, quelles illusions ?*, op. cit., p. 39-48.

4 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc ; G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 11.

5 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 16.

6 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.), *Construire avec le climat*, « Vivre avec le climat », op. cit., n. p.

7 *Ibid.*, « Habiter », n. p.

8 *Ibid.*

9 J.-P. Ménard, *Maisons solaires. Premiers bilans*, op. cit., p. 17.

inconfort thermique, ils étaient bien conscients que même « la maison la mieux conçue ne saurait se contenter de fenêtres au sud pour se chauffer¹ ».

Cette remise en question des normes de confort est indissociable d'une critique des indicateurs conventionnels du confort thermique, et notamment de la température de l'air qui constitue une mesure très insuffisante de la température résultante ressentie effectivement par un individu². Cette critique tend à valoriser les techniques solaires passives, qui exploitent essentiellement le rayonnement de grande longueur d'onde des surfaces pour la transmission de la chaleur qui donne la sensation que les parois sont « chaudes ». Ceci explique qu'à l'intérieur des constructions bioclimatiques « la température de l'air est plus basse que dans des logements traditionnels³ », mais que « la température des parois est plus élevée et les parois plus massives⁴ », comme le rappellent Bardou et Arzoumanian. Le problème principal qui se pose aux concepteurs est de sensibiliser les habitants à ces phénomènes et au fait que les sensations thermiques qu'ils éprouvent constituent des indications peu fiables de la température de l'air ou d'une surface⁵. Cette connaissance des phénomènes thermiques est cruciale. Elle est partagée par l'intégralité des habitants ayant choisi d'habiter une maison bioclimatique, dont ils connaissent et anticipent le comportement thermique afin d'ajuster leurs habitudes en conséquence. Elle est cependant plus rare chez les habitants n'ayant pas explicitement fait ce choix, comme nous le verrons dans un second temps.

III.3.3.2. Choisir d'habiter une construction bioclimatique et l'habiter en conséquence

Les témoignages des habitants ayant choisi d'habiter une maison bioclimatique ou solaire passive sont nombreux, d'autant plus qu'ils étaient souvent architectes ou ingénieurs eux-mêmes et invités à communiquer sur leurs expériences. Sans être nécessairement concepteurs, certains de ces habitants pouvaient être directement liés aux acteurs de la conception bioclimatique. C'est le cas de Sara Balcomb, épouse de l'ingénieur Douglas Balcomb, qui était elle-même habitante d'une maison passive et qui a réalisé de nombreuses enquêtes sur les habitants et les occupants des constructions solaires passives. En ce qui

1 *Ibid.*

2 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *op. cit.*, p. 635-636 ; E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 54.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 29.

4 *Ibid.*

5 A. Missenard, *La Chaleur animale*, *op. cit.*, p. 49.

concerne les habitants ayant fait le choix d'habiter une maison solaire passive, elle résume leurs motivations en ces termes :

« Le simple fait de vivre dans une maison solaire est entouré d'une quantité incroyable de mythes, de romantisme et de désinformation. Les personnes qui choisissent de vivre dans des maisons solaires semblent le faire pour l'une des deux raisons fondamentales. La première, et de loin la plus courante du moins jusqu'à récemment, implique un engagement de base en faveur du changement de mode de vie et de l'implication écologique. Deuxièmement, nous commençons maintenant à voir, en plus, un virage vers le solaire en raison des hivers rigoureux, accompagnés des pénuries de carburant et de la flambée des factures de chauffage¹. »

Nous retrouvons chez les habitants de ces maisons les mêmes motivations qui ont encouragé l'adhésion des concepteurs à la conception bioclimatique. Elles expliquent leur souci constant d'ajuster leur mode de vie en fonction de facteurs environnementaux ou climatiques. David Wright, qui fait partie des architectes ayant réalisé le plus grand nombre de maisons solaires passives aux États-Unis et qui a lui-même habité plusieurs de ses constructions, affirme que les habitants de ces maisons « sont comme les marins, ils regardent soigneusement le temps². » Il fait référence à la nécessité d'anticiper les périodes nuageuses prolongées, qui tendent à abaisser la température des éléments massifs d'un système à gain direct après un ou deux jours et obligent à prévoir l'utilisation d'un chauffage d'appoint³. Cette attention à la météo était renforcée par la connaissance des types de temps que les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique avaient développée.

Cette connaissance de la météorologie à court terme est indissociable d'une connaissance du comportement thermique global d'une maison bioclimatique observé après plusieurs années à l'habiter. Bien que parfois appuyée sur de très solides connaissances

1 S. Balcomb, « The Solar Consumer – Living in a Glass House », p. 779 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) Traduction personnelle, citation originale : « The simple fact of living in a solar home is surrounded with an incredible amount of myth, romanticism, and misinformation. People who choose to live in solar homes seem to do so for one of two basic reasons. The first, and at least until recently by far the more common, involves a basic commitment to lifestyle change and ecological involvement. Secondly, we are now beginning to see, in addition, a turn to solar as a result of severe winters and their attendant fuel shortages and soaring heating bills. »

2 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 84 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 *Ibid.*

théoriques des phénomènes thermiques dans le cas où les habitants étaient ingénieurs, la connaissance du comportement thermique d'une maison bioclimatique relève plus vraisemblablement d'une forme « d'empirisme attentif¹ », selon l'expression de Georges et Jeanne-Marie Alexandroff. Il se traduit par la capacité à interpréter les phénomènes thermiques ou climatiques observés dans ces maisons en termes d'informations. Cet « empirisme attentif » s'exprime par exemple dans la connaissance des surchauffes éventuellement causées par certaines techniques solaires passives et des manipulations à effectuer en conséquence (ouverture d'un élément, occultation temporaire...), qui ne consistent pas seulement à atténuer les effets de la surchauffe, mais souvent à l'exploiter pour en tirer parti comme dans la ventilation par effet de cheminée très usitée. L'attention à ce type de phénomènes explique qu'habiter une maison bioclimatique ait été présenté par les architectes associés à la conception bioclimatique comme une manière de retrouver « un sens météorologique perdu par les citadins² », qui engage la participation intellectuelle de l'habitant, mais aussi la « redécouverte d'un confort plus tonique³. » Comme le note Izard, cette participation de l'habitant se traduit donc très concrètement par « son action sur les éléments mobiles du bâtiment (portes, fenêtres, fermetures etc.)⁴ », mais aussi « par ses activités génératrices de chaleur (métabolisme, cuisine, salle de bains etc.)⁵ » qui constituent une source d'apports thermiques non négligeable. Conscients de leur rôle dans la régulation des phénomènes thermiques, certains habitants revendiquent que « plus une maison est passive, plus ses habitants doivent être actifs⁶ », selon une formule souvent reprise.

Un avantage des techniques solaires passives que nous avons déjà mentionné est que leur fonctionnement peut être commandé directement en manipulant leurs éléments (volet, trappe, isolant replié...) plutôt que par l'intermédiaire de commandes numériques ou analogiques, qui sont associées aux techniques solaires actives. La possibilité de manipuler directement ces éléments et de voir les phénomènes sur lesquels ils agissent caractérise le « coté

1 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 203.

2 J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit., p. 48.

3 *Ibid.*

4 J.-L. Izard, « Paramètres à prendre en considération dans l'étude d'un projet de construction. Échanges thermiques entre les bâtiments et leur environnement : résumé du problème », p. II.12 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

5 *Ibid.*

6 Entretien avec Marie-François Lavigne, le 24/04/2019 à Die.

didactique¹ » des maisons bioclimatiques mentionné par plusieurs architectes et habitants. L'importance de cette dimension didactique explique la préférence des architectes pour certaines techniques solaires passives censées être plus facilement compréhensibles, comme le mur Trombe. Pour Kelbaugh, la facilité de compréhension du mur Trombe constitue un atout majeur de cette technique². Il affirme en 1976 :

« La facilité de compréhension du système est très importante. [...] Le système Trombe est d'une simplicité rafraîchissante et ne dépend pas du fonctionnement de toutes ses pièces. Il est facilement compris par la plupart des gens à qui je l'ai expliqué, ce qui est un aspect éminemment important dans l'acceptation publique de ce système ou de tout autre système de chauffage solaire³. »

L'utilisation des techniques solaires passives rejoint des motivations relatives au souhait de mettre en œuvre des techniques simples, fiables et facilement compréhensibles. La compréhension des phénomènes thermiques à l'œuvre dans les constructions bioclimatiques et solaires passives était facilitée par le fait que ces phénomènes sont lisibles à travers ces techniques.

Cette compréhension thermique influençait directement le mode de vie des habitants ayant fait le choix d'habiter une maison bioclimatique, qui ont pu développer une forme de « nomadisme interne⁴ » journalier, voire saisonnier. Le « nomadisme interne » désigne le déplacement intuitif ou conscient des activités domestiques dans différentes pièces ou espaces d'une habitation en fonction, par exemple, de leur exposition au rayonnement solaire. Il était traditionnellement pratiqué dans l'habitat vernaculaire, notamment dans les régions chaudes et sèches où il permet de privilégier l'occupation des pièces les plus fraîches⁵, mais aussi dans les maisons paysannes des climats tempérés⁶. Les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont été soucieux de réintroduire ce « nomadisme interne » dans les

1 Entretien avec Patrick Bardou, le 09/10/2019 à Marseille.

2 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *Architectural Design*, op. cit., p. 656.

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The easy understandability of the system is very important. [...] The Trombe system is refreshingly simple and does not depend on all of its parts working. It is easily understood by most people that I have explained it to, which is an eminently important aspect in the public acceptance of it or any other solar heating system. »

4 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 39, 56.

5 *Ibid.*, p. 39.

6 Entretien avec Mimi Tjoyas, le 23/10/2019 à Perpignan.

maisons bioclimatiques¹, notamment celles qui intégraient des serres, qui étaient considérées comme des espaces-tampons « temporairement habitables² ». Il ressort des entretiens que nous avons pu mener que le « nomadisme interne » constitue une pratique revendiquée par les habitants de ces maisons, de même que le recours à l'habillement plutôt qu'au chauffage d'appoint. Tous ces éléments contribuent à singulariser les habitants qui avaient fait le choix d'habiter une construction bioclimatique et solaire passive.

III.3.3.3. Habiter et comprendre une construction bioclimatique sans être spécialiste

Jusqu'à présent nous nous sommes concentrés sur les manières d'habiter qui émanaient d'individus ayant choisi de vivre dans une maison bioclimatique ou solaire passive, et qui étaient généralement familiers de cette démarche de conception et du mode de vie nécessaire à adopter dans ces constructions. Mais la diffusion de la conception bioclimatique entre la fin des années 1970 et le début des années 1980 a conduit à étendre l'application de cette démarche généralement utilisée pour des maisons individuelles à la conception de logements locatifs et d'autres bâtiments d'occupation temporaire (école, gymnase...), en France comme aux États-Unis³. Cette extension a conduit à concevoir des logements pour des habitants éventuellement indifférents à la conception bioclimatique et ignorant parfois les caractéristiques de ces réalisations, ce qui constituait une nouveauté. Les témoignages de ces habitants ont été nettement moins bien diffusés et communiqués. Ils proviennent soit de rares études sociologiques, comme celle de Philippe Dard en France⁴, soit de propos recueillis par les architectes ou les ingénieurs auprès de ces habitants⁵. Des enquêtes sociologiques avaient été initiées à partir du milieu des années 1970 en France sur les habitants des maisons solaires actives et passives, afin de sonder leurs « motivations psychologiques, sociologiques et

-
- 1 P. Dard, *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat*, op. cit., p. 22 ; F. Jourda, G. Perraudin, « L'architecture climatique, élément d'une nouvelle culture », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », op. cit., p. 51.
 - 2 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28.
 - 3 S. Balcomb, « The Impact of Consumer/Client Issues on Passive Solar Design », p. 419 in : J. Hayes, W. A. Kolar (éds.), *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference*, op. cit.
 - 4 P. Dard, *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat*, op. cit.
 - 5 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 286-287.

architecturales¹ », mais ont été abandonnées étant donné que les enquêtés ne faisaient part que de leurs motivations financières².

Il n'existe pas à notre connaissance d'enquête sociologique d'ampleur sur les habitants des maisons solaires passives aux États-Unis durant la même période. Sara Balcomb a cependant réalisé différentes enquêtes sur la satisfaction des usagers des bâtiments solaires passifs aux États-Unis, notamment dans deux écoles construites en 1980 et situées dans le même climat local à Santa Fe³. Cette enquête visait précisément à rendre compte de la perception subjective des usagers qui « n'ont aucune notion préconçue de comment les bâtiments passifs devraient être gérés ou s'ils ont besoin de l'être⁴ ». De par leur méconnaissance, elle estime qu'ils sont « plus objectifs dans leurs attitudes à l'égard de l'énergie solaire que les propriétaires de maisons solaires⁵ ». Ses entretiens avec les professeurs et les écoliers concernaient leur ressenti sur le confort thermique et la lumière naturelle à l'intérieur de ces deux écoles⁶. Sara Balcomb estimait que ces facteurs subjectifs de confort influençaient grandement « l'acceptation par le public du solaire passif comme une technologie viable⁷ », bien plus directement que les économies d'énergie que les habitants pouvaient effectivement réaliser⁸.

Son enquête sur ces deux écoles à Santa Fe a révélé que l'abondance de la lumière naturelle était unanimement appréciée dans ces bâtiments, notamment par les élèves qui aimaient le fait de ne plus entendre le bruit de l'éclairage fluorescent⁹. L'insistance sur le confort auditif apporté par l'éclairage naturel plutôt que sur le confort thermique ou visuel constitue un résultat inattendu, mais qui montre l'importance du « confort global » qui ne peut être compris que par l'intermédiaire de ce type d'enquête. Le confort thermique à l'intérieur des salles de classe était vivement critiqué et avait introduit une certaine défiance parfois injustifiée des professeurs à l'égard de la conception solaire passive¹⁰. Bien que ces deux écoles soient situées à quelques kilomètres de distance, la perception du confort thermique y était opposée : les

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 S. Balcomb, « The Impact of Consumer/Client Issues on Passive Solar Design », p. 419-422 in : J. Hayes, W. A. Kolar (éds.), *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference*, op. cit.

4 *Ibid.*, p. 419. Traduction personnelle, citation originale : « have no preconceived notion of how or whether passive buildings should be operated »

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « more objective in their attitudes toward solar energy than solar homeowners are »

6 *Ibid.*, p. 420.

7 *Ibid.*, p. 419. Traduction personnelle, citation originale : « the public acceptance of passive solar as a viable technology »

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*, p. 421.

10 *Ibid.*

occupants se plaignaient du froid dans l'une des écoles et des surchauffes importantes dans l'autre¹. Sara Balcomb en a déduit que ces résultats contradictoires étaient en partie dus à la conception différente de ces deux bâtiments solaires passifs, qui sont situés dans un microclimat analogue². Son étude conclut que ces résultats décevants plaident pour une meilleure attention au confort thermique des bâtiments solaires passifs, qui doit primer sur la recherche d'économie d'énergie qui constitue un critère secondaire pour les occupants de ces bâtiments³.

En France, l'enquête menée par Dard a révélé les mêmes insatisfactions, mais a surtout mis en évidence que la compréhension des maisons bioclimatiques par les habitants restait largement intuitive⁴, malgré l'effort didactique des architectes. Tout d'abord, il apparaît que certaines techniques solaires passives comme le mur Trombe sont souvent mal acceptées du point de vue esthétique, de par ses dimensions et son aspect extérieur⁵. Si l'aspect sombre de ces murs-capteurs est systématiquement rejeté, les reflets dans le vitrage qui les recouvrent sont esthétiquement mieux tolérés⁶. Mis à part ces critères esthétiques, la fonction climatique de ces éléments apparaît mal comprise et même largement ignorée. Peu d'habitants admettent que les techniques de captage direct puissent permettre de réduire les besoins de chauffage et seulement une personne sur cinq estime que les vérandas, utilisées dans les logements collectifs, ont un quelconque intérêt thermique⁷. Le rayonnement à basse température des éléments est également perçu négativement : certains habitants affirment par exemple que « le solaire, ça chauffe froid⁸ », étant intuitivement persuadés qu'une température élevée des éléments radiateurs est la preuve d'un chauffage efficace.

Cette enquête a également révélé des usages multiples des serres, envisagées tantôt comme une annexe ou un local technique de la maison (buanderie, atelier), tantôt comme un espace à ventiler abondamment et à protéger du rayonnement solaire excessif en été, ou encore comme une pièce à chauffer afin de préserver les cultures⁹. Ces multiples usages traduisent une

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 422.

4 P. Dard, *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat*, op. cit., p. 53.

5 *Ibid.*, p. 62.

6 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 290.

7 P. Dard, *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat*, op. cit., p. 91.

8 *Ibid.*, p. 138.

9 *Ibid.*, p. 85-86.

tension entre la « fonction thermique proclamée¹ » de cet élément et l'ensemble des aménagements qui y sont possibles. Ceci confirme les observations d'autres acteurs, où les serres apparaissent répondre à des usages multiples, mais ne sont jamais comprises selon leurs fonctions thermiques par les habitants indifférents à la conception bioclimatique et solaire passive². Les témoignages recueillis auprès des habitants par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique vont dans le même sens que ceux recueillis par Dard. Certains habitants affirment que l'efficacité d'une technique solaire passive est directement fonction de ses dimensions : lors de leurs échanges avec des habitants, Georges et Jeanne-Marie Alexandroff ont pu remarquer que « "l'encombrement" des capteurs est revendiqué comme figurant la puissance de captage et donc directement lié à la qualité de l'abri³ ». Bien qu'erronés, ces raisonnements simplifiés traduisent une volonté de comprendre intuitivement ces techniques.

III.3.3.4. La recherche d'une médiation des phénomènes thermiques auprès des habitants

Bien qu'elle puisse être nuancée, cette distinction entre les habitants souhaitant habiter une construction bioclimatique et ceux n'ayant pas fait ce choix apparaît nettement au niveau de leur niveau de compréhension et de leurs modes de vie. Afin de résoudre ce problème, certains architectes ont travaillé la médiation de ces réalisations en allant à la rencontre des habitants et ont même parfois édité des petits guides d'utilisation. Ces guides énoncent un certain nombre de recommandations relatives à l'ouverture des fenêtres ou des volets en fonction des saisons, afin de réaliser le maximum d'économie de chauffage, et conseillent par exemple de ne pas poser « de moquette sur le sol des pièces à fort ensoleillement⁴ ». Malgré ce souci didactique, les habitants de logements locatifs étaient parfois indifférents aux techniques solaires passives employées dans ces réalisations et certains comportements ont été mal anticipés par les architectes et les ingénieurs.

1 *Ibid.*, p. 86.

2 A.-F. Vergniaud *et. al.*, « Les Serres en façade », p. 162 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat, op. cit.*, p. 291.

4 P. Claux, A. Pessio, M. Raoust, *Votre maison solaire Aubea. Guide d'utilisation*, s.l.n.d., p. 15. (Archives personnelles de Michel Raoust – Paris)

Nous pouvons prendre pour exemple le cas des « Basses Fouassières », un ensemble de 27 logements construits à Angers en 1983, qui constitue l'un des premiers HLM bioclimatiques en France¹ (figure 127). Ils ont été conçus par les architectes Jean-Robert Mazaud et Catherine Parant, assistés des ingénieurs Martine Cabanat et Bernard Sésolis, qui sont les auteurs d'une thèse sur les murs Trombe et Trombe-Michel réalisée à partir de l'instrumentation des maisons d'Odeillo-Font-Romeu². Les pavillons des « Basses Fouassières » regroupent deux à quatre logements mitoyens qui intègrent des serres sur deux étages et des murs Trombe modifiés. Chaque mur Trombe est équipé de fentes obliques et fonctionne en boucle ouverte, c'est-à-dire qu'il permet de préchauffer l'air neuf extérieur plutôt que de réchauffer l'air intérieur comme dans le système original à boucle fermé. Ces murs Trombe bénéficient également d'un store extérieur, qui permet de limiter leurs déperditions thermiques nocturnes une fois abaissé ou de l'occulter en cas de risque de surchauffe³. De par leur conception et leur isolation supérieure aux normes de l'époque, ces logements étaient particulièrement performants puisque différentes opérations d'instrumentation ont montré une réduction de 50 % des besoins de chauffage par rapport à un logement conventionnel de même surface⁴.



Figure 127 : HLM des « Basses Fouassières » conçus par J.-R. Mazaud et C. Parant, assistés par M. Cabanat et B. Sésolis. On remarque que les stores blancs sont baissés et occultent les murs Trombe en journée.
(Google Street View, consulté le 24 novembre 2021)

-
- 1 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.
 - 2 B. Sésolis, M. Cabanat, *Chauffage de l'habitat par l'énergie solaire : expérimentations sur les maisons CNRS d'Odeillo (Pyrénées Orientales)*, Thèse de 3ème cycle Géophysique spatiale option environnement, Université Paris-Diderot, juin 1976, 253 p. Dir. inconnu.
 - 3 J.-R. Mazaud, « 27 pavillons bioclimatiques en HLM locatif à Angers », p. 266 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 4 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

Pour les architectes, si ces maisons étaient « capables de faire des économies d'énergie¹ », alors elles devaient pouvoir responsabiliser leurs habitants². Mais étant donné le caractère expérimental de ces réalisations et des techniques solaires passives employées, ils étaient néanmoins soucieux « de ne rien engager "sur le dos" des habitants, qui puisse avoir en cas de constat négatif, un caractère irrémédiable³. » Cette prudence était justifiée puisqu'à l'usage il est apparu que les habitants n'ont pas assimilé le fonctionnement des murs Trombe et la contrainte quotidienne de manipuler les stores, malgré le fait que de nombreux habitants étaient initialement enthousiastes à l'idée d'habiter une maison bioclimatique⁴. Les architectes avaient pourtant réalisé un travail pédagogique auprès des habitants, afin d'expliquer le fonctionnement du mur Trombe et l'importance de la manipulation des stores, qu'ils avaient spécialement étudiés afin qu'ils puissent être rapidement relevés et abaissés. Mais après quelques mois, ils ont fait le constat que les stores n'étaient plus manipulés et restaient constamment fermés⁵. Selon Sésolis, cet échec venait du fait que les habitants ne voyaient pas de l'intérieur s'ils étaient fermés ou non. Il explique :

« Comment demander à des gens de monter et de baisser un store qu'ils ne voient pas ? Même s'ils ont compris, c'est une stupidité. [...] C'est une erreur que j'ai faite, c'est une erreur de conception, parce que j'ai oublié simplement ce que l'occupant était prêt à faire ou ne pas faire. [...] Il faut que ce soit automatique, on ne peut pas responsabiliser les gens sur des gestes pareils, c'est complètement ridicule⁶. »

Les contraintes du budget HLM n'ont pas permis d'automatiser ce système et ont obligé les concepteurs à s'en remettre aux habitants. Pour Sésolis, cet exemple illustre le problème de la responsabilisation de l'habitant dans une maison bioclimatique, qui doit être correctement évalué durant la phase de conception⁷. Il justifie l'intérêt d'automatiser un certain nombre d'opérations, comme l'ouverture et la fermeture d'un élément, afin de ne pas faire reposer la

1 J.-R. Mazaud, « 27 pavillons bioclimatiques en HLM locatif à Angers », p. 269 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 P. Dard, *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat, op. cit.*, p. 83.

5 Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

responsabilité du bon fonctionnement thermique d'un bâtiment sur ses habitants ou ses occupants. L'automatisation, qui peut tout à fait être réalisée sans éléments électroniques comme dans le cas du système *Skylid*, constitue une solution très satisfaisante pour contourner ce problème.

Tous les éléments que nous avons évoqués mettent en évidence le problème de la compréhension des techniques solaires passives et du comportement thermique des constructions bioclimatiques, qui nécessitent une certaine sensibilité des habitants et des occupants aux phénomènes thermiques, étayée par une connaissance théorique des mécanismes basiques de transmission de la chaleur. Nous verrons par la suite que cette sensibilité aux phénomènes thermiques des acteurs de la conception bioclimatique est riche en significations. Bien compris, ces phénomènes influencent directement l'investissement de l'habitant des maisons bioclimatiques et l'engagent à plus ou moins ajuster ses habitudes et sa manière d'habiter aux exigences imposées par ces phénomènes. La participation de l'habitant ou de l'utilisateur et les compromis qu'il est prêt à réaliser sur ses exigences de confort constituent toujours aujourd'hui un problème central dans la conception de bâtiments économes en énergie¹. Si aujourd'hui ce problème peut être contourné par l'automatisation des éléments, les acteurs de la conception bioclimatique avaient privilégié l'emploi de techniques qu'ils considéraient comme didactiques et envisageaient secondairement l'automatisation de leur fonctionnement, étant donné que les systèmes automatiques pouvaient être coûteux.

Conclusion de la troisième partie

Nous avons abordé précédemment le développement de la conception bioclimatique jusqu'au milieu des années 1980 et le rôle des préoccupations énergétiques et environnementales dans l'adhésion à cette démarche de conception. Dans les développements précédents, nous avons souhaité mettre en évidence comment cette méthode de conception a évolué vers une démarche de conception, revendiquée par des acteurs français et américains qui partageaient les mêmes références, les mêmes problèmes relatifs au dimensionnement des techniques solaires passives et des motivations analogues. Nous avons particulièrement insisté sur l'approche expérimentale de ces acteurs, car il apparaît que la conception bioclimatique se

1 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc ; Entretien avec Bernard Sésolis, le 12/03/2020 à Paris.

situe précisément dans une tension entre la possibilité de reproduire des techniques solaires passives déjà éprouvées, et la contrainte d'intégrer ces techniques et de les dimensionner en fonction d'un climat local et d'un microclimat singulier. Cette dernière opération apparaît comme particulièrement délicate et a entraîné de nombreux problèmes relatifs au confort des maisons bioclimatiques et solaires passives, qui constitue une limite déjà observée à l'époque et parfois reprise afin de critiquer cette démarche de conception. Enfin, nous avons abordé le rôle crucial de l'habitant, le problème de la compréhension des phénomènes thermiques à l'œuvre dans ces maisons et l'importance de sa participation, qui paraît dépendre de son niveau de compréhension et d'engagement. Ce dernier point met en évidence le délicat problème de la prise en compte du confort des habitants et de sa responsabilisation. Cet argument a également été repris afin de critiquer les réalisations bioclimatiques et solaires passives : Banham affirme ainsi que les manipulations quotidiennes des panneaux réflecteurs dans la maison de Baer à Corrales constituent une forme d'aliénation domestique des habitants¹.

Sans affirmer que l'intérêt pour la conception bioclimatique s'estompe totalement entre le début et le milieu des années 1980 – étant donné qu'il réapparaîtra au milieu des années 1990 et qu'il revient actuellement – tous les acteurs avec lesquels nous avons pu nous entretenir nous ont fait part d'un désintérêt soudain pour cette démarche de conception à cette période et de l'émergence d'autres préoccupations chez les architectes et ingénieurs, comme le postmodernisme. Selon nous, ce désintérêt est contingent et ne justifie en aucun cas de ne pas aborder les significations qui peuvent être associées à cette démarche de conception qui concernent des problématiques plus générales, qui relèvent de la philosophie et plus particulièrement de la philosophie des techniques. Aborder les significations de la conception bioclimatique permettrait d'appréhender l'actualité des problématiques qu'elle a pu soulever, par-delà les contingences historiques qui ont précipité le désintérêt pour cette démarche. Ce sera l'objet de notre dernière partie.

1 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 285.

PARTIE IV : PORTÉE PHILOSOPHIQUE DE LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

L'objet de cette partie est de comprendre la portée philosophique de la conception bioclimatique, afin de montrer qu'elle n'est pas seulement une méthode de conception en architecture. Elle formerait un ensemble relativement cohérent de notions et de concepts qui structurent une compréhension originale des productions techniques, particulièrement en relation avec les phénomènes climatiques et microclimatiques. La conception bioclimatique serait à la fois une démarche d'invention et de compréhension des productions techniques déjà existantes, qui formerait plus généralement une « approche bioclimatique¹ » au sens d'Olgyay. Olgyay souhaitait vraisemblablement que la conception bioclimatique serve à produire des connaissances et permette d'aborder certains problèmes : elle devait être une « approche », c'est-à-dire un point de vue sur un ensemble de phénomènes problématiques qui permet d'en engager l'analyse².

Mais comprendre l'approche bioclimatique et les problèmes qu'elle contribue à enrichir suppose de mobiliser d'autres ressources, afin de montrer la généralité de ces problèmes et leur actualité éventuelle. Pris dans leur ensemble, les travaux que nous avons présentés précédemment nous semblent intéressants à étudier du point de vue de la philosophie des techniques. Le détour par la philosophie des techniques, mais aussi par la géographie humaine et par l'anthropologie, nous paraît indispensable afin de déployer la portée philosophique de la conception bioclimatique. On pourrait objecter que l'envisager sous cet angle serait peut-être aller trop loin et prêter aux acteurs de cette démarche de conception des intentions qu'ils n'avaient pas eues. Cette objection reviendrait à considérer que l'ensemble des travaux que nous avons présentés précédemment étaient l'œuvre de techniciens seulement préoccupés par les économies d'énergies, indifférents aux significations de la conception bioclimatique et à la compréhension des phénomènes thermiques et climatiques qu'elle engage. En plus d'être historiquement fausse, elle présupposerait que toute activité technique n'est que la réponse à un besoin et n'engage aucune dimension réflexive ou symbolique, en bref, aucune signification.

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit.

2 C'est le sens que Gaston Bachelard donne à ce terme en épistémologie, voir : G. Bachelard, *Essai sur la Connaissance approchée*, op. cit., p. 7-16.

Cette objection est selon nous irrecevable. Simondon a mis en évidence que ce type de critique présuppose que les techniques ne possèdent « pas de significations, mais seulement un usage, une fonction utile¹ », ce qui dans notre cas signifierait que les techniques solaires passives de chauffage ne sont pas très différentes des techniques de chauffage conventionnelles à combustion ou à effet Joule, puisqu'en définitive elles servent toutes à chauffer. En plus de dénier la singularité des techniques solaires passives, cette objection refuserait de considérer les significations associées à l'emploi de ces techniques qui ne sont pas réductibles à leurs seules fonctions de chauffage ou de rafraîchissement. En développant l'utilisation de ces techniques conçues à partir du climat, la conception bioclimatique a pu indirectement hériter de problèmes relatifs à la représentation du climat et à son influence, qui ont occupé de nombreux philosophes, géographes et anthropologues². Compte tenu de ce fait et contre l'objection que nous avons précédemment évoquée, nous souhaitons montrer que la conception bioclimatique possède une portée philosophique qui peut être comprise par l'intermédiaire de la philosophie des techniques³.

En supposant que l'ensemble des travaux évoqués précédemment forment une unité théorique relativement cohérente et bien représentative de la conception bioclimatique dans la période considérée, nous souhaitons étudier en détail certaines notions et certains concepts qui nous semblent riches en significations. Ils nous paraissent contenir en germe des intuitions importantes à développer à la lumière de travaux en philosophie des techniques, notamment ceux de Simondon, mais aussi en anthropologie et en géographie humaine du XX^e siècle. Selon nous, la dimension philosophique de la conception bioclimatique peut être comprise à partir de trois problématiques. La première concerne le problème de la compréhension et de la schématisation du fonctionnement des techniques faisant intervenir des phénomènes thermiques : elle mobilise ce que nous appelons la mentalité thermique des acteurs de la conception bioclimatique. La seconde concerne l'étude des constructions et des aménagements

1 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 10.

2 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 17 ; Entretien avec Patrick Bardou, le 09/10/2019 à Marseille.

3 G. Simondon, « Allagmatique », *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Grenoble : Jérôme Millon, (coll. Krisis), 2005, p. 562 ; G. Simondon, « Recherche sur la philosophie de la nature », *Sur la philosophie (1950-1980)*, op. cit., p. 30-31. Simondon a lui-même étudié des problèmes philosophiques importants à la lumière de notions et d'opérations prises comme paradigmes, comme l'information et la cristallisation, et il a montré que cette méthode était courante dans l'histoire de la philosophie. Voir : G. Simondon, « L'objet technique comme paradigme d'intelligibilité universel », *Sur la philosophie (1950-1980)*, op. cit., p. 397-420.

passés appartenant à l'architecture vernaculaire, traditionnelle ou dite « sans architectes¹ ». Nous verrons en particulier que la conception bioclimatique s'est structurée autour d'une réactualisation des caractéristiques de ces constructions anciennes et d'une analyse critique des choix techniques qu'elles cristallisent. Enfin, la troisième dimension concerne la problématique la plus générale, relative à la relation entre l'activité technique et le milieu naturel, étudiée selon le prisme des caractéristiques climatiques d'une localité. Cette dernière dimension synthétise les deux précédentes et repose le délicat problème du déterminisme climatique sur lequel nous reviendrons.

IV.1. La mentalité thermique et ses analogies

On aurait tort de penser qu'un mur Trombe était envisagé comme une simple technique de chauffage par les acteurs de la conception bioclimatique et solaire passive. Cet élément était également un objet de réflexion voire de contemplation pour ces acteurs qui étaient particulièrement sensibles aux phénomènes thermiques qu'il concrétise. David Wright affirme que c'est en observant le fonctionnement des murs Trombe des premières maisons d'Odeillo-Font-Romeu qu'il a eu l'intuition qu'il fallait « penser comme une molécule d'air² » afin de concevoir selon les phénomènes thermiques naturels. Comme toute technique solaire passive, le fonctionnement d'un mur Trombe manifeste directement certains phénomènes parfois complexes à appréhender, comme la convection naturelle ou le rayonnement de grande longueur d'onde. Sa conception cristallise ces phénomènes thermiques et explique que cette technique ait été privilégiée pour sa facilité à être comprise³.

Alors qu'à cette époque la convection restait « encore le plus mal connu des trois modes de transmission de la chaleur⁴ » selon les physiciens, les techniques solaires passives permettaient de contrôler ce phénomène avec une bonne approximation, en anticipant ses effets sans avoir à recourir à des calculs complexes. Le fait que ces techniques soient à la fois des systèmes susceptibles de répondre à un besoin comme le chauffage ou le rafraîchissement et des modèles dont le fonctionnement manifeste un certain nombre de phénomènes thermiques

1 B. Rudofsky, *Architecture sans architectes*, Paris : Chêne, trad. de l'anglais par D. Lebourg, 1980, n. p.

2 Entretien avec David Wright, le 30/09/2021 (à distance). Traduction personnelle, citation originale : « to think like an air molecule ».

3 D. Kelbaugh, « Solar Home in New Jersey », *Architectural Design*, op. cit., p. 656.

4 Ch. Bory, *Énergétique. Tome 1. Les Échanges de chaleur par convection (1ère partie)*, op. cit., p. 8.

nous paraît être un point indispensable à développer. Il illustre la sensibilité aux phénomènes thermiques des acteurs de la conception bioclimatique que nous avons déjà mentionnée, ainsi que la dimension « didactique¹ » des techniques solaires passives qu'ils employaient. De nombreux acteurs relatent que l'observation d'un mur Trombe, ou d'un capteur à eau ou à air en fonctionnement, a été l'occasion d'une prise de conscience de l'évidence d'utiliser l'énergie solaire, et par extension de concevoir avec le climat. Cette prise de conscience a généralement déterminé leur carrière par la suite et a souvent initié leur intérêt pour la conception bioclimatique.

Simondon a proposé d'étudier au début des années 1960 ce qu'il nommait « la mentalité technique² ». Cette notion regroupe les trois dimensions cognitives, affectives et normatives intrinsèquement liées qui structurent la compréhension des techniques à une époque. Du point de vue cognitif, Simondon a mis en évidence que « la mentalité technique offre un mode de connaissance³ », consistant à généraliser le fonctionnement de certaines techniques afin d'interpréter d'autres phénomènes. Il est alors possible d'étudier ce processus de généralisation à l'œuvre dans la « mentalité technique » à différentes époques⁴. En ce qui concerne les acteurs de la conception bioclimatique, la « mentalité technique » qui les caractérise prenait vraisemblablement la forme d'une mentalité thermique, c'est-à-dire d'une capacité à imaginer et à anticiper les phénomènes thermiques à l'œuvre dans le fonctionnement d'une technique solaire passive, et plus généralement au sein d'une construction. Elle se traduit par une certaine aptitude à mentalement schématiser ce fonctionnement et à la généraliser. Cette mentalité thermique se manifeste à travers les nombreuses analogies utilisées pour expliquer ces phénomènes ou pour illustrer l'effet d'une technique solaire passive.

Simondon définit l'analogie comme une « une identité de rapports et non un rapport d'identité⁵ ». Il la distingue nettement de la simple ressemblance et de la métaphore qui assimilent superficiellement les caractéristiques extérieures de différents phénomènes, alors que l'analogie met en correspondance des dynamismes ou des fonctionnements communs à deux

1 Entretien avec Patrick Bardou, le 09/10/2019 à Marseille.

2 G. Simondon, « La Mentalité technique », *Sur la technique (1953-1983)*, Paris : PUF, 2014, p. 295-313. Il reprend vraisemblablement cette notion de « mentalité » à Lucien Levy-Bruhl dans *La Mentalité primitive*, Paris : Félix Alcan, (coll. Travaux de l'année sociologique), 1925, p. 1-16.

3 *Ibid.*, p. 296.

4 *Ibid.*, p. 297.

5 G. Simondon, *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Grenoble : Jérôme Millon, (coll. Krisis), 2005, p. 562. Cette définition provient de Bruno de Solages, dans *Dialogue sur l'analogie*, Paris : Aubier, 1946, p. 154.

phénomènes afin d'enrichir la connaissance de l'un par l'autre¹. Dans le cas de la mentalité thermique des acteurs de la conception bioclimatique, leurs analogies étaient principalement empruntées au domaine de l'électronique et nous verrons qu'elles étaient physiquement fondées sur la profonde similitude entre les phénomènes électriques et thermiques. Nous étudierons dans un premier temps l'ensemble de ces analogies, pour nous concentrer dans un second temps sur leur signification quant à l'étude des phénomènes thermiques.

IV.1.1. La mentalité thermique de l'ensemble à l'élément

IV.1.1.1. Schématiser globalement les phénomènes thermiques

Nous avons déjà évoqué l'importance de la compréhension des « chemins thermiques² » ou du « cheminement des flux thermiques³ » au sein des constructions pour les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Elle participe à la sensibilité thermique de ces concepteurs qui caractérise leur approche de la conception mais aussi, comme nous l'avons déjà vu, leur manière d'habiter. Cette capacité à schématiser les techniques solaires passives et cette sensibilité manifestent la mentalité thermique de ces acteurs, qui s'exprime selon deux niveaux : au niveau de l'élément, où elle permet de schématiser le fonctionnement de chaque technique solaire passive de manière indépendante, et au niveau de l'ensemble, lorsque plusieurs de ces techniques sont intégrées dans une même construction et fonctionnent en synergie⁴. Il est considérablement plus délicat de se représenter le fonctionnement thermique d'une construction dans son ensemble, étant donné la multitude des phénomènes thermiques qui y sont continuellement à l'œuvre et qui doivent être bien hiérarchisés : par exemple, les apports internes d'un habitant au repos sont sans commune mesure avec ceux d'une serre lors d'une journée bien ensoleillée et peuvent être négligés. C'est pourquoi les analogies employées pour décrire le fonctionnement thermique global d'une construction paraissent moins précises, quoiqu'elles soient souvent valides.

1 G. Simondon, « Allagmatique », *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit. p. 562-563.

2 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 18.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 84.

4 Cette distinction entre élément et ensemble est directement issue des travaux de Simondon qui distingue « éléments », « individus » et « ensembles » techniques. Voir : G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 15, 61.

D'un point de vue très général, les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique donnent une grande importance aux phénomènes thermiques. Ils paraissent avoir appliqué à l'architecture l'intuition de Fourier, qui écrit en 1822 que « [la] chaleur pénètre, comme la gravité, toutes les substances de l'univers¹ », tandis que « ses rayons occupent toutes les parties de l'espace². » Cette approche caractérise leur sensibilité thermique. Pour ces architectes et ces ingénieurs, les techniques solaires passives concrétisaient les idées de Fourier, pour qui « tout corps est également capable de recevoir, d'accumuler et de transmettre la chaleur³ » et que par là même chacun de ces corps « est le siège de l'ensemble des processus liés à l'accumulation et à la propagation de la chaleur⁴. » Cette sensibilité, qu'on pourrait présenter comme une sorte de panthermisme, prenait la forme d'une attention empirique aux phénomènes thermiques, mais aussi d'une compréhension plus générale et schématique des phénomènes thermiques à l'œuvre dans une construction.

Dans les différents manuels, cette compréhension se traduit par le fait que les maisons bioclimatiques et solaires passives sont souvent présentées comme des « systèmes ouverts⁵ » au sens que Ludwig von Bertalanffy donne à ce terme, c'est-à-dire comme des systèmes qui dépendent d'apports extérieurs pour maintenir leur fonctionnement. Le climat est alors appréhendé comme une source d'énergie sous différentes formes dont la construction doit assurer le captage, la conversion et la conservation temporaire dans le cas où elles correspondent à un apport favorable. Une construction bioclimatique ou solaire passive est souvent présentée comme un « échangeur thermique⁶ », selon le terme des architectes Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, qui ont mené une importante étude théorique entre 1974 et 1979 sur *l'Intégration des énergies naturelles à l'habitat*⁷. Selon eux, toute « enveloppe est un échangeur thermique entre l'intérieur et l'extérieur⁸ » dont le bilan pour une période donnée est négatif ou positif, en fonction de l'importance relative des déperditions et des apports

1 J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, [1ère éd. 1822], Cambridge : Cambridge University Press, (coll. Library Collection), 2009, p. I.

2 *Ibid.*

3 I. Prigogine, I. Stengers, *La Nouvelle alliance. Métamorphose de la science*, [1ère éd. 1979], Paris : Gallimard, (coll. Folio Essais), 1986, p. 167.

4 *Ibid.*

5 L. Von Bertalanffy, *Théorie générale des systèmes*, [1ère éd. 1973], Paris : Dunod, (coll. Idem), trad. de l'anglais par J. B. Chabrol, 2012, p. 37-40.

6 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 210.

7 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Intégration des énergies naturelles à l'habitat*, *op. cit.*, (Archives du L.A.B. – Toulouse)

8 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 210.

thermiques¹. Si ces phénomènes sont naturellement à l'œuvre dans n'importe quelle construction, un bâtiment bioclimatique ou solaire passif est caractérisé par le fait qu'il a été conçu par anticipation de ces échanges et avec la volonté de corrélérer les apports et les déperditions aux périodes de chauffage et de rafraîchissement, en essayant de maintenir « la température intérieure constante avec une consommation minimum d'énergie² ».

Cette fonction très générale « d'échangeur³ » dépend en première approximation du comportement thermique global de la construction qui est défini par sa masse (lourde, légère...). D'une manière générale, le comportement thermique d'une construction était défini par le déphasage thermique qu'elle produisait, c'est-à-dire sa capacité à retarder la transmission de la chaleur. Dreyfus et Olgyay présentent ainsi le comportement thermique d'une construction selon un référentiel temporel, par les valeurs de déphasage thermique des différentes parois données en heures⁴. Conformément à cette approche, et dans la continuité des travaux que nous avons évoqués précédemment, Georges et Jeanne-Marie Alexandroff ont cherché à classifier le comportement thermique des constructions en fonction du rapport entre la surface vitrée, la masse de matériaux et l'emplacement de l'isolation⁵. Chaque type de construction (maison à serre, enterrée...) illustre une manière d'organiser « la dégradation d'une énergie⁶ », particulièrement de l'énergie solaire, « afin de ménager dans ses espaces des ambiances acceptables⁷ » et confortables.

Pensée suivant les notions proposées par Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, une construction solaire passive est d'abord conçue pour dégrader sélectivement l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie thermique, en fonction des besoins de chauffage ou de rafraîchissement. Sans qu'elle soit systématiquement thématisée, l'intuition selon laquelle cette forme d'énergie de bonne qualité se dégrade inévitablement, mais que cette dégradation peut être retardée et distribuée à l'intérieur d'une construction traduit la sensibilité des architectes et des ingénieurs à l'entropie, ou plus simplement à l'irréversibilité des échanges

1 *Ibid.*, p. 211.

2 M. Rubinstein, J.-P. Lepoivre, « Recherche scientifique et conception architecturale dans le domaine des composants », p. 402 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 210.

4 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 142 ; V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 123.

5 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 212-214.

6 *Ibid.*, p. 209.

7 *Ibid.*

thermiques. En thermodynamique, l'entropie est une fonction qui décrit l'irréversibilité d'une transformation¹ : elle peut se traduire qualitativement par le fait que les échanges thermiques tendent irréversiblement vers un état d'équilibre, comme le présente David Wright dans son manuel². L'intuition de concevoir avec ce principe physique fondamental et avec les contraintes inévitables qu'il impose explique que la conception bioclimatique ait parfois été présentée comme « un entropisme du soleil³ » selon l'expression d'Auriault. Elle permet de comprendre l'importance accordée aux propriétés de déphasage et de stockage thermiques des matériaux, qui permettent de différer les effets de cette irréversibilité dans le temps.

IV.1.1.2. L'antinomie du terme « passif »

Plus concrètement, la mentalité thermique des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique se traduit par la conscience du rôle actif joué par l'enveloppe d'une construction dont l'action dépend de ses propriétés thermiques⁴. Cette enveloppe est parfois métaphoriquement présentée comme une « barrière⁵ » ou un « filtre sélectif⁶ », mais la signification de ces termes restait limitée par la mauvaise qualité des matériaux isolants disponibles à l'époque. Cependant, cette compréhension dynamique des phénomènes thermiques est apparue partiellement incompatible avec la notion de technique solaire passive. Le terme « passif », qui est apparu par opposition aux techniques solaires actives⁷, ne rendait pas compte de la dynamique des phénomènes thermiques à l'œuvre dans les constructions bioclimatiques et de l'action des techniques solaires passives sur ces phénomènes. Alors que les techniques solaires passives étaient vantées pour leurs performances et leur efficacité⁸, et que certaines d'entre elles comme les serres étaient présentées par leur capacité à amplifier les phénomènes thermiques⁹, l'expression employée pour qualifier ces techniques traduisait au contraire la stabilité, l'équilibre et l'insensibilité à ces phénomènes.

1 P. Chambadal, *Évolution et applications du concept d'entropie*, Paris : Dunod, 1963, p. 39-48.

2 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 63.

3 J.-P. Auriault, « De l'architecture bio-climatique outils, modèles et représentations », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », op. cit., p. 42.

4 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 38.

5 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28 ; C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », op. cit., p. 635.

6 *Ibid.*

7 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 28.

8 J. D. Balcomb, « Summary of the Passive Solar Heating and Cooling Conference », p. 1, in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

9 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 67.

Cette tension traduit une antinomie dans la mentalité thermique des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Certains d'entre eux ont proposé de modifier le terme « passif » qui avait pourtant été consacré par l'usage dès le milieu des années 1970, en France comme aux États-Unis. Georges et Jeanne-Marie Alexandroff ont par exemple proposé de remplacer ce terme par celui de « statique ». Ils expliquent :

« Le mot [passif] est dangereux, et on lui préférera "statique", qui implique toutes les médiations non actives entre l'habitant et le milieu naturel. Car l'habitation n'est jamais exclusivement défensive ; elle assume [...] un programme de défense sélectif impliquant l'admission, voire la canalisation de certains éléments du milieu naturel, donc une action, même si ses agents matériels restent apparemment passifs¹. »

Leur critique du terme « passif » s'appuie sur l'inadéquation de ce terme pour traduire la fonction de filtre sélectif assurée par l'enveloppe d'une construction. Malgré d'autres tentatives analogues, ce terme a été conservé. Si les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique étaient conscients des limites de ce terme, il pouvait conduire à de nombreuses confusions pour les non-spécialistes. Ainsi, lorsque Dominique Simonnet présente les maisons solaires passives réalisées aux États-Unis dans la revue *Le Sauvage* très diffusée, il précise immédiatement que le terme « passif » est un « terme impropre puisqu'au contraire des réalisations où des systèmes de capteurs sont prévus, c'est la maison elle-même qui joue activement le rôle de capteur² » et « forme une "*enveloppe bioclimatique*" qui doit réaliser le meilleur équilibre entre l'intérieur et l'extérieur³. » Cette précision relative à l'inadéquation du terme « passif » traduit bien une possible antinomie, puisque ce terme est susceptible de faire comprendre l'exact inverse des phénomènes thermiques qui sont effectivement à l'œuvre dans les maisons solaires passives.

Du point de vue de la philosophie des techniques, cette antinomie peut être dépassée si l'on considère les propriétés d'une machine dite « passive ». L'étude des « machines passives » a été introduite en France par l'architecte Jacques Lafitte⁴ et a été reprise et développée par

1 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 13.

2 D. Simonnet, « Inventaire des maisons écologiques », *Le Sauvage*, « La Maison écologique », op. cit., p. 52.

3 *Ibid.*

4 J. Lafitte, *Réflexions sur la science des machines*, [1ère éd. 1932], Paris : Vrin, 1972, 136 p.

Simondon en 1968¹. Bien que ces travaux soient tout à fait indépendants de l'émergence des techniques solaires passives en architecture, ils permettent d'éclairer la signification technologique de ce terme et son influence sur la mentalité thermique des acteurs de la conception bioclimatique. Pour Simondon, « les machines passives » peuvent être présentées « comme des systèmes d'évitement des incidences, tendant vers l'équilibre le plus stable, dégradant en chaleur, par des oscillations progressivement amorties² ». Il prend l'exemple d'une maison, qui possède la propriété d'amortir les oscillations thermiques mais aussi statiques, comme dans un pont ou une voûte soumise à des variations de charges³. Selon lui, cette propriété d'amortissement montre le caractère inadéquat du terme passif et il affirme que toute « machine passive » peut être considérée comme active dans la mesure où son action consiste à pouvoir se maintenir dans « en état permanent d'équilibre⁴ ».

Selon le point de vue de Simondon, l'antinomie du terme « passif » peut être facilement dépassée dans la mesure où il considère que « tous les objets techniques sont actifs⁵ ». Cette prise de conscience de l'insuffisance du terme « passif » par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique confirme l'intuition de Simondon : bien que l'expression de « technique solaire passive » ait été consacrée par l'usage, ces techniques étaient systématiquement présentées comme participant activement au contrôle climatique à l'intérieur d'une construction. En ce sens, les techniques solaires passives n'étaient désignées comme « passives » que dans la mesure où leur action sur les phénomènes thermiques était autonome et ne dépendait pas d'une énergie extérieure à celle reçue du climat. Le fait que les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique aient reconnu et signalé l'antinomie de ce terme montre qu'ils étaient soucieux de décrire le plus précisément possible le comportement thermique des techniques qu'ils employaient.

IV.1.1.3. Cybernétique et mentalité thermique

Cet intérêt pour la compréhension et l'étude du comportement thermique des techniques solaires passives et des constructions bioclimatiques peut être expliqué à la lumière des travaux

1 G. Simondon, « L'Invention et le développement des techniques », *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, Paris : Seuil, (coll. Traces écrites), 2005, p. 158-163.

2 *Ibid.*, p. 80.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 160.

5 *Ibid.*, p. 160.

en cybernétique de cette période, qui étaient connus par certains architectes et ingénieurs. La cybernétique peut être définie comme une « science-carrefour¹ » qui s'est structurée comme une « tentative de regroupement d'éléments autrefois séparés de la recherche scientifique² », comme la neurologie et l'électronique par exemple. Selon la définition donnée par William Ross Ashby en 1956, la cybernétique peut être présentée comme l'étude de « toute forme de comportement pourvu qu'elle soit régulière, déterminée ou reproductible³. » Malgré la rigueur mathématique des travaux en cybernétique⁴, la généralité de ce projet et son lien avec le développement des machines automatiques a généré un intérêt relativement superficiel pour la cybernétique qui s'est propagée dans de très nombreux champs, comme le design ou l'architecture durant les années 1960 et 1970⁵. Pour les architectes, la cybernétique permettait de renouveler la métaphore organiciste selon laquelle un bâtiment pouvait être assimilé à un organisme et donner une signification à la multiplication des équipements domotiques dans les constructions⁶.

En ce qui concerne les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique, la cybernétique a suscité un intérêt relativement mineur mais qui transparaît dans certains écrits, comme ceux de David Wright⁷ ou de l'architecte italien Sergio Los⁸, régulièrement invité à communiquer aux *Passive Solar Conferences*. Les fonctions de régulation et d'amplification, qui ont été souvent reprises pour décrire le fonctionnement de certaines techniques solaires passives, ont été particulièrement étudiées en cybernétique⁹. La recherche d'une compréhension précise du comportement thermique des constructions bioclimatiques et solaires passives dans leur ensemble pouvait s'inscrire dans le projet de la cybernétique d'étudier tous les comportements réguliers, déterminés et reproductibles

1 G.-T. Guilbaud, *La Cybernétique*, op. cit., p. 8.

2 *Ibid.*

3 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, Paris : Dunod, trad. de l'anglais par M. Pillon, 1958, p. 2.

4 Les premiers travaux de Norbert Wiener concernaient le développement des méthodes d'analyse mathématique mises au point par Fourier pour l'étude de la propagation de la chaleur. En retour, ces travaux ont permis de nombreux progrès dans la compréhension et la modélisation de ces phénomènes. Voir : P. Vernotte, « La chaleur se propage-t-elle ? », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, tome 248, 1959, p. 75.

5 H. Dubberly, P. Pangaro, « How Cybernetics Connects Computing, Counterculture and Design », p. 127-141 in : A. Blauvelt (dir.) *Hippie Modernism: The Struggle for Utopia*, Minneapolis : Walker Art Center, 2015.

6 F.-J. Z'Graggen, « Crise, écologie et cybernétique », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit., p. 66.

7 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 232-233.

8 S. Los, « Solar Passive Architecture Design », p. 840-847 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

9 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, op. cit., p. 235-328.

indépendamment de leur nature physique¹. Bien que la référence à cette science soit restée diffuse, le projet porté par la cybernétique a néanmoins marqué certains ingénieurs et architectes associés à la conception bioclimatique. La métaphore organiciste souvent employée dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, qui assimile le fonctionnement d'une construction à un organisme a été renouvelée et précisée à partir des travaux en cybernétique². Certains cybernéticiens ont proposé d'étudier parallèlement et avec les mêmes outils logiques des fonctions biologiques élémentaires, comme la régulation, et des mécanismes artificiels considérés comme similaires³. La mise en évidence d'analogies entre organismes vivants et artificiels a inspiré certains concepteurs, comme Chahroudi, qui affirme en 1977 qu'on « peut imaginer la maison comme un organisme vivant unicellulaire qui s'autorégule à partir des informations ambiantes⁴ » et qu'en « recourant à la perméabilité sélective de son toit ou de ses murs, le bâtiment bénéficie d'une véritable homéostasie, propriété fondamentale des êtres vivants⁵. »

Mais la cybernétique semble avoir marqué beaucoup plus profondément certains architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique. C'est par exemple le cas d'Ayoub, qui présente en 1977 la « climatisation naturelle sans équipements techniques⁶ » qu'il a mise au point comme une « climatisation cybernétique⁷ ». Le fait qu'il associe ces deux termes pour présenter sa méthode est particulièrement significatif. La « climatisation cybernétique » d'Ayoub repose sur le principe d'un « agencement fonctionnel des matériaux⁸ » selon son expression, qui permet aux mêmes éléments constructifs et techniques d'assurer à la fois le chauffage, le rafraîchissement et la ventilation naturelle par différence de température entre l'intérieur et l'extérieur⁹. Il explique :

1 *Ibid.*, p. 2-3.

2 J. Schlanger, *Les Métaphores de l'organisme*, [1ère éd. 1971], Paris : L'Harmattan, (coll. Histoire des Sciences Humaines), 1995, p. 28-30.

3 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, *op. cit.*, p. 235-243.

4 D. Chahroudi, « La maison organique », trad. de l'anglais par C. Vinsonneau, *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, *op. cit.*, p. 34.

5 *Ibid.*

6 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 34. Voir également : S. Von Ueli, « Interview mit Dr. Raymond Ayoub », *Bauen+Wohnen*, « Energie und Raumklima – Ansatzpunkte für eine neue Architektur », 7/8, août 1977, p. 253.

7 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 34.

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*, p. 34-36.

« Il ne s'agit donc pas ici de mesures constructives différentes et spéciales pour le chauffage et le refroidissement mais simplement d'un agencement organique des éléments et matériaux de construction usuels qui permet au bâtiment d'être réceptif à la chaleur en hiver, donc de se chauffer et d'émettre sa chaleur en été, donc de se refroidir. Il s'agit de cybernétique¹. »

Ayoub prolonge la métaphore organiciste tout en l'approfondissant. Selon lui, la possibilité de concevoir un bâtiment comme « un organisme qui s'adapte aux conditions extérieures et aux saisons² » n'est que l'expression des « lois physiques connues³ », particulièrement pour tout ce qui concerne le comportement thermique des matériaux et des surfaces. L'organisme est alors considéré comme l'expression d'une perfection fonctionnelle qui est capable d'utiliser les variations climatiques de son environnement. La « climatisation cybernétique » qu'il prône s'appuie sur l'ensemble de ces connaissances physiques et sur l'intégration des techniques solaires passives directement au sein du gros œuvre de la construction. Elle permet alors d'utiliser sélectivement les énergies naturelles, comme il l'explique :

« La climatisation naturelle est cybernétique et basée sur le principe de la sélectivité thermique des matériaux agencés. Elle utilise les interactions et les symbioses de même que les énergies naturelles chauffantes et refroidissantes, au lieu de recourir à des énergies artificielles pour les combattre, les détruire et les remplacer par des énergies dispendieuses et polluant l'environnement⁴. »

Cet extrait montre que la référence d'Ayoub à la cybernétique marque une profonde différence avec les projets portés par cette science. Depuis Norbert Wiener, à qui l'on doit le premier ouvrage consacré à la cybernétique publié en 1948, les possibilités techniques de régulation automatique de la température intérieure par un thermostat sont l'objet de réflexion de nombreux cybernéticiens, qui y voient l'exemple d'un système fonctionnant par rétroaction⁵. Dans son principe, un thermostat mesure la température intérieure d'une construction et ajuste

1 *Ibid.*, p. 34.

2 *Ibid.*, p. 36.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 N. Wiener, *La Cybernétique. Information et régulation dans le vivant et la machine*, op. cit., p. 191. Curieusement, Wiener évoque dans un autre ouvrage postérieur l'intérêt de la ventilation qui est naturellement à l'œuvre dans les vieilles maisons, moins étanches que les immeubles modernes. Voir : N. Wiener, *Cybernétique et société. L'Usage humain des êtres humains*, Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), 2014, trad. de l'anglais par P.-Y. Mistoulon et R. Le Roux, p. 87.

le système de conditionnement mécanique de l'air afin de réchauffer ou de refroidir l'air pour maintenir la température intérieure au niveau de la température de consigne¹. Étant donné que la température intérieure varie continuellement selon les effets climatiques et les apports internes, le thermostat est conçu pour continuellement mesurer ces variations et les corriger par l'action du système de conditionnement mécanique de l'air. Comme l'explique Ashby, si le thermostat à l'intérieur d'une construction est parfaitement fonctionnel, « une fois les volets tirés je suis tout à fait incapable de savoir le temps qu'il fait² » puisque « le bon conditionnement d'air supprime toute information à ce sujet³. »

Cet idéal de suppression des informations climatiques extérieures par le conditionnement d'air porté par les cybernéticiens est précisément ce contre quoi les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique s'opposent avec fermeté⁴. Selon eux, c'est par la prise d'information climatique par l'habitant et grâce à son action sur les éléments mobiles et manipulables que doit s'effectuer la régulation thermique d'une construction bioclimatique. Cet habitant est susceptible d'observer le temps, mais aussi de l'anticiper à court terme s'il connaît la météo et possède « un sens météorologique⁵ ». Néanmoins, nous avons vu précédemment les problèmes posés par cette responsabilisation de l'habitant et l'intérêt d'automatiser ces opérations. C'est précisément le problème dans les constructions conçues par Ayoub, qui a travaillé sur de nombreux bâtiments tertiaires ou occupés temporairement dont le fonctionnement thermique nécessite d'être automatisé⁶. Ayoub utilisait des thermostats, mais il s'agissait de thermostats différentiels, dont la fonction est de comparer la température intérieure et extérieure et d'effectuer une opération lorsque la différence entre ces deux températures dépasse une valeur programmée. Dans certaines de ses réalisations construites au milieu des années 1970, Ayoub a automatisé le fonctionnement de la ventilation naturelle et des protections solaires grâce à l'emploi d'actinomètres et d'anémomètres qui mesuraient l'intensité du rayonnement solaire et la vitesse de l'air pour chaque façade et dont les informations étaient centralisées⁷. Ces informations permettaient de ventiler naturellement la construction par

1 *Ibid.*

2 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, *op. cit.*, p. 242.

3 *Ibid.*

4 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, *op. cit.*, p. 16.

5 J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 48.

6 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 35.

7 *Ibid.*

l'ouverture de registres, d'impostes et de clapets et par la circulation de l'air le long de la construction¹ (figure 128).

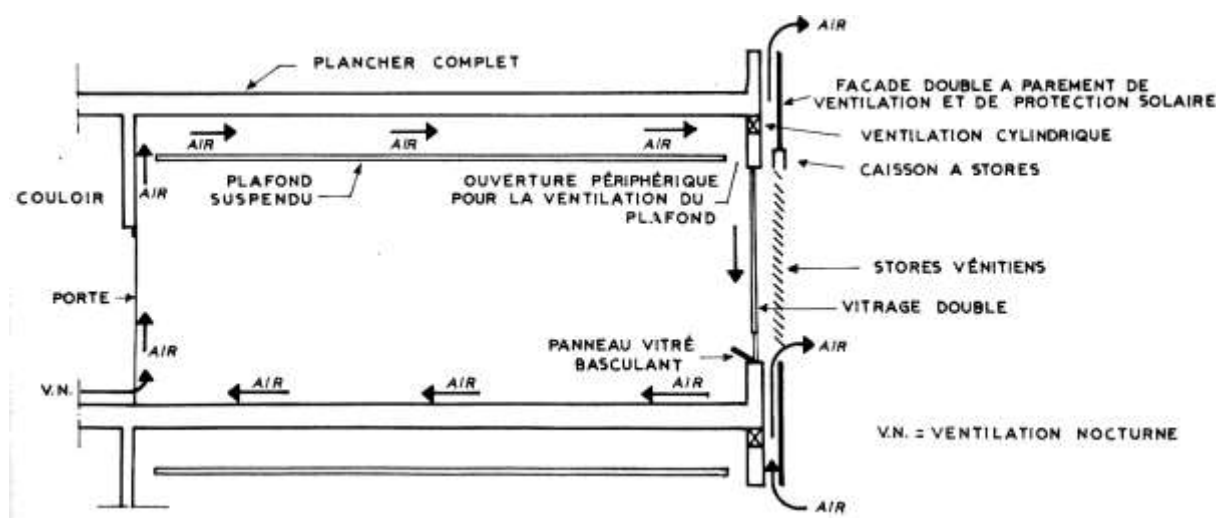


Figure 128 : Système de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment de la Cour constitutionnelle fédérale à Karlsruhe en Allemagne, conçu par R. Ayoub sur le principe de la « climatisation cybernétique ».
(R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », n° 315, juin-juillet 1977, p. 35)

Bien que complexe, cette utilisation des systèmes électroniques pour la mesure des effets climatiques extérieurs permet d'ajuster la régulation thermique du bâtiment à partir des informations climatiques. Étant donné l'importance de ces mesures, il existe une profonde différence entre la « climatisation cybernétique » d'Ayoub et les idéaux des cybernéticiens. Alors que les cybernéticiens comme Wiener ou Ashby envisageaient le thermostat comme un système de régulation à même de compenser parfaitement les variations climatiques extérieures par le conditionnement mécanique de l'air, Ayoub affirmait qu'un système cybernétique de climatisation doit à l'inverse utiliser ces variations afin de maximiser les possibilités de « climatisation naturelle² ». Le climat est une source d'information importante dans ces deux approches, mais ces informations sont interprétées de manière antagoniste : pour les cybernéticiens elles servent à maintenir mécaniquement des conditions homéothermes à l'intérieur d'un bâtiment, alors que pour Ayoub, et plus généralement pour les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique, une construction peut se rapprocher de ces

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 34.

conditions homéothermes en utilisant la variation des phénomènes climatiques extérieurs, comme l'amplitude des températures. Cette opposition particulièrement structurante dans la motivation des acteurs de la conception bioclimatique explique pourquoi ils accordaient autant d'importance aux informations climatiques et microclimatiques dans la conception et dans l'utilisation du bâtiment par la suite.

IV.1.1.4. Les techniques solaires passives et leurs analogies

Si la mentalité thermique des acteurs de la conception bioclimatique apparaît nettement dans la volonté de schématiser le fonctionnement thermique global d'une construction, elle s'exprime plus clairement au niveau de la description des éléments dans les différents manuels et documents relatifs aux techniques solaires passives. Ces manuels insistent généralement sur le fait que ces techniques ne constituent pas « des éléments statiques¹ » mais des « organes en action² », prolongeant ainsi la métaphore organiciste issue de la cybernétique jusqu'aux éléments d'une construction. Une analogie souvent reprise par les ingénieurs et les thermiciens pour décrire l'inertie thermique est de la présenter comme une « mémoire » thermique. Dreyfus emprunte par exemple cette analogie afin d'expliquer la différence entre le comportement thermique d'une construction lourde et d'une construction légère. Il écrit :

« D'une façon imagée, on peut dire encore qu'une construction légère n'a pas de *mémoire*. Une construction lourde, au contraire, enregistre tout ce qu'elle reçoit. Toute quantité de chaleur absorbée par les parois aura une influence sur le confort pendant les 10 heures suivantes ou plus³. »

Cette plus grande capacité de « mémorisation » ou « d'enregistrement » thermique des constructions lourdes permet de se représenter l'action des éléments et des matériaux massifs qui participent à l'inertie thermique. Si la compréhension du rôle de l'inertie thermique peut être difficile, la présenter comme une forme de « mémoire » thermique permet de donner l'intuition des propriétés d'accumulation et de déphasage thermique dans la durée.

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 27.

2 *Ibid.*

3 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 179.

Cette analogie est également reprise par le thermicien français Maurice Croiset¹, ainsi que par Gilles Olive qui relie la notion d'inertie thermique à celle du « "passé thermique" de l'enveloppe² ». Cette notion permet d'expliquer qualitativement en quoi les matériaux massifs possèdent des qualités de régulation et de stockage de l'énergie thermique. Elle est prise en compte dans la méthode de calcul thermique en régime variable qu'il propose qui consiste à décomposer un élément en un ensemble de « réponse³ » à un phénomène thermique déterminé (variation de la température de l'air, de l'ensoleillement direct...) pour définir sa « réponse » globale⁴. Gilles Olive affirme que ces calculs réalisables à l'ordinateur mettent en évidence la capacité de « pénétration⁵ » de la chaleur dans les constructions lourdes. On pourrait considérer cette référence à la « mémoire » ou au « passé thermique » d'un élément de construction massif comme une simple métaphore, surtout si l'on considère la complexité des phénomènes cognitifs de mémorisation. Cependant, cette notion de mémoire a un sens physique plus général : un observateur peut dire d'un système qu'il est doté d'une mémoire dans la mesure où il peut déduire ses états futurs de ses états antérieurs⁶. Dans ce cas, parler de la « mémoire » thermique d'une construction est légitime et constitue une véritable analogie.

Les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont également abondamment utilisé des analogies empruntées au domaine de l'hydraulique. Izard propose une analogie entre la régulation du débit hydraulique produite par un barrage et la régulation du flux de chaleur permise par l'inertie thermique⁷. L'un comme l'autre peuvent être interprétés comme ayant pour fonction d'amortir la variation en intensité des phénomènes en entrée⁸. Cette analogie était basée sur les travaux du physicien François-Marie-Camia, membre du Groupe A.B.C. à Marseille⁹ et spécialisé dans l'étude « des mouvements de la chaleur¹⁰ », qui a mis au point une théorie mathématique de la transmission de la chaleur à partir des analogies entre les phénomènes hydrodynamiques et thermocinétiques¹¹. D'autres analogies plus élémentaires ont

1 M. Croiset, *L'Hygrothermique dans le bâtiment. Confort thermique d'hiver, d'été, condensations*, Paris : Eyrolles, 1968, p. 171.

2 G. Olive, « Hygrothermique des enveloppes », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 51.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, *op. cit.*, p. 140.

7 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 16.

8 *Ibid.*, p. 16.

9 Entretien avec Jean-Louis Izard, le 07/10/2019 à Marseille.

10 P. Vernotte, « La chaleur se propage-t-elle ? », *op. cit.*, p. 75.

11 F.-M. Camia, *Traité de thermocinétique impulsivonne*, Paris : Dunod, 1967, p. 275.

été empruntées au domaine de l'hydraulique. Hay a par exemple présenté l'isolation mobile du système *Skytherm* comme une « valve thermique¹ » (« *thermal valve* ») dont la fonction serait de maîtriser les échanges thermiques entre la toiture et l'atmosphère.

Cependant il existe un domaine qui a fourni l'essentiel des analogies utilisées par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique : il s'agit de l'électronique. Les analogies entre les techniques solaires passives et les composants ou les fonctions électroniques sont omniprésentes dans les documents consacrés à ces techniques, ainsi que dans la description qu'en donnent certains ingénieurs. Elles illustrent leur mentalité thermique et le fait que les recherches sur la modélisation thermique de ces techniques constituaient un problème important pour ces acteurs. Si le recours aux analogies électroniques dans le champ de la thermique n'est pas exceptionnel et même relativement courant, nous verrons que la complexité des phénomènes à l'œuvre dans les techniques solaires passives a nécessité un important travail d'abstraction et de clarification de leur fonctionnement de la part des ingénieurs et des thermiciens en charge de leur modélisation. En retour, ces analogies ont parfois permis de clarifier le fonctionnement de ces techniques et ont contribué à leur amélioration.

IV.1.2. Les analogies électroniques et la modélisation thermique

IV.1.2.1. L'homologie entre les phénomènes thermiques et électriques

Avant d'étudier plus spécifiquement les analogies électroniques, il est nécessaire d'insister sur l'homologie entre les phénomènes thermiques et électriques. Deux phénomènes sont considérés comme homologues lorsqu'ils obéissent « aux mêmes formes d'équations² » indépendamment de leur nature physique. Par exemple, le passage de l'électricité à travers un ensemble de résistances peut constituer une « représentation homologique³ » de la propagation de la chaleur dans un élément de construction. L'homologie est donc un cas très spécifique d'analogie, qui s'applique à des phénomènes obéissant aux mêmes lois, selon des formules et des équations ayant une même forme⁴. À ce titre, de nombreux phénomènes thermiques et

1 H. R. Hay, « Roof Mass and Comfort », p. 26 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 Société Française des Thermiciens, *Représentations analogiques et homologiques dans les techniques de la chaleur*, Paris : Dunod, 1965, p. 3.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

électriques sont homologues et ont été étudiés suivant des « représentations homologues » au XX^e siècle¹. Par exemple, dans un traité classique de la seconde moitié du XX^e siècle sur la propagation de la chaleur, le flux de chaleur à travers un isolant est présenté comme homologue « à l'intensité du courant dans un circuit électrique à courant continu² » puisque leurs écoulements respectifs obéissent aux mêmes équations. Ainsi, chaque « circuit électrique a un circuit thermique correspondant et vice versa³ ». Cette homologie possède des implications pratiques importantes puisqu'elle « peut être employée en tant que moyen de visualisation des relations dans un système thermique en les rapportant à un système électrique, plus familier⁴. » L'existence de ces homologues est importante à rappeler afin de comprendre que les analogies entre les phénomènes thermiques et électroniques sont généralement valides, et sont souvent appuyées sur les nombreuses homologues qui existent entre ces deux phénomènes. Elles existent également dans les calculs relatifs aux isolants, qu'ils soient thermiques, électriques ou acoustiques⁵.

Ces homologues sont parfois présentées et expliquées dans certains des manuels. C'est le cas de celui de Dreyfus qui montre que les grandeurs comme la différence de température, le flux de chaleur et la résistance thermique dans les calculs thermiques correspondent respectivement à la différence de potentiel, à l'intensité du courant et à la résistance électrique en électronique⁶. Il rappelle également que les calculs de la résistance et de la conductance thermiques d'un élément de construction correspondent aux calculs des résistances montées respectivement en série et en parallèle dans un circuit électronique⁷. Certains architectes comme Koenigsberger évoquent au milieu des années 1970 l'intérêt de la modélisation par un circuit électronique pour l'étude du comportement thermique d'une construction en régime périodique⁸. Il explique :

« Dans le *modèle électrique*, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est représentée par une différence de potentiel entre deux pôles. La résistance thermique des

1 F.-M. Camia, *Traité de thermocinétique impulsionnelle*, op. cit., p. 275.

2 F. Kreith, *Transmission de la chaleur et thermodynamique*, Paris : Masson, trad. et adaptation de l'anglais par K. Badr-El-Dine, 1967, p. 18.

3 *Ibid.*, p. 19.

4 *Ibid.*, p. 20.

5 C. Huriaux, *Les Isolants*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1968, p. 7-8.

6 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 67.

7 *Ibid.*

8 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, op. cit., p. 272.

surfaces et des couches de matériaux est représentée par des résistances électriques. La capacité thermique de divers éléments est simulée par des condensateurs. En utilisant des résistances et des condensateurs insérables dans une platine d'essai, le système thermique d'un bâtiment complet peut être lu¹. »

Quoique complexes à réaliser et à interpréter, ces modèles électroniques constituaient une alternative intéressante aux simulations thermiques dynamiques par ordinateur plus coûteuses et peu accessibles à cette époque. Ces dernières avaient cependant l'avantage de permettre de tester plusieurs hypothèses, ce qui n'était pas le cas des modèles électroniques qui étaient essentiellement des outils de vérification².

IV.1.2.2. Les réseaux thermiques et les analogies électroniques

L'utilisation d'analogies électroniques était également rendue nécessaire par les recherches sur la simulation thermique dynamique et plus généralement sur la modélisation des constructions solaires passives menées aux États-Unis. Les premières modélisations effectuées au LASL nécessitaient de réduire une construction à un petit groupe de nœuds représentant chacun un élément ou un sous-ensemble (air intérieur, stockage thermique...) reliés entre eux par une équation spécifique de propagation de la chaleur. Une fois décomposées, ces équations permettaient de réaliser un calcul de simulation thermique dynamique heure par heure en régime dynamique³, ou des calculs simplifiés en régime permanent⁴. On peut considérer ces modèles comme étant isomorphes à la construction ou à la technique solaire passive qui devait être modélisée. On parle d'isomorphisme lorsqu'il existe des correspondances fonctionnelles entre les éléments ou les sous-ensembles de deux systèmes et lorsque pour des mêmes valeurs en entrée, ils fournissent les mêmes résultats en sortie⁵.

1 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « In the *electrical analogue* the indoor-outdoor temperature difference is represented by a potential difference between two poles. The thermal resistance of surfaces and layers of materials is represented by electrical resistances. Thermal capacity of various elements are simulated by capacitors. Using plug-in resistor and capacitor elements on a plugboard base the thermal system of a complete building can be read »

2 *Ibid.*

3 J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation Analysis of Passive Solar Heated Buildings – Preliminary Results », *Solar Energy*, vol. 19, n°3, 1977, p. 278.

4 P. W. B. Niles, « Modeling the Atascadero House », p. 183 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

5 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, op. cit., p. 114-118.

Étant donné la simplicité de ces modèles et la faible puissance des ordinateurs disponibles à l'époque, le principal problème rencontré par les ingénieurs consistait à déduire d'une construction ou d'une technique solaire passive les principaux phénomènes thermiques ainsi que leurs équations à intégrer au modèle sous la forme d'un « réseau thermique¹ » (« *thermal network* »). Dans le cas de la modélisation des apports et des déperditions dans un système à gain direct, le réseau thermique regroupe seulement six équations dont une seule est consacrée à modéliser les échanges thermiques entre l'air intérieur et le stockage² (U_I) (figure 129). Cette fonction U_I désigne le « couplage thermique³ » entre le stockage solide ou liquide et l'air, qui est fonction de leur différence de température. Les simulations réalisées à partir de ce réseau thermique par Balcomb et son équipe ont montré qu'il existe des valeurs optimales pour U_I , c'est-à-dire que la température du stockage thermique ne devrait pas excéder une certaine valeur, sous peine d'augmenter considérablement ses déperditions par le vitrage adjacent⁴. On peut déduire de ce modèle qu'il existe pour chaque cas « un rapport entre surface de vitrage et capacité thermique de stockage en dessous et au-delà duquel les résultats sont moins bons⁵. »

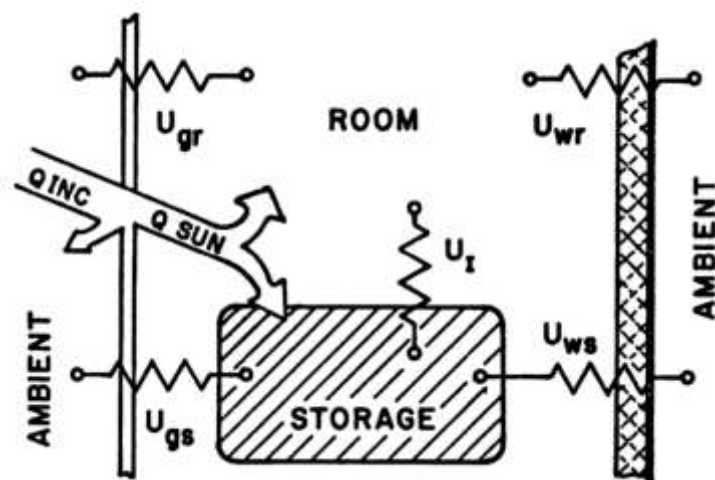


Figure 129 : Exemple de modélisation du LASL d'un système à gain direct par un réseau thermique. On remarque des analogies graphiques avec les symboles utilisés en électronique.
(J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation Analysis of Passive Solar Heated Buildings – Preliminary Results », *Solar Energy*, *Solar Energy*, vol. 19, n°3, 1977, p. 278)

- 1 R. W. Jones, R. D. McFarland, « Simulation of the Ghost Ranch Greenhouse-Residence », pp. 35 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
- 2 J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation Analysis of Passive Solar Heated Buildings – Preliminary Results », op. cit., p. 278.
- 3 *Ibid.*, p. 279.
- 4 *Ibid.*, p. 280.
- 5 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 46. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

Graphiquement, ces réseaux thermiques ne sont pas sans analogie avec les symboles conventionnels utilisés en électronique : dans un schéma électronique comme dans un réseau thermique, une résistance est représentée par une ligne ondulée en dents-de-scie entre deux nœuds. Ce domaine commun à l'étude des phénomènes thermiques et électroniques explique vraisemblablement l'apparition d'analogies électroniques dans le vocabulaire des ingénieurs et des thermiciens pour qualifier les techniques solaires passives. Ces analogies témoignent d'un effort d'abstraction et de simplification de ces techniques. À titre d'exemple, le mur Trombe est présenté comme une « diode thermique¹ » par certains ingénieurs, comme Célaire. Cette expression est parfois utilisée pour décrire un composant électrique dont la fonction est de conduire préférentiellement la chaleur dans un sens. Plus généralement, en électronique une diode est un composant dont la fonction principale est de laisser passer le courant dans un sens déterminé², tandis qu'elle s'oppose au passage du courant en sens contraire jusqu'à une tension définie³ (tension de claquage). On retrouve le même principe dans le mur Trombe : ce système est conçu pour capter et accumuler l'énergie solaire afin de la transmettre vers l'intérieur, selon un sens qui va de l'extérieur vers l'intérieur, tandis qu'il s'oppose en principe aux déperditions thermiques vers l'extérieur. Dans l'esprit de son inventeur, le mur Trombe représentait la synthèse entre la capacité de stockage thermique d'un matériau massif comme le béton et la propriété d'opacité du verre au rayonnement de grande longueur d'onde, qui forme alors une « barrière thermique⁴ ». De la même manière qu'une diode est un composant qui possède une conductance électrique « asymétrique⁵ », puisqu'elle ne laisse passer le courant que dans un sens, le mur Trombe fonctionne selon une conductance thermique asymétrique.

En pratique le mur Trombe n'est pas une diode thermique parfaite, puisqu'il existe d'importantes déperditions thermiques vers l'extérieur à travers le double vitrage et les joints, ce qui explique que des évolutions aient été envisagées pour les réduire, notamment par l'utilisation de stores mobiles. Outre ces imperfections, cet élément ne peut pas être intégralement décrit par un composant aussi élémentaire qu'une diode puisqu'il concrétise à la fois les fonctions de « captage, stockage, restitution, commande et régulation⁶ » du chauffage

1 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

2 J.-P. Pérez, C. Lagoute, J.-Y. Fourniols, S. Bouhours, *Électronique. Fondements et applications*, [2ème éd.], Paris : Dunod, 2016, p. 11-12.

3 *Ibid.*, p. 223.

4 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *Architectural Design*, *op. cit.*, p. 652.

5 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 42.

6 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.4 in : Association Française pour l'Étude et le

par l'énergie solaire. On peut donc considérer que le mur Trombe se comporte très approximativement comme une diode thermique et que cette analogie constitue une tentative pour saisir mentalement la fonction ou le schème de fonctionnement de cet élément. Les imperfections inhérentes aux techniques solaires passives et à la complexité des phénomènes de transmission de la chaleur montrent les limites des analogies avec les composants électroniques, dont le fonctionnement est à l'inverse parfaitement connu dans des conditions déterminées (tension, température...), au point qu'ils peuvent servir à assurer des fonctions de protection des autres composants dans un circuit (surtension...).

Cependant, par un phénomène de réaction, le fait que le mur Trombe ait été présenté comme une diode thermique a vraisemblablement encouragé certains ingénieurs à concevoir des techniques solaires passives qui s'approchent le plus possible du fonctionnement théorique d'une diode. Des recherches ont été menées dans ce sens grâce à l'utilisation de matériaux à changement de phase. Elles ont donné lieu à des propositions d'amélioration aux États-Unis par Telkes qui a étudié l'utilisation de matériaux isolants (mousse) remplis d'un mélange eutectique¹. En France, des ingénieurs du CSTB ont étudié un système de « mur diode à chaleur latente² » conçu pour concrétiser les fonctions « de surface de captage, de volume de stockage et de surface de restitution, sans compromettre ni le niveau d'isolation thermique global du local, ni le niveau de confort³. » Ces tentatives sont cependant restées à l'état de prototypes. Il existe donc deux mouvements qui montrent l'influence de ces analogies électroniques sur la mentalité thermique et le développement des techniques solaires passives : dans un premier temps le mur Trombe a été présenté comme une diode thermique par abstraction et simplification de son fonctionnement ; par la suite, une fois considéré selon cette analogie, les ingénieurs ont essayé de concevoir des murs diodes qui s'approchent du fonctionnement parfait d'une diode. Les recherches sur les murs diodes à changement de phase peuvent être considérées comme une tentative de cette nature.

Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

1 M. Telkes, « Trombe Wall with Phase Change Storage Material », p. 283-287 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 A. Jaffrin, J.-J. Henry, « Mur diode à chaleur latente dans l'architecture traditionnelle », p. 524-525 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 *Ibid.*, p. 524.

IV.1.2.3. Le cas de la modélisation thermique du système *Skytherm*

La relative imprécision de ce type d'analogie électronique n'a pas empêché les ingénieurs d'y avoir recours pour la modélisation thermique de techniques solaires passives plus complexes que le mur Trombe, comme le système *Skytherm*. Lors de la construction de la maison d'Atascadero, Hay avait en effet sollicité l'aide de l'Université Polytechnique de l'État de Californie afin de réaliser l'instrumentation de cette construction et avait chargé l'ingénieur Philip Niles d'en réaliser un modèle sous la forme d'un réseau thermique. Ce modèle a servi à réaliser des simulations thermiques dynamiques dont les résultats étaient comparés avec ceux obtenus grâce à l'instrumentation¹, suivant une méthode souvent employée dans d'autres expérimentations par le LASL, comme pour le *Sundwellings Program*. Étant donnée la complexité du système *Skytherm*, la mise au point de ce modèle est bien documentée et a fait l'objet de communications de Niles².

Haggard, l'architecte de la maison d'Atascadero, présente le système *Skytherm* comme une « diode thermique³ », selon l'analogie également utilisée pour décrire le mur Trombe. Mais par rapport au mur Trombe, le système *Skytherm* concrétise un plus grand nombre de fonctions, notamment celles de « capteur, stockage, dissipateur et échangeur de chaleur⁴ » qui permettent à ce système d'assurer à la fois « le chauffage solaire et le rafraîchissement par ciel nocturne⁵ ». Étant donné l'ensemble de ces fonctions partiellement antagonistes, l'analogie avec une diode thermique est en réalité imprécise : elle fait abstraction du système d'isolation mobile mis au point par Hay qui fait l'originalité du système *Skytherm* et qui lui permet d'assurer alternativement le chauffage (captage et stockage) ou le rafraîchissement (dissipation thermique). Si le mur Trombe peut être présenté comme une diode thermique avec certaines réserves, cette analogie est en elle-même insuffisante pour décrire le système *Skytherm*, dans la mesure où elle simplifie abusivement cette technique solaire passive et ne permet pas d'en modéliser complètement le comportement thermique.

Niles affirme en 1976 que les « fonctionnalités essentielles régissant les caractéristiques thermiques de la maison [d'Atascadero] peuvent être décrites de manière pratique en utilisant

1 P. W. B. Niles, « Modeling the Atascadero House », p. 183 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*, p. 183-188.

3 K. Haggard, « First Cost Economic Evaluation of the Atascadero Skytherm House », p. 250 in : *ibid.*

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « as collector, storage, heat dissipator and heat exchanger ».

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « both solar heating and nightsky cooling ».

l'analogie électrique schématique¹ », mais la modélisation qu'il propose complexifie considérablement l'image de la diode thermique proposée par Haggard. Son approche a consisté à décomposer le système *Skytherm* en sous-ensembles fonctionnels et à décrire séparément ces sous-ensembles par une ou plusieurs analogies électroniques. Il explique :

« Les murs du bâtiment peuvent être pensés comme des filtres R-C (résistance-capacité) qui amortissent l'influence des conditions extérieures variables sur la température de l'espace de vie. De même, le système de toiture bassin agit comme un filtre à grande capacitance en série avec les panneaux mobiles, qui agissent comme un interrupteur thermique pouvant changer la résistance thermique d'une valeur élevée pour les panneaux fermés, à une petite valeur lorsque les panneaux sont ouverts. Un astucieux mouvement des panneaux amène l'interrupteur à agir comme une diode électrique qui, en série avec le filtre à bac d'eau, permet à la température moyenne (analogue à la tension continue) à l'intérieur de la maison d'être augmentée au-dessus ou abaissée en-dessous des conditions moyennes extérieures². »

Selon Niles, le système *Skytherm* peut être représenté comme une diode thermique dont le fonctionnement dépend de « l'interrupteur thermique³ » (*thermal switch*) formé par le système d'isolation mobile. Le schéma du réseau thermique qu'il donne pour modéliser ce système montre le rôle central de cet élément (*figure 130*). En changeant le sens de la diode thermique, l'interrupteur thermique permet d'inverser le sens du flux de chaleur : soit de l'extérieur vers l'intérieur pendant les périodes de chauffage, soit de l'intérieur vers l'extérieur pendant les périodes de rafraîchissement.

1 P. W. B. Niles, « Modeling the Atascadero House », p. 183 in : *ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The essential features governing the thermal characteristics of the house can be conveniently described using the schematic electrical analogy »

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The building walls can be thought of as R-C (resistance-capacitance) filters which damp out the influence of varying outside conditions on the living space temperature. Similarly, the roof-pond system acts like a filter with a large capacitance in series with the movable panels which act as a thermal switch that can change the thermal resistance from a large value for closed panels to a small value when the panels are open. Judicious movement of the panels causes the switch to act like an electrical diode which, in series with the water-bag filter, allows the average temperature (analogous to the d-c voltage) inside the house to be either raised above or lowered below the average outside conditions. »

3 *Ibid.*

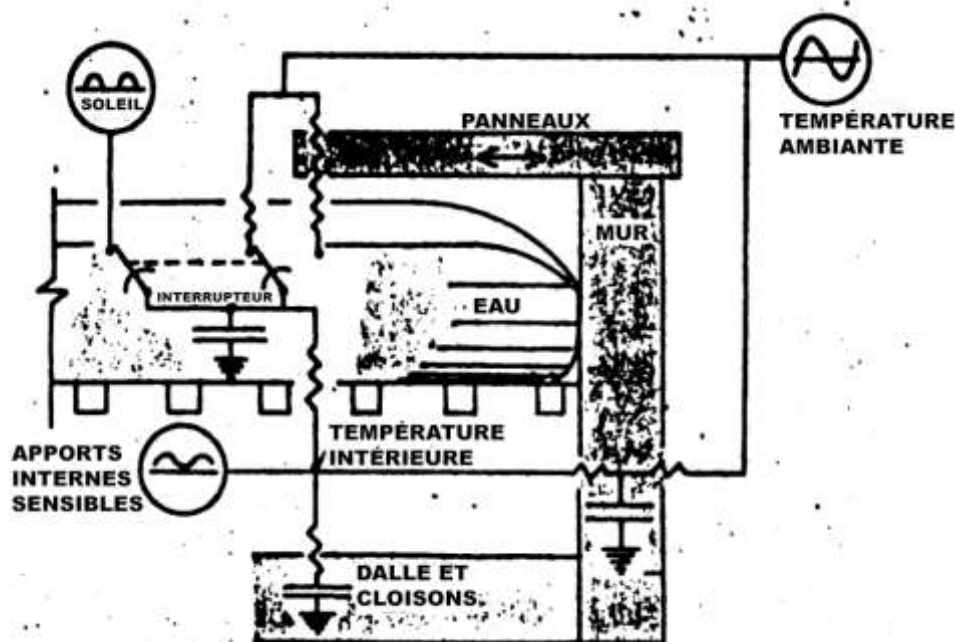


Figure 130 : Réseau thermique utilisé pour la modélisation du système Skytherm par P. Niles.
(traduit de : P. W. B. Niles, « Modeling the Atascadero House », p. 187 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit.)

Malgré sa rigueur, Niles introduit une importante simplification dans la description de son modèle en supposant que l'inversion de sens du flux de chaleur est seulement due à l'interrupteur thermique formé par l'isolation mobile. En réalité, cette inversion dépend des caractéristiques climatiques où le système *Skytherm* peut être efficace, dans les régions où l'amplitude diurne des températures est importante et surtout où la nébulosité est suffisamment faible¹. Ces caractéristiques climatiques conditionnent le fonctionnement d'une technique solaire passive de rafraîchissement, conformément à la définition donnée par Holtz, Place et Kammerud². Selon eux, le « refroidissement passif implique la décharge d'énergie par couplage sélectif du système aux parties les plus froides de l'environnement³ », comme la voûte céleste ou l'air ambiant⁴. Il existe donc, indépendamment du système *Skytherm* et de sa modélisation,

-
- 1 H. R. Hay, « The California Solarchitecture House », p. EH.73-4 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind*, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne).
 - 2 M. J. Holtz, W. Place, R. C. Kammerud, « A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems », p. 286 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille).
 - 3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Passive cooling involves the discharge of energy by selective coupling of the system to the cooler parts of the environment. »
 - 4 *Ibid.*

des caractéristiques climatiques qui rendent possible le bon fonctionnement de l'interrupteur thermique et qui ne sont pas mentionnées par Niles. Si l'on considère qu'une différence de température et une différence de potentiel sont analogues¹, le rafraîchissement de la maison d'Atascadero par rayonnement de grande longueur d'onde n'est possible que dans la mesure où il existe régulièrement une différence de potentiel entre l'intérieur (+) et l'extérieur (-) de la construction, qui permet d'établir un flux de chaleur de l'un vers l'autre durant une période suffisamment prolongée. La climatisation naturelle permise par le système *Skytherm* est possible car la différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur varie périodiquement et change de signe, selon un régime alternatif. L'interrupteur thermique formé par l'isolation mobile a essentiellement pour fonction d'exploiter ces variations climatiques périodiques.

IV.1.2.4. Modéliser les chemins thermiques

Malgré ces simplifications, l'exemple de la modélisation du système *Skytherm* par Niles montre la capacité d'abstraction des ingénieurs ayant à réaliser des modélisations thermiques de techniques ou de constructions solaires passives. Bien qu'elles mobilisent des phénomènes bien connus, les techniques solaires passives ont un comportement thermique original et associent plusieurs fonctions thermiques élémentaires qui fonctionnent en synergie (masse, isolation, effet de serre...) et ne sont pas nécessairement décomposables. L'analogie entre les isolants thermiques et électriques était connue et relativement commune pour les ingénieurs spécialisés en thermique du bâtiment², mais modéliser un système d'isolation mobile couplé à des volumes d'eau animés de mouvements de convection nécessitait de complexifier ces analogies conventionnelles. Modéliser tous les phénomènes thermiques qui interviennent dans le fonctionnement du système *Skytherm* ou du mur Trombe était un véritable problème : l'originalité des techniques solaires passives et des constructions qui utilisaient ces techniques mettait vraisemblablement en difficulté la capacité des ingénieurs à schématiser le « cheminement des flux thermiques³ ». S'ils connaissaient généralement les résultats obtenus avec ces modélisations, nous avons vu que les architectes s'étaient appuyés sur une approche plus qualitative des « chemins thermiques⁴ », en ayant recours à des classifications

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 67.

2 C. Huraux, *Les Isolants*, op. cit., p. 7-8.

3 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », op. cit., p. 84.

4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 18.

schématiques du type « soleil → espace → masse » ou « soleil → masse → espace » afin de pouvoir manipuler mentalement ces techniques dans le but de les intégrer le plus complètement possible à une construction. Quoique très simples, ces schèmes étaient généralement suffisants pour caractériser une technique solaire passive.

Mais cette approche qualitative des chemins thermiques a des limites qui ont été mises en évidence par les modélisations thermiques réalisées par les ingénieurs : elle tend à valoriser un seul type de chemin thermique au détriment des autres cheminements secondaires qui sont pourtant à l'origine de déperditions ou d'apports importants. Dans le cas du système *Skytherm*, le modèle mis au point par Niles a mis en évidence de nombreux chemins thermiques, à l'origine d'apports et de déperditions non négligeables et qui ont été résumés dans un schéma¹, traduit en français par Bardou et Arzoumanian, qui représente le bilan thermique pour une journée d'hiver durant une période de chauffage (*figure 131*). Il permet de lire directement la grandeur relative des différents flux d'énergie grâce à l'épaisseur des flèches, à la manière d'un diagramme de Sankey. Malgré sa simplicité, il complexifie considérablement l'intuition primitive sur le fonctionnement de cette technique. Le modèle montre qu'il existe un écart important entre le système *Skytherm* envisagé comme une technique solaire passive de chauffage du type « soleil → masse → espace » et la modélisation, qui met en évidence l'existence d'apports et de déperditions non négligeables. C'est notamment le cas des apports par les ouvertures, dont Hay affirmait qu'ils étaient secondaires et généralement survalorisés par les architectes², alors qu'ils couvrent vraisemblablement l'intégralité des déperditions par pont thermique à travers la dalle et par l'infiltration d'air dans la maison d'Atascadero. En ce qui concerne les déperditions, le modèle montre qu'elles sont considérables puisque les pertes par conduction à travers les murs sont approximativement égales aux apports à travers la toiture, qui constitue pourtant la principale source d'apports thermiques. Si l'on s'en tient aux résultats obtenus avec le modèle pour cette journée, on ne peut pas affirmer en toute rigueur que le système *Skytherm* a assuré le chauffage de l'air intérieur, puisqu'au total ses apports ne font que couvrir une part des déperditions thermiques qui ont lieu par ailleurs.

1 P. W. B. Niles, « Modeling the Atascadero House », p. 183 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings, op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*

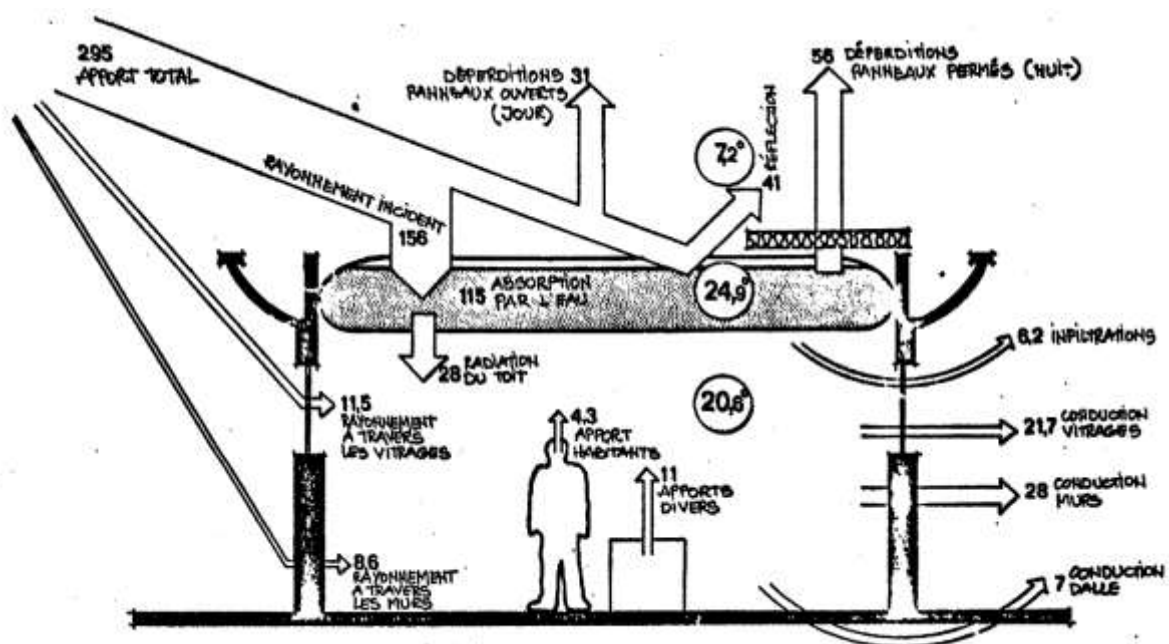


Figure 131 : Synthèse des échanges thermiques en mégacalorie (Mcal) de la maison d'Atascadero pour une journée d'hiver, d'après la modélisation de P. Niles.

(P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, Thèse 3^e cycle Architecture, Unité Pédagogique d'Architecture de Marseille-Luminy, juillet 1978, 203, p. 83)

Une fois ajustés par rapport aux résultats obtenus grâce à l'instrumentation, ces modèles ont permis de découvrir certains chemins thermiques ignorés ou négligés, dans le sens des apports comme dans le sens des déperditions. Dans le cas du *Sundwellings Program*, ces découvertes ont par exemple concerné l'importance des déperditions thermiques du mur de la serre, dont 80 % de l'énergie solaire reçue était perdue par rayonnement de grande longueur d'onde vers l'extérieur¹. Des résultats du même ordre ont été obtenus par le LASL dans les modélisations par réseau thermique déjà présentées, qui ont mis en évidence l'existence d'un rapport optimal entre surface vitrée et volume de stockage dans les systèmes à gain direct², ainsi que l'amélioration « très spectaculaire³ » apportée par l'utilisation de double vitrage. Du point de vue thermique, leur modèle a également montré l'intérêt de « découpler le stockage⁴ » de la

1 R. W. Jones, R. D. McFarland, « Simulation of the Ghost Ranch Greenhouse-Residence », p. 40 in : H. Miller, M. Riordan, D. Richards (éds.), *Passive Solar Takes Off*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 J. D. Balcomb, J. C. Hedstrom, R. D. McFarland, « Simulation Analysis of Passive Solar Heated Buildings – Preliminary Results », op. cit., p. 280.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 277. Traduction personnelle, citation originale : « decouple storage from the room »

pièce où il est situé, afin de limiter l'amplitude des températures intérieures. Ce résultat donnait l'avantage aux systèmes comme le *Drumwall* ou le mur Trombe¹.

Nous avons vu comment la mentalité thermique des ingénieurs associés à la conception bioclimatique s'est manifestée à travers l'emploi d'analogies empruntées au domaine de l'électronique, dans le but de modéliser certaines techniques et certaines constructions solaires passives. D'un point de vue simplement pragmatique et très superficiel, on pourrait considérer que le recours à ces analogies était circonstanciel et n'affectait pas leur compréhension des phénomènes thermiques. Mais les recherches d'amélioration des « diodes thermiques » montrent que ces analogies électroniques ont orienté les recherches de certains de ces ingénieurs, qui considéraient que le fonctionnement des composants électroniques illustre une fonction idéale. Parallèlement, les modèles mis au point à partir de ces analogies ont plus généralement permis d'enrichir la compréhension du « cheminement des flux thermiques² » au sein des constructions solaires passives.

Par-delà leur fonction dans les modèles, la signification de ces analogies pour les ingénieurs et les architectes associés à la conception bioclimatique nous paraît importante à développer. Comme Bachelard l'avait déjà montré à propos de ce qu'il nommait « la mentalité préscientifique³ », il existe une tendance à étendre le domaine de validité d'une analogie féconde, au risque d'en faire une véritable métaphore⁴. Il observe notamment cette tendance dans le recours systématique à l'image de l'éponge pour expliquer des phénomènes aussi divers que la compression des gaz, l'état vitreux ou les phénomènes magnétiques au XVIII^e siècle⁵. Dans ce cas, l'analogie devient une métaphore verbale qui déborde son domaine de validité et fournit autant de « schémas généraux⁶ » qu'il existe de phénomènes difficiles à comprendre. Quoique plus limitée et constamment référée aux travaux des ingénieurs et des physiciens sur le sujet, cette tendance peut être observée dans les écrits et les propos des architectes associés à la conception bioclimatique. S'ils ont eu tendance à généraliser certaines analogies électroniques, nous verrons que cela a permis d'étendre leur signification et a profondément structuré la mentalité thermique de ces architectes.

1 *Ibid.*, p. 281.

2 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 84.

3 G. Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, *op. cit.*, p. 80.

4 *Ibid.*, p. 78.

5 *Ibid.*, p. 78.

6 *Ibid.*

IV.1.3. La signification des analogies électroniques pour la mentalité thermique

IV.1.3.1. Le fonctionnement électronique comme image de la perfection technique

Les analogies électroniques ont permis de définir avec plus de précision le fonctionnement idéal d'une technique solaire passive, selon qu'elle se comporte comme une diode thermique par « conductance asymétrique¹ », un « filtre R-C² » ou un autre type de composant. Les techniques solaires passives étaient alors présentées comme des composants électroniques imparfaits dont le fonctionnement pouvait néanmoins être amélioré en réduisant l'écart entre leur comportement thermique réel et leur comportement idéal. Par un phénomène de réaction, certaines techniques solaires passives ont été améliorées dans cette perspective, afin que leur comportement s'approche de celui d'un composant électronique idéal.

L'influence de ces analogies pour la compréhension de ces techniques et la recherche de leur amélioration n'est pas seulement perceptible dans les écrits des ingénieurs, mais aussi dans ceux de certains architectes comme David Wright, au point qu'elle transparaît dans sa définition de la conception bioclimatique et solaire passive. Mis à part le manuel qu'il a rédigé, David Wright a eu l'occasion de s'exprimer à de nombreuses reprises sur son intérêt pour la conception solaire passive et plus précisément sur le privilège qu'il accorde aux techniques solaires passives. Mis à part le fait que ces techniques pouvaient fonctionner « naturellement » et « avec le minimum d'interventions mécaniques³ », il défendait le fait qu'elles concrétisent un ensemble de fonctions généralement dissociées en plusieurs éléments. Lors de la seconde édition des *Passive Solar Conferences* en 1978, il affirme que les différentes techniques solaires passives que nous avons déjà présentées ne constituent qu'une étape vers la mise au point de techniques « d'état solide » (« *solid state* ») :

« Actuellement, nous découvrons et redécouvrons des systèmes, évaluons les possibilités et peaufinons nos approches de conception. Bientôt, nous développerons des matériaux et des systèmes appropriés qui déplaceront la pensée du concepteur de la mentalité des combustibles

1 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 42.

2 P. W. B. Niles, « Modeling the Atascadero House », p. 183 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 20.

fossiles et du système mécanique, vers ce que l'on pourrait appeler la phase du gain direct et d'état solide (*solid state*). Nous nous intéressons actuellement à la masse du toit, à la boucle convective, à la serre et aux systèmes passifs hybrides, qui sont des précurseurs primitifs des choses à venir¹. »

L'expression « *solid state* » employée par David Wright pour décrire l'évolution de la mentalité des concepteurs et des techniques solaires passives provient du domaine de l'électronique et peut être traduite par « état solide » en français. En électronique, un composant ou un circuit est dit « d'état solide » quand son fonctionnement repose exclusivement sur des matériaux solides, généralement semi-conducteurs². Ce terme s'oppose aux lampes et aux tubes électroniques qui formaient l'essentiel des composants électroniques dans la première moitié du XX^e siècle. Ces composants étaient fabriqués par l'assemblage de pièces détachées³, et leur fonctionnement reposait parfois sur l'utilisation de la phase gazeuse, comme dans les tubes à gaz⁴. Ils ont connu une évolution majeure dans la seconde moitié du XX^e siècle avec l'introduction des matériaux semi-conducteurs et du dopage électronique, qui a permis de les miniaturiser et d'améliorer leur résistance à l'échauffement⁵ : les diodes à vide, formées d'une cathode chauffée et d'une anode enfermée dans une ampoule en verre⁶, ont évolué vers les diodes semi-conductrices d'état solide à jonction n-p⁷. Une diode à jonction d'état solide concrétise dans un même matériau semi-conducteur les fonctions d'une diode à vide, tout en améliorant considérablement ses performances.

Le fait que David Wright emprunte cette analogie électronique relativement spécifique des composants d'état solide pour décrire l'évolution de la mentalité des concepteurs induite par le développement des techniques solaires passives doit nous interpeler. Il affirme que cette évolution, qui est toujours en cours en 1978, est analogue à celle qui s'est opérée en électronique

1 D. Wright, « Natural Solar/Mircoclimate/Solid-State Design », p. 14, in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille). Traduction personnelle, citation originale : « At present we are discovering and rediscovering systems, evaluating possibilities, and refining our design approaches. Soon we will be developing appropriate materials and systems that will shift the designer's thinking from the fossil fuels/mechanical system mind-set to what might be termed the direct gain/solid state phase. We are presently concerned with roof mass, convective loop, greenhouse, and hybrid passive systems, that are primitive forerunners of things to come. »

2 J. Dezoteux, R. Petit-Jean, *Les Transistors*, [1ère éd. 1964], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1970, p. 5-6.

3 *Ibid.*

4 R. David, *L'Électronique*, [1ère éd. 1964], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1973, p. 51-62.

5 J. Dezoteux, R. Petit-Jean, *Les Transistors*, op. cit., p. 6.

6 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 41-42.

7 R. David, *L'Électronique*, op. cit., p. 64-66 ; J.-P. Pérez, C. Lagoute, J.-Y. Fourniols, S. Bouhours, *Électronique. Fondements et applications*, op. cit., p. 222, 383.

avec la mise au point des composants d'état solide qui concrétisaient dans un même matériau des fonctions initialement réparties dans des éléments distincts. Lors d'une conférence donnée la même année en France, il réaffirme le fait que les maisons bioclimatiques devraient être conçues comme des « structures d'état solide¹ » avec « le moins de transformations possible dans le transfert de l'énergie² » et dans le but d'y maintenir « un état énergétique constant³ ». Il prend l'exemple du mur Trombe où l'énergie doit « traverser le verre, se manifester par convection et conduction⁴ » et du système *Skytherm* où « l'énergie se ramasse dans l'eau, puis est transférée dans l'espace au-dessous⁵. » Si elles se rapprochent du fonctionnement d'un composant d'état solide dans la mesure où elles concrétisent les fonctions de captage, de stockage et de distribution, David Wright affirme que ces techniques peuvent encore être améliorées, afin de limiter les variations de la température intérieure qu'elles occasionnent et fournir « une température constante et linéaire⁶. » Ces évolutions devraient selon lui intégrer des matériaux à changement de phase, comme dans le cas du « mur diode à chaleur latente⁷ » que nous avons déjà évoqué. Selon cette perspective, les techniques solaires passives d'état solide seraient plus concrètes au sens de Simondon⁸, puisque l'amélioration de leur fonctionnement reposerait sur moins de pièces séparées.

Les évolutions envisagées par David Wright n'ont généralement jamais dépassé le stade du prototype. Néanmoins, certains matériaux, comme le verre faiblement émissif (*Low-E glass*) conçu au MIT dès 1972 par Chahroudi⁹, s'inscrivent dans la perspective qu'il a proposée. Selon la formule mise au point par Chahroudi, ce verre est recouvert en surface d'une fine couche d'argent d'une cinquantaine d'atomes d'épaisseur située entre deux couches d'oxyde d'indium¹⁰. Les vitrages faiblement émissifs concrétisent dans un même élément d'état solide

1 D. Wright, « L'Architecture bioclimatique », p. 83 in : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 A. Jaffrin, J.-J. Henry, « Mur diode à chaleur latente dans l'architecture traditionnelle », p. 524-525 in : Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

8 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 21.

9 D. Chahroudi, « Free passive solar heating for cold, cloudy winters. Designing molecules and crystal structures », p. 43-44, in : M. McDonald, C. Dayer (éd.), *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, op. cit.

10 *Ibid.*, p. 44.

les fonctions de transparence et d'isolation thermique, qui étaient dissociées dans les techniques solaires passives sous la forme d'un vitrage simple ou double et d'une isolation mobile¹, qui prenait généralement la forme d'un panneau, d'un rideau ou d'un store. En concevant le verre faiblement émissif, Chahroudi affirme avoir cherché à mettre au point une « isolation transparente² » intégrée dans un matériau qui soit « à la fois transparent et aussi isolant³ » et qui assurerait « la deuxième fonction des panneaux isolants de Baer : rejeter la chaleur solaire indésirable⁴. » La mise au point de cette « isolation transparente » a donc été pensée comme une amélioration des techniques solaires passives de captage comme le *Drumwall* et pourrait s'inscrire dans la même « lignée technique » que ce type de système. Chahroudi a réussi à réaliser au niveau microphysique et à l'échelle atomique la fonction d'isolation thermique des ouvertures que Baer avait développée au niveau macrophysique par la manipulation de panneaux isolants.

L'invention du verre faiblement émissif, ainsi que la généralisation de son utilisation, conforte la perspective d'évolution vers des techniques d'état solide envisagée par David Wright. On peut critiquer cette évolution qui tend à remplacer des éléments manipulables et réparables par des traitements de surface à l'échelle atomique, qui dans le cas du verre faiblement émissif mobilisent des métaux rares comme l'indium⁵. Elle s'écarte sensiblement des principes des technologies appropriées, mais elle a permis de faciliter l'acceptation de ces techniques, tout en améliorant leurs performances et en réduisant leur encombrement. L'analogie avec les composants électroniques d'état solide montre l'influence de ce domaine de connaissance sur la mentalité thermique des architectes associés à la conception bioclimatique. Pour David Wright, l'analogie avec l'électronique permet d'inscrire l'évolution des techniques solaires passives dans une perspective historique, tendue vers la recherche de techniques mieux intégrées et plus compactes. Il donne une signification très générale aux analogies électroniques qui permettent de comprendre les techniques solaires passives, mais aussi de penser leur évolution.

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « a material that was both transparent and also insulating ».

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « would perform like the second function of Baer's insulation doors: rejecting unwanted solar heat »

5 Aujourd'hui la fabrication des vitrages faiblement émissifs, et plus généralement des verres techniques, mobilise une grande quantité de métaux rares non recyclables (argent, indium, étain...), qui est néanmoins contrebalancée par l'importante économie d'énergie qu'ils permettent dans les bâtiments. Voir : P. Bihouix, B. de Guillebon, *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, Les Ulis : EDP Sciences, 2010, p. 183-184.

IV.1.3.2. L'ambiguïté de la notion d'amplification

L'exemple de David Wright montre que la généralisation de certaines analogies électroniques a renouvelé la compréhension des techniques solaires passives et de leur évolution, mais il existe d'autres cas où l'extension de ces analogies a entretenu certaines confusions. Nous avons évoqué précédemment les caractéristiques thermiques des serres et les problèmes liés à leur compréhension et à leur utilisation. Certains architectes ont essayé de décrire leur fonctionnement par analogie avec une fonction électronique. La serre est ainsi souvent présentée comme un « espace amplificateur¹ », que ce soit par Bardou et Arzoumanian ou par Vaye et Nicolas, qui affirment qu'elle fonctionne comme un « amplificateur thermique² ». Izard et Guyot parlent quant à eux « de l'effet d'amplification de la serre³ ». L'amplification produite par une serre peut être intuitivement comprise : par ciel clair, l'air à l'intérieur d'une serre s'échauffe rapidement en l'absence d'une ventilation et tend à amplifier les effets du rayonnement solaire ainsi que l'amplitude intérieure des températures. Nous avons évoqué que des températures de plus de 50 °C ont pu être relevées à l'intérieur d'une serre en période hivernale⁴, ce qui explique que les serres aient systématiquement été associées à une inertie thermique importante qui devait agir comme un « régulateur⁵ ».

Ces éléments tendent à confirmer l'intuition selon laquelle une serre assurerait la fonction d'un « amplificateur thermique » dans une construction. Mais cette notion d'amplification est technologiquement ambiguë et peut prêter à confusion. On considère que des objets techniques très élémentaires peuvent assurer une fonction d'amplification : une poulie ou un levier amplifient la force musculaire et permettent de soulever des charges considérables au prix d'un effort physique moins intense, mais prolongé dans le temps⁶. Mais plus spécifiquement, un système est dit amplificateur lorsqu'une « énergie faible, généralement porteuse d'information⁷ » commande « une énergie forte disponible comme alimentation, et lui

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 67.

2 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 29.

3 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 74.

4 *Project Monitor*, n°7, op. cit., p. 3. (Archives personnelles de Françoise Monchoux – Toulouse)

5 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 67.

6 P. Sandori, *Petite logique des forces. Constructions et machines*, Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), trad. de l'anglais par A. Laverne, 1983, p. 13 ; G.-T. Guilbaud, *La Cybernétique*, op. cit., p. 17.

7 G. Simondon, « Le Relais amplificateur », *Communication et information. Cours et conférences*, Chatou : La Transparence, (coll. Philosophie), 2010, p. 179.

permet de s'actualiser en travail à la sortie¹ ». Pour une petite information en entrée qui prend la forme d'un signal, un amplificateur produit une puissance considérable en sortie². C'est selon cette définition qu'on désigne l'amplification en électronique, qui suppose que le signal d'information soit parfaitement distingué de l'étage d'alimentation qui fournit l'énergie potentielle nécessaire à l'amplification³. Lorsque l'information et l'énergie d'alimentation sont confondues, on ne peut plus parler d'amplification⁴.

Si l'on considère cette définition spécifique de l'amplification, on aperçoit ici les limites de l'analogie entre une serre et un amplificateur : elle tend à affirmer qu'une serre amplifie l'énergie qu'elle capte et qu'elle peut accroître les apports solaires reçus. En réalité, le fonctionnement d'une serre repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique et son accumulation dans un volume soustrait à l'action de la convection, dont les parois sont opaques au rayonnement de grande longueur d'onde⁵. Il n'y a pas à proprement parler d'amplification. L'amplification n'existe que du point de vue de l'habitant qui perçoit l'augmentation rapide de la température de l'air à l'intérieur d'une serre à travers l'inconfort thermique important qu'il ressent, celui-ci étant éventuellement accentué par l'action du rayonnement solaire direct. Mais en toute rigueur, la serre accumule plus qu'elle n'amplifie.

Cette ambiguïté de la fonction d'amplification a été signalée par Ashby pour qui on peut « regarder de points de vue très différents le processus d'amplification, chacun pouvant mener à une opinion très particulière sur l'existence d'une amplification⁶. » Il distingue deux points de vue sur cette fonction d'amplification, selon que l'on s'intéresse au fonctionnement d'une technique ou à l'usage qui en est fait. Si l'on s'intéresse à l'énergie fournie à un dispositif amplifiant « il n'y a pas réellement amplification⁷ » dans la mesure où « la puissance émise ne dépasse pas la puissance reçue⁸. » Ainsi, du point de vue de son fonctionnement, la quantité de chaleur transformée à l'intérieur d'une serre n'est jamais supérieure à la somme des apports externes et internes qu'elle accumule. En revanche, du point de vue de l'utilisateur, « l'amplification devient très réelle et pratique⁹ » dans la mesure où elle est directement

1 *Ibid.*

2 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, op. cit., p. 319.

3 *Ibid.*, p. 320.

4 G. Simondon, « Le Relais amplificateur », *Communication et information. Cours et conférences*, op. cit., p. 179-180.

5 R. Lee, « The "greenhouse" effect », op. cit., p. 556.

6 W. Ross Ashby, *Introduction à la cybernétique*, op. cit., p. 320.

7 *Ibid.*, p. 321.

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*

ressentie et perçue : l'habitant d'une serre sent qu'il y fait considérablement plus chaud qu'à l'extérieur et que par conséquent celle-ci doit amplifier quelque chose. Pour Ashby, la différence entre ces deux points de vue montre qu'il existe une « apparence d'amplification¹ » qui est dissipée lorsqu'on étudie le fonctionnement d'une technique dans son ensemble.

En présentant la serre comme un « espace amplificateur » ou un « amplificateur thermique », on voit que certains architectes ont confondu le fonctionnement thermique réel d'une serre avec l'effet qu'elle pouvait produire et qui était ressenti comme une amplification thermique. Indirectement, ils ont étendu l'utilisation d'une analogie au-delà de son domaine de validité, au risque de conduire à des confusions relatives au fonctionnement de la serre, et plus généralement de certaines techniques solaires passives. Malgré tout, l'analogie entre une serre et un système d'amplification permettait de donner une image intuitive du fonctionnement de ce système, susceptible d'être comprise plus largement et par le plus grand nombre. Il existe donc une certaine tension entre la volonté de présenter le plus rigoureusement possibles les techniques solaires passives par des analogies dans les publications, et le souhait d'expliquer simplement leur fonctionnement et les effets qu'elles produisent, par le recours à des métaphores ou des images susceptibles d'en faciliter la compréhension.

IV.1.3.3. L'intuition de la modulation climatique

Cette tension apparaît très clairement à travers une analogie régulièrement reprise pour désigner l'action d'une construction sur le climat dans les écrits relatifs à la conception bioclimatique et solaire passive : il s'agit de la notion de « modulation ». Dès 1973, Moorcraft affirme qu'un « contrôle climatique efficace² » consiste dans la « modulation³ » du « flux entrant et sortant de chaleur à travers des éléments de construction construits, orientés et situés différemment⁴ ». Selon lui, les techniques solaires passives montrent que « les enveloppes extérieures des bâtiments peuvent être utilisées pour moduler à la fois l'entrée et la sortie de chaleur à travers eux⁵. » En 1974, on peut lire dans un numéro de la revue *Techniques &*

1 *Ibid.*

2 C. Moorcraft, « Solar Energy in Housing », *op. cit.*, p. 652.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 643-652. Traduction personnelle, citation originale : « The inflow and outflow of heat across differently constructed, oriented and located building elements display periodicities in their directional and quantitative characteristics. Effective climate control consists of the modulation of these patterns. »

5 *Ibid.*, p. 652. Traduction personnelle, citation originale : « the outer skins of buildings can be used to modulate both the inflow and outflow of heat across them. »

Architecture consacré aux maisons solaires que les « aspects *bio-climatiques* impliquent que la conception des habitations soit liée à une modulation climatique¹ » et que le problème des concepteurs est généralement de lier cette « modulation climatique à leurs constructions² ». L'expression de « modulation climatique » apparaît dans d'autres documents³, où elle est parfois utilisée pour présenter la fonction de certains éléments⁴.

L'idée qu'une construction bioclimatique doit exercer une modulation adéquate des facteurs climatiques apparaît plus généralement dans de nombreux manuels. Dans les manuels français, elle provient généralement des travaux réalisés par François-Marie Camia, qui a mis au point une méthode mathématique de calcul thermique qui assimile la conduction de la chaleur à des « impulsions thermiques⁵ » instantanées, présentées comme « un dégagement subit de chaleur⁶ » dans une surface donnée, qui forment une « somme d'impulsions élémentaires⁷ » dans le cas d'un chauffage régulier. En assimilant la conduction de la chaleur à une impulsion ou à un « signal thermique », cette méthode permet d'étudier la variation périodique de ce signal produite par l'action du climat sur un élément de construction. Camia explique en 1976 :

« La variation thermique climatique est étroitement liée au soleil et donc essentiellement modulée. À notre échelle humaine, cette modulation est de deux types, due à la double circulation de la Terre : la circulation du globe autour du soleil et sa rotation sur lui-même. En gros, il y a une onde porteuse, de période annuelle, modulée par une variation diurne, de période 365 fois plus courte. [...] On arrive ainsi à avoir une allure générale quantifiée de la modulation diurne et de la modulation annuelle⁸. »

-
- 1 J.-L. Wallet, P. Le Chapellier, « Énergie solaire et habitation », *Techniques & Architecture*, « Façades – Dossier "maisons solaires" », n° 300, septembre-octobre 1974, p. 106.
 - 2 *Ibid.*
 - 3 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, *op. cit.*, p. 59 ; G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 134-136 ; R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, *op. cit.*, p. 47.
 - 4 J.-P. Ménard, M. Coiffait, « Panorama des constructions solaires françaises », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 66, *op. cit.*, p. 53.
 - 5 F.-M. Camia, *Traité de thermocinétique impulsionnelle*, *op. cit.*, p. 18.
 - 6 *Ibid.*
 - 7 *Ibid.*, p. 22.
 - 8 F.-M. Camia, « Pour une meilleure compréhension des échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement », VIII.5 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, *op. cit.* (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

En présentant la variation des phénomènes climatiques sous cet angle, Camia établit une analogie entre la variation de l'amplitude diurne des températures et la modulation d'amplitude telle qu'elle existe en électronique. La modulation est une opération électronique indispensable en communication : elle permet la transmission d'une information par l'introduction d'une onde modulante dans une onde porteuse de haute fréquence¹. Camia reprend une analogie empruntée au domaine de l'électronique. Bien qu'il affirme qu'il faut considérer cette analogie avec prudence dans la mesure où un « signal thermique » ne peut pas être confondu avec une onde² et que la variation de l'énergie reçue par une surface n'est pas sinusoïdale³, la clarté de cette approche périodique des phénomènes climatiques a été reprise, particulièrement dans le manuel *Archi bio*⁴. Les travaux de Camia permettent de donner une signification physique à l'intuition selon laquelle une construction réalise une modulation climatique : l'onde qui représente l'amplitude des températures extérieures est amplifiée dans un système de captage (serre, mur Trombe...) pour être modulée à l'intérieur d'une construction lourde⁵ (figure 132). Cependant, cette approche s'applique seulement aux climats et aux périodes de l'année où l'amplitude diurne des températures est suffisamment importante.

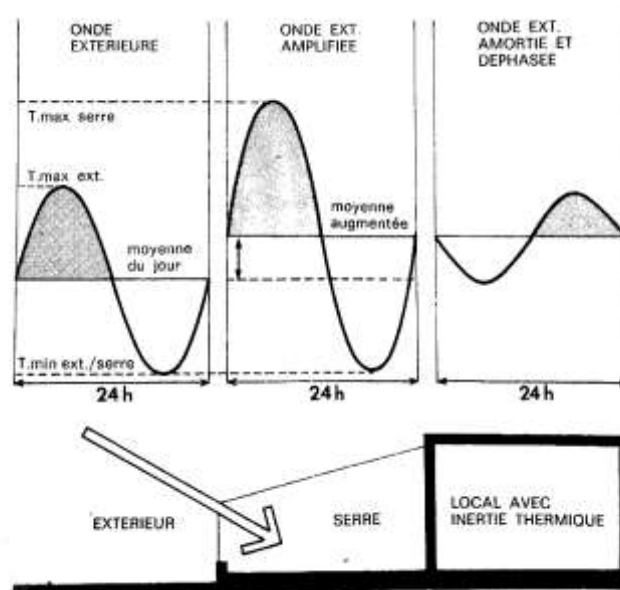


Figure 132 : Schéma de la modulation d'une onde thermique grâce à l'inertie, selon l'approche de F.-M. Camia. (J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 78)

- 1 D. Bensoussan, *La Modulation. Principes et modes*, Paris : Dunod, (coll. Modules Teccart), p. 1.
- 2 F.-M. Camia, *Traité de thermocinétique impulsionnelle*, op. cit., p. 30-31.
- 3 F.-M. Camia, « Pour une meilleure compréhension des échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement », VIII.5-VIII.6 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
- 4 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 17-18.
- 5 *Ibid.*, p. 77.

Peut-on généraliser l'intuition d'une modulation climatique et considérer qu'une construction bioclimatique dans son ensemble module le climat ? Cette réponse peut être positive si l'on se détache de cette définition restrictive de la modulation et que l'on considère l'opération de modulation dans sa généralité. Selon la définition qu'en donne Simondon, il existe une modulation lorsqu'on trouve un « système recelant une énergie potentielle¹ » sur lequel peut agir une « information modulante² » selon un principe déjà présenté à propos de l'amplification. Ce principe général permet d'expliquer des opérations de modulation très simples, comme la projection d'une image : l'image à projeter module un faisceau lumineux qui ne recèle en lui-même aucune information, puisqu'il est continuellement dans le même état, alors que l'image projetée est indéterminée et peut varier suivant plusieurs paramètres³ (formes, clarté, détail...). Suivant cette définition, il existe une modulation à condition de pouvoir atténuer ou amplifier les effets d'une énergie potentielle en fonction d'un but déterminé. Elle suppose qu'il existe une « marge d'indétermination⁴ » dans un système, qui permet de définir un ensemble d'actions possibles sur une énergie potentielle continuellement disponible.

Dans ce cas, si l'on considère le système formé par le climat local et une construction, celui-ci peut être conçu comme fournissant périodiquement une énergie potentielle qui peut être modulée par l'intermédiaire des techniques solaires passives. Dans le cas du rayonnement solaire par exemple, l'énergie potentielle peut être modulée par l'action des protections solaires afin d'en atténuer la puissance ou par l'action de techniques solaires passives pour en augmenter les effets. La fonction climatique d'un claustra est d'atténuer les effets du rayonnement solaire direct tout en minimisant son action sur la circulation naturelle de l'air⁵. Si l'on considère l'ensemble formé par le climat et la construction, nous sommes alors dans la configuration d'un « modulateur à gaspillage⁶ » où « l'énergie modulable est continuellement envoyée⁷ » et se perd lorsqu'elle n'est pas utilisée. Nous retrouvons ici l'intuition précédemment évoquée selon laquelle une construction « organise la dégradation d'une énergie⁸ ». Suivant le schéma d'un

1 G. Simondon, « Perception et modulation », *Communication et information. Cours et conférences*, op. cit., p. 190.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 191.

4 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 143.

5 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 102.

6 G. Simondon, « Perception et modulation », *Communication et information. Cours et conférences*, op. cit., p. 193.

7 *Ibid.*

8 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 209.

« modulateur à gaspillage », une construction bioclimatique ou solaire passive a pour fonction de moduler l'énergie potentielle continuellement reçue. Du point de vue de la conception bioclimatique, le climat est alors compris comme un ensemble d'énergies potentielles dont les effets doivent être modulés : le rayonnement solaire est à la fois source d'apports favorables pour le chauffage, mais aussi de surchauffes éventuelles. De même, une grande amplitude des températures peut être à la fois source d'importantes déperditions thermiques, mais aussi de rafraîchissement¹. Nous verrons que cette approche de la modulation climatique renouvelle la compréhension du climat.

Mais pour se comporter comme un modulateur, une construction bioclimatique ou solaire passive en climat tempéré doit posséder une certaine « marge d'indétermination² », c'est-à-dire que l'action de ses éléments sur l'énergie potentielle issue du climat doit pouvoir varier dans une certaine marge, afin d'en contrôler les effets et de s'adapter à des besoins variables de chauffage ou de rafraîchissement. Cette marge d'indétermination est particulièrement nette dans les constructions bioclimatiques et solaires passives les plus élaborées qui possèdent de nombreux éléments mobiles et réglables. La maison d'Atascadero par exemple, dotée du système *Skytherm*, est partiellement indéterminée dans son fonctionnement. Elle possède une toiture massive qui peut être isolée ou exposée, tandis que l'espace entre les deux films PVC qui recouvrent les bacs d'eau peut être alternativement gonflé ou dégonflé, selon qu'il est nécessaire d'assurer l'isolation ou au contraire de favoriser le refroidissement de la masse d'eau par convection naturelle³. Ce type d'indétermination existe à des niveaux plus élémentaires, à travers l'ensemble des éléments mobiles qu'on trouve dans les maisons bioclimatiques et solaires passives (volets, impostes, vasistas, registres, clapets amovibles ou mobiles...). Ces éléments mobiles permettent de moduler localement un ou plusieurs facteurs climatiques ou microclimatiques (ensoleillement direct, mouvement d'air...). On peut même affirmer que cette marge d'indétermination importante caractérise les constructions bioclimatiques puisqu'on y trouve, en moyenne, un plus grand nombre d'éléments mobiles et manipulables que dans une construction conventionnelle de même surface, d'autant plus que l'emplacement de ces éléments a généralement été méticuleusement

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 34.

2 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 143.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 83. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) ; J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 55 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

étudié. La marge d'indétermination des constructions bioclimatiques et solaires passives a été véritablement pensée et anticipée lors de la phase de conception, souvent par la recherche d'éléments polyfonctionnels comme des techniques solaires passives de chauffage qui permettent également le rafraîchissement par convection naturelle (effet de cheminée).

L'intuition de la modulation climatique paraît donc riche en significations. D'un côté elle donne aux facteurs climatiques la dimension d'une énergie potentielle et permet de généraliser l'idée qu'il existe des possibilités climatiques ; de l'autre, elle définit les techniques solaires passives par leurs fonctions climatiques et leur capacité à moduler ces énergies potentielles, en permettant de dépasser l'antinomie du terme « passif ». Suivant cette intuition très générale, l'aménagement d'un microclimat à l'aide d'une haie brise-vent par un agriculteur permet de moduler le climat au même titre qu'une construction bioclimatique ou solaire passive. Bien que les moyens pour réaliser ces opérations peuvent considérablement différer, elles partagent le même but commun qui est d'agir sélectivement sur le climat local et de moduler les énergies potentielles qu'il prodigue. On peut donc affirmer que toute construction module par défaut le climat¹, mais que la caractéristique d'une construction bioclimatique ou solaire passive est d'être conçue par anticipation de cette modulation possible et suivant une certaine marge d'indétermination soigneusement étudiée.

L'ensemble des éléments que nous avons évoqués précédemment avait pour but d'étudier la mentalité thermique des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur les analogies qu'ils avaient employées, qui provenaient généralement du domaine de l'électronique, et qui constituent autant de tentatives pour décrire ou expliquer le comportement thermique des constructions bioclimatiques et des techniques solaires passives. L'utilisation de ces analogies montre l'influence des recherches sur la modélisation thermique effectuées à l'époque, basées sur l'existence d'homologies entre les phénomènes thermiques et électriques, ainsi que l'influence plus diffuse de sciences comme la cybernétique. Indépendamment de leur validité, elles traduisent la volonté d'expliquer plus ou moins simplement l'action de ces techniques. Bien que nombre de ces analogies apparaissent parfois plus complexes que les techniques solaires passives auxquelles elles se réfèrent, elles témoignent d'un important effort d'abstraction par

1 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 209.

rapport à ces techniques. Comme dans le cas de la diode thermique et des techniques d'état solide, elle montre également la volonté de définir l'horizon de leur évolution par perfectionnement de leur fonctionnement. Si certaines de ces analogies ont parfois été employées comme des images plus que des schèmes de fonctionnement réels, ces excès ont généralement été contenus par le souci de se référer constamment aux travaux des ingénieurs et des physiciens qui faisaient à l'époque autorité dans ce domaine. L'intuition de la modulation climatique nous paraît parfaitement synthétiser cette tension : elle est valide dans le cas particulier de l'étude des phénomènes thermiques selon Camia, mais sa définition demande à être généralisée pour définir les opérations réalisées par une construction bioclimatique ou solaire passive dans son ensemble.

IV.2. Concevoir et construire dans la continuité de l'architecture vernaculaire

Nous avons, pour l'instant, assez peu évoqué le rapport des architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique aux constructions du passé. Il s'avère pourtant qu'il est particulièrement signifiant du point de vue de la philosophie des techniques. S'ils étaient généralement très critiques des dérives de l'architecture moderne, et particulièrement du style international qui se serait développé par abstraction des climats régionaux¹, ils ont à l'inverse systématiquement valorisé les productions qui relevaient de l'architecture vernaculaire, au point qu'ils présentaient parfois la conception bioclimatique comme susceptible de développer un « néo-vernaculaire² ». Les acteurs de la conception bioclimatique partageaient le sentiment de concevoir et de construire dans la continuité des productions appartenant à l'architecture vernaculaire. On peut faire l'hypothèse que la conception bioclimatique, et l'étude des constructions anciennes du point de vue de cette démarche, leur permettaient de transcender les catégories de passé et de présent, en montrant les performances de ces constructions anciennes et la qualité du contrôle climatique qu'elles réalisent.

L'architecture vernaculaire désigne l'ensemble des constructions et des aménagements typiques d'une aire géographique particulière et regroupe les productions relatives à

1 *Ibid.*, p. 13.

2 *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « À l'heure solaire », n°46, 1980, n. p. (Archives personnelles de Frédéric Nicolas – Apt)

l'architecture traditionnelle, dite « populaire¹ » ou « sans architectes² », qu'elles appartiennent à un passé lointain ou récent. Le terme « vernaculaire » a ceci de spécifique qu'il traduit l'appartenance d'un objet à une localité géographique³ : en sciences de la nature, le nom vernaculaire d'une espèce vivante n'est utilisé que dans une aire relativement restreinte. C'est aussi le cas en architecture. Par exemple, le mot « cadole » est employé en Bourgogne du Sud pour désigner une petite construction de pierre sèche située dans une parcelle viticole, alors que ces mêmes constructions sont appelées « chibottes » ou « tasbones » en Haute-Loire et « masets » ou « mazets » dans le Languedoc. « Cadole », « chibotte » et « maset » sont des noms vernaculaires, dont l'emploi peut être circonscrit géographiquement. De même, un type d'architecture vernaculaire peut être localisé plus ou moins précisément. Selon l'historien John Brinckerhoff Jackson, l'habitat vernaculaire est généralement « fidèle aux formes locales, et admet rarement des innovations étrangères à la région⁴ », ce qui explique qu'il « n'est pas sujet à la mode et subit peu la marque de l'histoire en général⁵. »

Cette valorisation de l'architecture vernaculaire apparaît dans les propos et les écrits de nombreux architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique, ainsi que dans un certain nombre de manuels qui présentent des études détaillées de constructions traditionnelles. En plus d'envisager leur pratique dans la continuité de l'architecture vernaculaire, nous verrons que certains architectes ont mené eux-mêmes d'importantes enquêtes sur l'architecture vernaculaire en France, comme aux États-Unis. Ces enquêtes abordaient généralement les constructions vernaculaires en étudiant la fonction climatique de leurs éléments et visaient à montrer le rôle de ces éléments du point de vue du confort thermique et du contrôle climatique. En suivant cette méthode, ces architectes cherchaient à valoriser ces constructions du point de vue des choix techniques qui avaient été effectués lors de leur conception, et ce indépendamment de leur ancienneté. Certains d'entre eux sont allés jusqu'à réintroduire des éléments empruntés à l'architecture vernaculaire dans leurs constructions, au même titre que les techniques solaires passives, et dans la perspective d'un « néo-vernaculaire⁶ ». Malgré

1 J. Dollfus, *Les Aspects de l'architecture populaire dans le monde*, op. cit.

2 B. Rudofsky, *Architecture sans architectes*, op. cit.

3 J.-M. Alexandroff, « Habitat vernaculaire et milieu climatique », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit., p. 24.

4 J. B. Jackson, *À la découverte du paysage vernaculaire*, Arles/Versailles : Actes Sud/ENSP, trad. de l'anglais par X. Carrère, 2003, p. 175.

5 *Ibid.*

6 *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « À l'heure solaire », op. cit., n. p. (Archives personnelles de Frédéric Nicolas – Apt)

l'intérêt de cet effort de réappropriation, nous verrons que la valorisation systématique de l'architecture vernaculaire pouvait s'expliquer par une tendance à surévaluer l'influence du climat, selon un déterminisme climatique relativement strict et déjà dénoncé par certains architectes à l'époque. Nous serons donc amenés à préciser la part du déterminisme climatique dans la valorisation de l'architecture vernaculaire.

IV.2.1. L'adaptation climatique de l'architecture vernaculaire

IV.2.1.1. L'épisode moderne et l'oubli du climat

La seconde moitié du XX^e siècle est caractérisée par un regain d'intérêt pour l'architecture vernaculaire, sous l'impulsion d'historiens comme Sibyl Moholy-Nagy, Sigfried Giedion et surtout Bernard Rudofsky, à l'origine de l'exposition *Architecture Without Architects* (*Architecture sans architectes*) présentée au MoMA à New York en 1964 et à Paris en 1969¹. L'architecture rurale et populaire est également plébiscitée dans les milieux contre-culturels et diffusée dans des publications très populaires comme *Shelter*². En ce qui concerne les architectes et des ingénieurs associés à la conception bioclimatique, cet intérêt ne peut pas être complètement expliqué sans évoquer leurs critiques à l'encontre de l'évolution de l'architecture dans la première moitié du XX^e siècle, caractérisée par la diffusion du style international qui est alors présenté comme « la négation de la relation entre habitat, habitation et milieu³. » Ces critiques affirmaient que l'évolution de l'architecture et l'uniformisation des techniques de construction auraient entraîné une standardisation des bâtiments, conçus indépendamment du climat régional et local, et dont le confort intérieur reposerait exclusivement sur le conditionnement mécanique de l'air⁴. Elles apparaissent déjà dans les écrits de Fitch, qui regrette cette tendance vers l'uniformisation des constructions⁵. En 1950, il affirme qu'il est désormais possible de construire « à l'identique le même bâtiment à Portland, dans le Maine et

-
- 1 S. Moholy-Nagy, *Native Genius in Anonymous Architecture*, New York : Horizon Press, 1957, 223 p. ; B. Rudofsky, *Architecture sans architectes*, op. cit. Voir : C. Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, op. cit., p. 113-122, 163-169.
 - 2 *Ibid.* ; Entretien avec Patrick Bardou, le 09/10/2019 à Marseille.
 - 3 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 13.
 - 4 F. Nicolas, J.-P. Traisnel, M. Vaye, *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*, op. cit., p. 10.
 - 5 J. M. Fitch, « The Asymmetry of the External Physical Environment » in : M. Sawin (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, op. cit., p. 231-236.

à Brownsville, au Texas¹ » et de « maintenir exactement les mêmes conditions internes à l'intérieur des deux bâtiments² ». Sans critiquer directement cette tendance, Fitch s'interroge sur le fait que cette possibilité soit « économiquement ou même philosophiquement correcte³ », d'autant plus qu'elle repose sur « l'utilisation d'une large gamme d'équipements auxiliaires et la consommation d'énormes quantités d'énergie⁴. »

Dès les premiers travaux relatifs à la conception à partir du climat, le développement du style international est donc associé à un recours systématique au conditionnement mécanique de l'air. Cette critique est directement reprise par les architectes associés à la conception bioclimatique par la suite, comme Mazria, qui affirme en 1979 :

« L'architecture du vingtième siècle se caractérise par une importance exagérée accordée à la technologie, à l'exclusion de toute autre valeur. [...] De là cette dépendance actuelle au contrôle mécanique de l'ambiance intérieure, au détriment d'une exploitation des phénomènes climatiques et des autres phénomènes naturels pour la satisfaction de nos exigences de confort⁵. »

Selon lui, ce recours systématique aux systèmes de conditionnement mécanique de l'air aurait conduit les architectes à négliger le « caractère particulier des climats régionaux et des matériaux de construction locaux⁶ », ce qui leur aurait permis de concevoir « un même style "international" d'architecture, d'un bout à l'autre de la planète⁷. »

Les critiques de cette nature sont courantes dans les documents et les témoignages des architectes. On pourrait croire qu'elles étaient propres aux architectes, mais elles étaient également partagées par certains ingénieurs et thermiciens. Ayoub évoque les problèmes causés par l'uniformisation des matériaux et le développement des techniques industrielles de construction⁸. Dans le même registre, Camia regrette la méconnaissance du comportement

1 *Ibid.*, p. 233.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « We can now erect identically the same building in Portland, Maine and Brownsville, Texas. Indeed we do it all the time. We can even maintain exactly the same internal conditions inside the two buildings, thanks to the level of our engineering sciences. »

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « But does the fact that this is technically possible mean that it is economically or even philosophically correct? »

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « the use of a wide range of auxiliary equipments and the consumption of immense amounts of energy. »

5 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 9.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit., p. 33.

thermique des matériaux et l'uniformisation imposée par les réglementations, qui contribuent « à rendre des locaux scolaires ou des laboratoires pratiquement inhabitables pendant l'été dans le Midi de la France¹. » Sans mentionner le style international ni le mouvement moderne en architecture, il dénonce la disparition progressive « des règles et des conceptions traditionnelles² » causée par une « accélération des changements sociaux et techniques³ », alors même que « la tradition fondée sur l'expérience séculaire donnait des règles de solution très valables, qui dispensaient de tout calcul difficile l'homme de l'art⁴ ». Camia, comme Balcomb et de nombreux autres ingénieurs, partageaient l'idée selon laquelle ces règles pouvaient néanmoins être retrouvées grâce au développement des recherches dans le domaine de la thermique des constructions⁵.

IV.2.1.2. L'architecture vernaculaire comme expression d'un climat

À l'inverse, l'architecture vernaculaire est systématiquement présentée comme l'expression directe d'un climat. Cette catégorie particulièrement large regroupe les constructions primitives et populaires qui auraient été conçues « sans architectes⁶ » et construites selon des techniques considérées comme traditionnelles. Contrairement au style international, l'architecture vernaculaire antérieure à l'apparition des techniques industrielles de construction serait l'expression architecturale de la diversité climatique régionale et locale. Dans *Design with Climate*, Olgyay insiste sur le régionalisme architectural qui transparaît dans la morphologie des constructions vernaculaires qui varie considérablement d'un climat à l'autre, particulièrement à l'échelle urbaine⁷. Selon Donlyn Lyndon, l'approche bioclimatique mise au point par Olgyay a aussi pour but « d'accroître la compréhension des réponses vernaculaires et des différences culturelles⁸. » Après avoir passé en revue les constructions traditionnelles des régions froides, tempérées, chaudes sèches et humides, il affirme qu'elles montrent toutes

1 F.-M. Camia, « Pour une meilleure compréhension des échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement », VIII.1-VIII.2 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

2 *Ibid.*, p. VIII.2.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 B. Rudofsky, *Architecture sans architectes*, op. cit.

7 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 6-10.

8 D. Lyndon, « Learning to Design with Climate », in : V. Olgyay et. al. *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, op. cit. p. XX. Traduction personnelle, citation originale : « to increase the understanding of vernacular responses and cultural differences. »

qu'une « conscience du climat a été intégrée à un savoir-faire inné pour résoudre les problèmes de confort et de protection¹ » et qu'elles « étaient des expressions construites d'un véritable caractère régional². »

En plus d'y voir l'expression des climats régionaux, Olgyay retrouve dans l'architecture vernaculaire des techniques assez élaborées de contrôle climatique, comme la ventilation naturelle transversale dans les villages des zones tropicales humides ou la protection mutuelle des façades et l'utilisation de matériaux massifs dans les zones chaudes et sèches³. Elles permettent de maintenir un confort thermique acceptable, qu'il estime parfois supérieur aux maisons modernes dans le cas des constructions massives⁴. Comme d'autres architectes, Olgyay s'appuie sur le postulat selon lequel les constructions traditionnelles et primitives (tipi, igloo...) constituent généralement les réponses les plus abouties aux contraintes physiques d'un milieu (climat, matériaux disponibles...). Cette idée était également partagée par son contemporain Fitch⁵ et par Aronin⁶, qui voyaient l'un et l'autre dans la forme de l'igloo l'expression des contraintes climatiques dominantes des zones froides et notamment du vent. Comme nous le verrons par la suite, ce postulat présuppose un déterminisme climatique relativement strict : les contraintes physiques d'un milieu (climat, ressource...) suffisent à expliquer les caractéristiques morphologiques et techniques de l'architecture vernaculaire, indépendamment des facteurs culturels, religieux, esthétiques ou pratiques.

L'analyse de l'architecture vernaculaire que propose Olgyay s'inscrit dans une étude plus générale des abris animaux (nid, terrier, termitière...), qu'on peut regrouper sous le terme « d'architecture animale⁷ » selon l'expression de Karl von Frisch. Pour Olgyay, la construction d'une termitière par un groupe de termites et la construction d'une habitation temporaire ou permanente comme un tipi ou une hutte par les individus d'un groupe humain correspondent à une même tendance vers la recherche de protection et l'établissement d'un espace homéotherme⁸. Il affirme par exemple que « [l'homme] rencontre les mêmes stress que les

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 6. Traduction personnelle, citation originale : « An awareness of climate was integrated with innate craftsmanship to solve problems of comfort and protection. »

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 5.

4 *Ibid.*, p. 113.

5 J. M. Fitch, « Vernacular Paradigms for Post-Industrial Architecture » in : M. Sawin (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, op. cit., p. 243.

6 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 3-4.

7 K. von Frisch, *Architecture animale*, Paris : Albin Michel, trad. de l'allemand par P. Kessler, 1975, 345 p. ; J. P. Loubes, *Archi troglo*, Roquevaire : Parenthèses, 1984, p. 23-31.

8 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 2-3.

autres animaux dans les mêmes environnements¹. » Pour étayer ce postulat, il évoque les auteurs qui ont défendu le fait « que le climat a des effets prononcés sur la physiologie et le tempérament² » et mentionne les noms d'Aristote, de Montesquieu, mais aussi d'Ellsworth Huntington, dont les travaux en géographie du début du XX^e siècle ont parfois été critiqués pour leur déterminisme³. En affirmant que les abris animaux et les constructions qui appartiennent à l'architecture vernaculaire sont les résultats des mêmes tendances, Olgyay tend à techniciser les productions naturelles et à biologiser les productions artificielles : les termitières sont présentées comme le résultat de compromis techniques relatifs à l'orientation⁴, tandis que les habitations primitives sont montrées comme l'expression de connaissances innées et de décisions techniques devenues intuitives⁵. Dans les deux cas, ces abris sont présentés comme le résultat d'une adaptation aux caractéristiques des climats régionaux ou locaux et ils exprimeraient plus généralement les contraintes physiques d'un milieu naturel.

Sans nécessairement partager le point de vue d'Olgyay, l'image de l'architecture vernaculaire qui transparaît dans les écrits des architectes et de certains ingénieurs associés à la conception bioclimatique repose sur les mêmes postulats que ceux qui figurent dans *Design with Climate*. Les productions appartenant à l'architecture vernaculaire sont souvent présentées comme ayant été conçues selon une prise en compte consciente du climat qui transparaît dans le niveau de confort thermique acceptable qu'elles permettent de produire dans des climats parfois exigeants. Comme de nombreux architectes, Izard et Guyot considèrent que la conception bioclimatique ne fait que reprendre et prolonger certains « "savoir-faire" que se transmettaient jadis des "non-architectes"⁶ » et qui « étaient basés sur une connaissance intuitive du milieu et du climat⁷. » Les travaux du Groupe A.B.C., auquel appartenaient Izard et Guyot, étaient initialement orientés vers la recherche d'une nouvelle architecture régionale, inspirée par les caractéristiques de l'habitat vernaculaire méditerranéen⁸. Pour les membres du

1 *Ibid.*, p. 3. Traduction personnelle, citation originale : « Mankind in the same environments encounters the same stresses as other fauna. »

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « that climate had pronounced effects on physiology and temperament »

3 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, op. cit., p. 413, 415.

4 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 2.

5 *Ibid.*, p. 6.

6 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, op. cit., p. 9.

7 *Ibid.*

8 Groupement des Ateliers Méditerranéens d'Urbanisme, *Caractère méditerranéen. Étude des caractéristiques générales d'un urbanisme méditerranéen en Provence : Conclusions*, Marseille : auto-édition, décembre 1969, p. 5-6 ; P. Quinrand, R. Dabat, *Note sur la création d'un laboratoire de recherche et*

Groupe A.B.C., l'approche bioclimatique permettait à la fois de justifier de la qualité des constructions vernaculaires et de réactualiser cette connaissance jadis intuitive du climat, en s'appuyant sur les progrès les plus récents en climatologie et dans la compréhension des phénomènes thermiques¹. Les références à l'architecture vernaculaire dans le manuel *Archi bio*, comme dans d'autres manuels, permettaient d'inscrire la conception bioclimatique dans le prolongement d'une tradition plus ancienne qui aurait été oubliée. Dans son manuel, Mazria affirme que la conception solaire passive « n'est pas tout à fait nouvelle puisque, de tout temps, l'architecture régionale ou vernaculaire a reflété un lien étroit avec les fluctuations climatiques journalières et saisonnières² ».

Parmi les exemples récurrents, les constructions traditionnelles des Indiens Pueblos sur lesquels nous reviendrons sont très souvent évoquées dans les publications françaises et américaines, ainsi que dans les *Passive Solar Conferences*. Avant la colonisation espagnole, les Indiens Pueblos occupaient tout le sud-ouest des États-Unis³. Leurs villages, dont les exemples les plus remarquables sont situés dans les états du Nouveau-Mexique, de l'Arizona et du Colorado, prennent la forme de cellules superposées les unes sur les autres, accessibles via des échelles, et construites en brique de terre crue maçonnées (*adobe*) pour former des murs massifs d'environ 35 cm, qui donnent une importante inertie thermique à ces constructions⁴ (*figures 133 et 134*). Certains villages, comme celui de Taos Pueblo au Nouveau-Mexique, sont situés à plus de 2500 mètres d'altitude et bénéficient d'un ensoleillement exceptionnel.

L'habitat des Indiens Pueblos a été présenté comme l'archétype de l'architecture solaire passive par David Wright⁵. L'orientation des villages Pueblos a été particulièrement étudiée par l'architecte américain Ralph Knowles, qui a supervisé au début des années 1970 une étude complète de leur ensoleillement à Mesa Verde dans le Colorado, ainsi qu'à Acoma Pueblo et à Pueblo Bonito au Nouveau-Mexique⁶. Il a montré que la morphologie de ces villages est particulièrement bien optimisée du point de vue du captage de l'énergie solaire et de la

d'expérimentation pour l'habitat humain en milieu méditerranéen, photocopié, Marseille, mars 1969, 10 p. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

1 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 9.

2 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, *op. cit.*, p. 9.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, *op. cit.*, p. 31.

4 *Ibid.*, p. 34

5 D. Wright, « Natural Solar/Microclimate/Solid-State Design », p. 14 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

6 R. L. Knowles, *Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth*, [1ère éd. 1974], Cambridge : The MIT Press, 1977, p. 20-46.

compacité, bien que certaines maisons datent parfois du X^e siècle¹. Selon Knowles, l'architecture des Indiens Pueblos « peut être étudiée avec profit par n'importe quelle société, aussi avancée soit-elle sur le plan technologique² » et peut servir de modèle à une planification urbaine optimisée du point de vue climatique et concentrée sur la conservation de l'énergie. Ses observations seront déterminantes dans l'émergence de son concept « d'enveloppe solaire³ » qu'il a développé afin de résoudre le problème du droit au soleil dans l'espace urbain, en garantissant une exposition solaire équitable à toutes les constructions⁴.

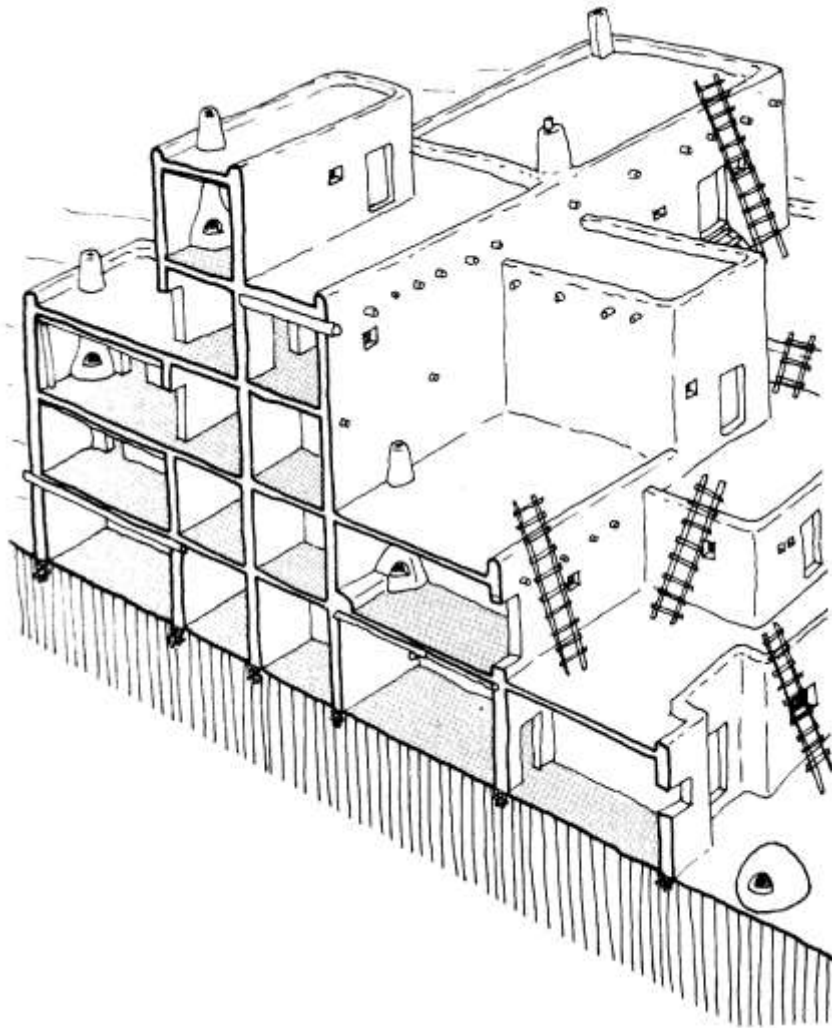


Figure 133 : *Empilement des cellules reliées par des échelles caractéristique des villages des Indiens Pueblos.*
(J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, p. 109)

1 *Ibid.*, p. 35.

2 *Ibid.*, p. 46. Traduction personnelle, citation originale : « can be studied with profit by any society however technologically advanced »

3 R. L. Knowles, « Solar Ethics – Urban Form », p. 843 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 *Ibid.*, p. 840-842 ; D. Siret, « Les enveloppes solaires de Ralph Knowles, ou les ambivalences d'un modèle de régulation des formes urbaines », *Lieux Communs - Les Cahiers du LAUA*, 2011, p. 195-206.



Figure 134 : *Village de Taos Pueblo, exemple de l'architecture des Indiens Pueblos.*
(P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, p. 33)

Les travaux de Knowles sur l'architecture des Indiens Pueblos ont inspiré les architectes français Georges et Jeanne-Marie Alexandroff qui ont réalisé une importante enquête historique entre 1974 et 1979 sur l'*Intégration des énergies naturelles à l'habitat* qui couvrait l'étude des constructions vernaculaires sur plusieurs continents¹. Les conclusions de leur étude publiée en 1982 rejoignent celles de Knowles et mettent en évidence « les enseignements des habitats vernaculaires² ». Après avoir passé en revue l'ensemble des constructions vernaculaires antérieures à la période moderne, ils affirment :

« On a pu constater, dans les réalisations vernaculaires, que le climat, ses énergies et les contraintes qu'il implique, étaient ressenties, combattues ou exploitées dans leur globalité ; c'est-à-dire, précisément, que les phénomènes éoliens et solaires étaient pris en compte

1 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Intégration des énergies naturelles à l'habitat*, op. cit. (Archives du L.A.B. – Toulouse) ; G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 7.

2 *Ibid.*, p. 133.

simultanément, tant au niveau du choix des matériaux que de la morphologie et de l'implantation¹. »

Georges et Jeanne-Marie Alexandroff observent que les constructions vernaculaires ont été conçues en étudiant simultanément les facteurs climatiques, notamment le « couplage vent-soleil² ». À la différence des démarches concentrées exclusivement sur la recherche du captage de l'énergie solaire, l'architecture vernaculaire montre selon eux que « la nature ne se divise pas³ » et qu'une conception véritablement bioclimatique doit prendre en compte simultanément l'ensemble des facteurs climatiques déterminants.

Ces références constantes aux constructions traditionnelles et vernaculaires n'étaient pas propres aux architectes et à certains ingénieurs. Le météorologue Christian Perrin de Birchambaut, qui a collaboré au premier inventaire des *Constructions solaires passives européennes*, affirme que les problèmes relatifs à la conception bioclimatique « avaient été raisonnablement traités par nos ancêtres non scientifiques sachant associer l'emploi des notions d'inertie et d'isolation à une bonne connaissance du climat local, incluant évidemment le rayonnement solaire⁴. » Selon lui, « toutes les constructions situées à la surface du globe⁵ » dont les ouvertures ne sont pas occultées de manière permanente « utilisent naturellement le chauffage solaire passif⁶ » et il estime qu'un inventaire véritablement exhaustif des constructions solaires passives devrait se référer « aux architectes des siècles antérieurs, ou même aux habitants des constructions anciennes⁷ ». Sans être architecte, Perrin de Birchambaut affirme qu'il existe une continuité directe entre les constructions vernaculaires et les maisons bioclimatiques et solaires passives réalisées durant les années 1970, dans la mesure où elles utilisent parfois les mêmes techniques solaires passives. Il rejoignait ainsi l'opinion de certains architectes pour qui « toute l'architecture vernaculaire ou préindustrielle est par essence passive⁸. »

Il existe une tendance à idéaliser l'architecture vernaculaire dans les écrits de certains architectes. Cette idéalisation consiste à exagérer l'adaptation climatique des constructions du

1 *Ibid.*, p. 134.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 J.-F. Robert, R. Camous, F. Schneider, « Note des auteurs », *Constructions solaires passives européennes*, *op. cit.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 S. Los, « Un certain passif », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Solaire : passif ou actif ? », *op. cit.*, p. 9.

passé et à considérer que toute construction traditionnelle est nécessairement climatiquement bien adaptée. L'architecte Stein affirme par exemple que « quasiment tous les bâtiments vernaculaires, ceux qui ont développé des caractéristiques régionales ou locales identifiables, étaient des bâtiments solaires¹ ». On peut également observer cette tendance chez Vaye et Nicolas, qui affirment en 1977 qu'il « n'existe pas d'architecture vernaculaire anti-climatique² » puisque « l'analyse montre au contraire que les différents éléments climatiques y sont toujours pris en considération³. » Cet énoncé montre une simplification caractéristique d'un raisonnement par généralisation : du constat qu'il existe des constructions vernaculaires confortables et particulièrement bien adaptées au climat, Vaye et Nicolas déduisent que toute construction vernaculaire est nécessairement climatiquement bien adaptée. Par contraste avec l'époque où toutes les constructions étaient vernaculaires, donc conçues avec le climat grâce à la « longue accumulation d'un savoir-faire transmis par la tradition orale⁴ », la période contemporaine est selon eux marquée par la disparition de cette tradition et par l'avènement d'une architecture « anti-écologique⁵ ».

Le propos de Vaye et Nicolas paraît presque caricatural tant il repose sur de nombreuses simplifications. En plus d'affirmer qu'il existe un déterminisme climatique strict, dans la mesure où toute construction vernaculaire serait nécessairement conçue à partir du climat, leur approche illustre une tendance à systématiquement valoriser les productions du passé au détriment des productions présentes. Ce type d'argumentation est typique d'une vision nostalgique de l'histoire, qui consiste à dévaluer les productions présentes en valorisant systématiquement les productions passées⁶. Dans ce cas, l'architecture vernaculaire renverrait à une époque disparue et largement fantasmée où toutes les constructions auraient été conçues à partir du climat selon la tradition⁷. La conception bioclimatique, qui est présentée comme susceptible de créer un « néo-vernaculaire⁸ » par Vaye et Nicolas, serait un moyen de s'inscrire

1 R. G. Stein, *Architecture and Energy: Conserving Energy Through Rational Design*, op. cit., p. 23.

Traduction personnelle, citation originale : « virtually all vernacular buildings –those that developed identifiable regional or local characteristics–were solar buildings »

2 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 F. Nietzsche, *Considérations inactuelles I et 2. Unzeitgemässe Betrachtungen*, Paris : Aubier, (coll. Bilingue des classiques étrangers), trad. de l'allemand par Geneviève Bianquis, 1964, p. 223-239.

7 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 301.

8 *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « À l'heure solaire », op. cit., n. p. (Archives personnelles de Frédéric Nicolas – Apt)

dans la continuité des constructeurs du passé qui concevaient nécessairement leurs bâtiments en fonction du climat.

Si ce type d'argumentation peut s'expliquer par un souci de légitimer la conception bioclimatique, l'idée selon laquelle il « n'existe pas d'architecture vernaculaire anti-climatique¹ » montre une tendance implicite à réécrire l'histoire de l'architecture, afin de montrer qu'il y aurait eu une disparition brutale de la prise en compte du climat durant l'épisode moderne. Il tend inévitablement à dévaluer les réalisations contemporaines². Bien qu'il puisse être justifié, ce point de vue sur l'histoire de l'architecture et cette valorisation systématique des constructions du passé peut être critiqué pour sa simplicité, d'autant plus qu'il existe des exemples de constructions vernaculaires anti-climatiques sur lesquels nous reviendrons. Pour Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, à qui l'on doit les travaux historiques les plus rigoureux sur le sujet en langue française, l'idée selon laquelle la relation au climat et plus généralement à la nature aurait « connu une éclipse culturelle totale de deux siècles³ » à partir de la naissance de l'industrialisation constitue une « illusion⁴ » voire une « imposture⁵ » historique. Dès lors, ce point de vue simpliste sur l'architecture vernaculaire doit être critiqué.

IV.2.1.3. Le problème du déterminisme climatique

Cette tendance à réécrire l'histoire de l'architecture, et à considérer toute construction vernaculaire comme parfaitement adaptée du point de vue climatique, pose le délicat problème du déterminisme climatique issu de la théorie des climats débattue depuis l'Antiquité grecque⁶. Ce problème a particulièrement occupé les géographes et les historiens dans la première moitié du XX^e siècle qui ont proposé d'y substituer une approche par les « possibilités⁷ » climatiques⁸. Poursuivant ces travaux, l'architecte et anthropologue Amos Rapoport (1929-) a donné en 1969 une définition du déterminisme climatique en architecture dans son ouvrage *House, Form &*

1 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », *op. cit.*, p. 28.

2 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 134.

3 *Ibid.*, p. 141.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 D. Lamarre, P. Pagney, *Climats et sociétés*, Paris : Armand Colin, (coll. U Géographie), 1999, p. 7-15.

7 L. Febvre, *La Terre et l'évolution humaine. Introduction géographique à l'histoire*, [1^{ère} éd. 1922], Paris : Albin Michel, (coll. L'Évolution de l'humanité), 1970, p. 200-201.

8 *Ibid.*, p. 11-42.

Culture, traduit en français en 1972 sous le titre *Pour une anthropologie de la maison*¹. Rapoport a lu les travaux d'Olgyay et critique dans cet ouvrage toutes les approches déterministes de l'architecture vernaculaire et traditionnelle à la lumière des travaux en géographie humaine, comme ceux de Pierre Deffontaines ou de Max Sorre². Selon lui, le déterminisme climatique soutient « la causalité du climat³ » et « affirme que la préoccupation première de l'homme primitif est de s'abriter, et que par conséquent les impératifs du climat déterminent la forme [des constructions qu'il réalise⁴] ». Cette approche postule d'une part un déterminisme physique strict⁵, selon lequel un type de climat produit nécessairement un type de construction défini, et d'autre part que toutes les caractéristiques d'une construction vernaculaire peuvent être expliquées par le climat qui est « une cause *unique*⁶ ». Selon Rapoport, le déterminisme climatique conduit donc à deux écueils. D'une part, il considère que le climat est un facteur majeur qui explique l'intégralité des caractéristiques d'une construction vernaculaire et justifie que d'autres facteurs importants d'ordre religieux ou culturel soient considérés comme mineurs ; d'autre part, il présuppose que chaque climat local ou régional détermine un seul et unique type de construction d'une manière univoque.

Selon ce point de vue, une grande partie des travaux que nous avons évoqués précédemment est déterministe et présente l'un de ces écueils. D'une manière générale, l'idée qu'il « n'existe pas d'architecture vernaculaire anti-climatique⁷ » est fermement combattue par Rapoport. Il affirme que des motivations religieuses, culturelles et sociales sont fréquemment à l'origine d'aménagements ou de constructions « anti-climatiques » et thermiquement inconfortables⁸. Il explique qu'on « trouve des solutions anti-climatiques dans de nombreuses parties du monde⁹ », comme dans les maisons chinoises importées en Malaisie et construites avec des matériaux massifs qui « ont peu de sens dans cette région chaude et humide¹⁰ » ou dans certaines constructions de l'ouest de l'Amazonie où « [rien] n'est prévu pour permettre à l'air de circuler, chose essentielle dans ce climat chaud et humide¹¹. » D'une manière générale,

1 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, op. cit.

2 *Ibid.*, p. 59.

3 *Ibid.*, p. 27.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 26.

6 *Ibid.*

7 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 28.

8 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, op. cit., p. 31.

9 *Ibid.*, p. 31.

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*, p. 30.

ces « solutions anti-climatiques » proviennent d'un phénomène d'emprunt ou de transposition d'un type de construction dans une autre culture, par exemple à partir de l'immigration d'une population¹. Parfois c'est l'importation de nouveaux matériaux dont les propriétés sont mal connues mais qui sont considérés comme un « symbole de prestige² », comme la tôle galvanisée, qui entraîne l'apparition de constructions thermiquement très inconfortables³. Ce phénomène est confirmé par des observations faites par Ayoub en Afrique du Nord sur les huttes et les cases dont la construction témoigne de « l'influence européenne⁴ ». Il remarque que l'introduction de maçonneries plus hautes et plus épaisses pour imiter l'architecture européenne expose les murs au rayonnement solaire et « supprime en partie les avantages de la hutte traditionnelle⁵ ».

Sans nier l'importance des facteurs climatiques, Rapoport cherche à relativiser l'idée que le climat ait été le facteur le plus important dans la conception et la construction des maisons traditionnelles. Selon lui, ce sont d'abord les facteurs socioculturels qui sont déterminants. Il considère que le climat n'est qu'un facteur secondaire ou « modifiant⁶ » qui impose néanmoins certaines contraintes au même titre que d'autres facteurs secondaires, d'ordre économique ou technique⁷. Rapoport soutient qu'une culture prescrit ce qui est possible et impossible, ce qui est acceptable et ce qui ne l'est pas, et qu'à ce titre les facteurs socioculturels priment sur tous les autres⁸. Cette hiérarchie explique que les « interdits religieux et tabous entraînent inconfort et complications, et prennent le pas sur les impératifs du climat⁹ » et Rapoport affirme que les « interdits religieux mènent quelquefois à des solutions non climatiques¹⁰ ». Il prend l'exemple des Chams au Cambodge « qui considèrent que l'ombre projetée sur les arbres est néfaste, si bien que les maisons et les rues sont exposées au soleil torride et qu'on ne plante jamais d'arbres¹¹. » Sans nécessairement être d'ordre religieux, ces facteurs socioculturels expliquent selon lui en grande partie le fait qu'on trouve des types de constructions très différents dans des climats analogues ou dans le même climat régional. Il affirme que « dans des régions riches en microclimats variés, les variantes de types de maison sont relativement moins nombreuses que

1 *Ibid.*, p. 31.

2 *Ibid.*, p. 34.

3 *Ibid.*, p. 32-34.

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 79.

5 *Ibid.*

6 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, *op. cit.*, p. 65.

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*, p. 29.

10 *Ibid.*, p. 32.

11 *Ibid.*

dans des régions de climat similaire, comme en Océanie¹ », région où il affirme par ailleurs que « du point de vue du seul climat, le besoin d'abri est minime² ». Cette apparente incohérence avait également été remarquée par Jeanne-Marie Alexandroff qui a prolongé les travaux de Rapoport. Elle affirme que dans l'habitat vernaculaire du pourtour méditerranéen « on rencontrera des types extrêmement contradictoires sur un espace géographique relativement restreint et climatiquement homogène³. »

Cependant, certains travaux que nous avons évoqués précédemment ne sont pas déterministes selon la définition donnée par Rapoport. Il faudrait distinguer deux déterminismes pour différencier les travaux qui s'appliquent à réécrire l'histoire de l'architecture selon un déterminisme climatique particulièrement strict, et qui tombent sous le coup de la critique de Rapoport, et ceux qui s'appuyaient sur l'intuition selon laquelle seuls certains éléments et choix techniques qu'on trouve dans les constructions vernaculaires sont climatiquement déterminés. Cette seconde catégorie de travaux est fondée sur l'étude de la fonction climatique des choix techniques et des éléments architecturaux qu'on trouve dans l'architecture vernaculaire. Bien que de nombreux acteurs de la conception bioclimatique aient suivi cette première tendance comme nous l'avons vu précédemment, les travaux les plus approfondis sur l'architecture vernaculaire s'inscrivaient dans la seconde approche, caractérisée par la recherche de la fonction climatique des éléments et par l'analyse des choix techniques effectués par les constructeurs du passé. Parmi les travaux mentionnés précédemment, ceux de Knowles et dans une moindre mesure de Georges et Jeanne-Marie Alexandroff correspondent à cette approche.

Cette seconde catégorie de travaux postulait un déterminisme d'une autre nature que celui que nous avons déjà évoqué : plutôt que de considérer que l'architecture vernaculaire était le résultat d'un déterminisme climatique strict, ils partaient du principe qu'en étudiant l'architecture vernaculaire comme si celle-ci était déterminée climatiquement, il serait possible de découvrir dans ces constructions des éléments ou des choix techniques signifiants du point de vue du contrôle climatique. Le déterminisme climatique sur lequel reposent ces travaux serait essentiellement heuristique, puisqu'il consiste à orienter l'attention de l'observateur sur ce qui peut être climatiquement déterminé dans une construction vernaculaire, sans pour autant présupposer que toute construction est nécessairement climatiquement déterminée. Par rapport

1 *Ibid.*, p. 28. Rapoport emploie le terme de « microclimat » alors que l'expression de « climat local » serait plus justifiée dans ce contexte.

2 *Ibid.*, p. 29.

3 J.-M. Alexandroff, « Habitat vernaculaire et milieu climatique », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 25.

au déterminisme climatique évoqué précédemment, qui était tourné vers le passé et la réécriture de l'histoire de l'architecture, ce déterminisme de nature heuristique a pour but de légitimer les caractéristiques des constructions vernaculaires pour le présent, par l'étude des choix techniques qu'elles concrétisent et de la qualité du contrôle climatique qu'elles réalisent¹. Il reposait sur l'hypothèse que certains des éléments et des choix techniques qu'on trouvait dans ces constructions répondaient d'une fonction climatique.

IV.2.2. L'hypothèse de la fonction climatique et l'analyse des constructions vernaculaires

IV.2.2.1. L'hypothèse de la fonction climatique

L'étude des constructions vernaculaires par les fonctions climatiques repose sur l'hypothèse qu'il existe dans chaque construction vernaculaire un certain nombre d'éléments, de sous-ensembles d'éléments et de choix techniques qui ont essentiellement une fonction climatique ou thermique bien déterminée, et qui peuvent être étudiés relativement indépendamment des autres facteurs déterminants (culturels, économiques...). Ces éléments ont généralement un rôle critique dans le contrôle climatique de la construction : ils sont placés à des points-clés et participent grandement au confort thermique intérieur. Suivant cette approche, une construction vernaculaire peut être analysée comme une construction solaire passive, par la décomposition des techniques qu'on y trouve. L'étude de la fonction climatique ne présuppose pas que toute construction ancienne a nécessairement été conçue à partir du climat, mais qu'il existe toujours des éléments techniques qui ont pu être intuitivement conçus selon une fonction climatique anticipée qui peut être rapportée au climat local. En ce sens, elle rejoint les approches de certains géographes comme Deffontaines, qui affirme que l'homme « cherche à obtenir dans sa maison un microclimat humain le plus régulier possible² », mais aussi celle de Rapoport qui propose de « considérer les bâtiments comme des moyens de contrôle thermique³ » afin d'étudier provisoirement leur dimension climatique.

L'étude de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques a pu exister par le passé, mais elle apparaît nettement dans les travaux d'Ayoub qui évoque pour la première fois

1 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 133-137.

2 P. Deffontaines, *L'Homme et sa maison*, op. cit., p. 121.

3 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, op. cit., p. 117.

cette notion en 1960. Il l'utilise à propos de la maison japonaise traditionnelle, qui regroupe selon lui l'ensemble des fonctions climatiques suivantes : « contrôle solaire des vitrages, ventilation sous plafond, protection solaire et ventilation des toits, fonction thermique du verre, légèreté des structures¹ ». Il affirme que « ces éléments se retrouvent dans la maison moderne² » et que l'architecture japonaise moderne a réussi à conserver ces fonctions climatiques déjà présentes dans l'architecture traditionnelle malgré l'évolution des techniques de construction. Selon la terminologie de Leroi-Gourhan que nous avons déjà empruntée, Ayoub montre que l'architecture traditionnelle japonaise est constituée par un ensemble de « faits techniques³ » d'un degré assez élevé qui ont été continuellement repris et empruntés avec l'évolution des techniques de construction et ont conservé leur spécificité. La brève analyse d'Ayoub est caractéristique de l'approche par les fonctions climatiques : elle consiste à isoler des éléments ou des dispositifs techniques de l'ensemble d'une construction pour montrer qu'ils sont, dans leur principe, intégralement transposables dans une construction moderne pour en assurer le contrôle climatique et y maintenir une ambiance intérieure confortable.

Ce type d'approche se retrouve dans de nombreuses publications relatives à la conception bioclimatique ou aux techniques solaires passives. L'étude des villages Pueblos par Knowles consiste précisément à analyser simultanément les propriétés de captage et de protection solaire des différentes surfaces de ces villages, qui constitue une fonction climatique identifiée. Pour ce faire, Knowles a choisi de mesurer l'aire de ces surfaces exposées au rayonnement direct à différentes heures et pour différentes saisons⁴. Son protocole a consisté à reproduire chacun des villages Pueblos en maquette afin d'en étudier l'exposition au rayonnement solaire dans un héliodon, un appareil conçu pour simuler la course de soleil grâce à une lampe montée sur un rail⁵ (*figure 135*). Mais au lieu d'utiliser une lampe pour modéliser le soleil, Knowles a choisi d'y placer un appareil photo qui permettait de photographier les surfaces des constructions effectivement « vues » du point de vue du soleil, à différentes heures et à différents moments de l'année⁶. L'aire totale des faces de la maquette photographiée lui permettait de déduire l'aire totale des surfaces effectivement exposées au rayonnement solaire

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 83.

2 *Ibid.*

3 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. L'Homme et la matière*, *op. cit.*, p. 33-34.

4 R. L. Knowles, *Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth*, *op. cit.*, p. 24.

5 L'héliodon a été amélioré par Victor et Aladár Olgyay qui ont mis au point le « Thermohéliodon ». Voir : V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 180-185.

6 R. L. Knowles, *Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth*, *op. cit.*, p. 24.

direct du village pour chaque période de l'année. À partir de ces photographies, son étude a consisté à déterminer le coefficient de transmission de l'énergie solaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement et a mis en évidence que les constructions Pueblos étaient à la fois adaptées au captage solaire en hiver tout en étant protégées en été¹. La méthode de Knowles a consisté à isoler certains éléments des constructions Pueblos et à étudier leur fonction climatique à l'aide d'outils mis au point pour la conception bioclimatique (héliodon, diagramme solaire, mesure de l'angle d'incidence...).

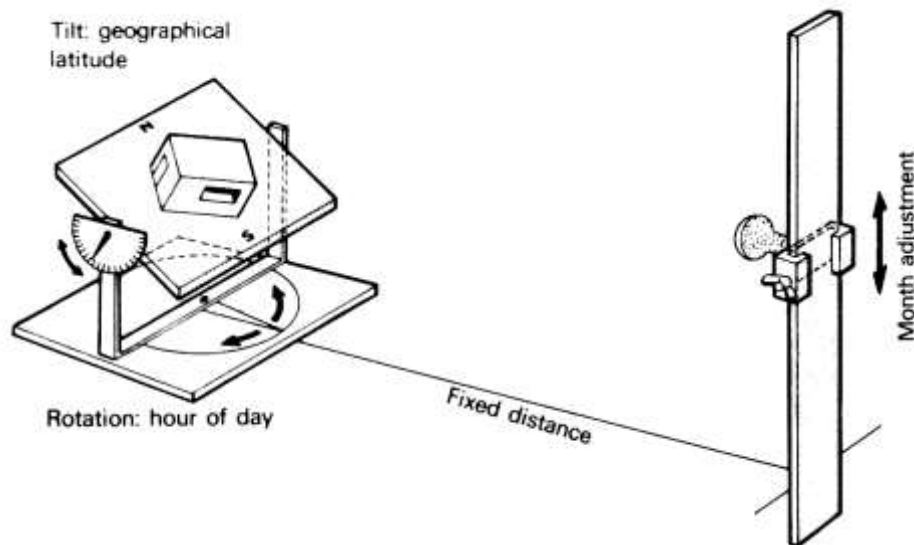


Figure 135 : Exemple d'héliodon utilisé par R. Knowles pour l'étude de l'architecture Pueblo.
(O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, Londres : Longman, 1974, p. 269)

Sans utiliser nécessairement un protocole aussi rigoureux, les différents travaux détaillés sur les constructions vernaculaires réalisées par des architectes associés à la conception bioclimatique suivent une méthode souvent analogue. Plus généralement, l'attention de ces architectes se portait généralement sur les éléments de l'architecture vernaculaire susceptibles d'être empruntés et repris dans de futures constructions, comme nous le verrons par la suite. L'étude de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques des éléments se retrouve également dans les travaux d'architectes ayant particulièrement influencé les acteurs de la conception bioclimatique : c'est le cas d'Hassan Fathy, qui a contribué à promouvoir à travers

1 *Ibid.*, p. 30-31.

le monde l'intérêt économique et thermique des constructions en brique de terre crue à partir de son expérience en Égypte¹. Dans son ouvrage *Construire avec le peuple* il montre que les performances thermiques des maisons traditionnelles en terre crue dépassent largement celles des maisons modernes en béton dans le climat chaud et sec de la Haute-Égypte². Son approche consiste à décomposer les éléments de l'architecture traditionnelle égyptienne selon leurs fonctions climatiques. Il évoque par exemple le fait que la fenêtre assure en Europe trois fonctions qui sont « laisser entrer l'air, laisser entrer la lumière, et permettre de voir au-dehors³ », alors qu'en Égypte ces fonctions sont dissociées et réparties entre plusieurs ouvertures différemment dimensionnées à cause de la puissance du rayonnement solaire direct et réfléchi. Par ce geste, il explicite une fonction climatique implicite⁴, et intègre la fenêtre, qui est dans son principe un élément architectural immémorial, comme un élément ayant une ou plusieurs fonctions climatiques déterminées qui sont différenciées pour chaque climat. Dans la continuité de Fathy, l'architecte André Ravéreau a également repris cette approche dans son étude sur l'architecture traditionnelle de la région du M'Zab en Algérie. Sa méthode consiste à décomposer l'architecture mozabite en différents éléments ou sous-ensembles (arc, escalier, pinacle...) pour montrer qu'il existe une « *raison* des formes dans les anciennes époques stables⁵ » qui s'explique souvent par le climat⁶. L'étude de ces éléments par leurs fonctions climatiques est clairement perceptible dans l'approche de Ravéreau, qui conseille aux architectes de « [s'armer] sur les conditions climatiques⁷ », à la fois pour comprendre les constructions vernaculaires et pour construire « sans vouloir accomplir des gestes techniques qui dépassent la stricte nécessité⁸. »

On pourrait considérer que cette approche de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques maintient un déterminisme climatique au sens de Rapoport, puisqu'un choix technique pourrait être exclusivement expliqué par « la causalité du climat⁹ » ce qui

1 Centre de Création Industrielle/Centre Georges Pompidou, *Des Architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire*, op. cit., p. 156-157.

2 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Égypte : Gournah*, op. cit., p. 90-91.

3 *Ibid.*, p. 95.

4 Hassan Fathy a thématiqué cette notion « d'implicite » en architecture. Voir H. Fathy, « De l'implicite en architecture », in : A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Paris : Sindbad, (coll. Hommes et sociétés), 1981, p. 11-19.

5 A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Paris : Sindbad, (coll. Hommes et sociétés), 1981, p. 277.

6 *Ibid.*, p. 178.

7 *Ibid.*, p. 278.

8 *Ibid.*

9 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, op. cit., p. 27.

maintiendrait l'idée que le climat serait la « force¹ » principale qui déterminerait la forme d'un élément. Si elle est déterministe en ce sens, l'étude de la fonction climatique ne reconduit pas le déterminisme climatique général et imprécis critiqué par Rapoport, qui affirmerait que l'ensemble d'une construction vernaculaire serait climatiquement déterminée dans ses moindres détails : à l'inverse, elle postule qu'une construction est décomposable en sous-ensembles ou en éléments qui peuvent être étudiés indépendamment du point de vue de leur fonction climatique, selon un mouvement qui va des détails à l'ensemble. Selon ce point de vue, affirmer qu'une construction est soit parfaitement adaptée à un climat local soit intégralement inadaptée revient à répondre à un problème mal posé et typique d'un déterminisme climatique trop général. Plutôt que de postuler un déterminisme général et strict, l'approche par les fonctions climatiques fait l'hypothèse d'un déterminisme localisé au niveau des éléments et des choix techniques élémentaires.

Certains épistémologues ont nettement distingué ces deux formes de déterminisme. Pour Bachelard, il existe d'une part un « déterminisme *universel*² » ou « absolu³ », qui postule que « *[n'importe] quoi mis n'importe où, n'importe quand porte partout* l'effet de son existence⁴ », et un « déterminisme limité⁵ » ou « linéaire⁶ » qui repose sur le principe « que toutes les preuves de déterminisme vont d'un phénomène formé à un phénomène formé⁷ ». Le déterminisme climatique critiqué par Rapoport est bien un déterminisme universel, puisqu'il postule que le climat a influencé partout et tout le temps la forme de l'habitat vernaculaire, suivant des considérations très générales sur le fait qu'il « n'existe pas d'architecture vernaculaire anti-climatique⁸ » et indépendamment des preuves qui réfuteraient cette thèse. À l'inverse, l'étude de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques constitue un déterminisme limité et conditionné par la possibilité de fournir les preuves de l'efficacité de cette fonction pour le maintien du confort thermique. Pour Bachelard, cette seconde forme de déterminisme caractérise une compréhension technique des relations causales, qui permet d'isoler l'action d'une opération sur un phénomène⁹. Du point de vue technique qu'il défend

1 *Ibid.*, p. 25.

2 G. Bachelard, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, *op. cit.*, p. 211.

3 *Ibid.*, p. 214.

4 *Ibid.*, p. 212.

5 *Ibid.*, p. 217.

6 *Ibid.*, p. 215-217.

7 *Ibid.*, p. 216.

8 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », *op. cit.*, p. 28.

9 G. Bachelard, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, *op. cit.*, p. 218.

« tout déterminisme est partiel, particulier, régional¹ », dans la mesure où il « est saisi à un point de vue spécial, dans un ordre de grandeur désigné, dans des limites explicitement ou tacitement fixées². »

IV.2.2.2. Une compréhension renouvelée des constructions vernaculaires et de leurs performances

Ce « déterminisme limité » est caractéristique d'une compréhension technique des constructions vernaculaires, tournée vers la recherche des effets induits par chacun des éléments en vue du contrôle climatique. L'étude de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques s'appuie sur les progrès réalisés dans la compréhension des phénomènes thermiques. On peut prendre pour exemple la notion d'inertie thermique des constructions massives en terre crue. Cette propriété était déjà intuitivement connue de l'architecte François Cointeraux au XVIII^e siècle, qui écrit en 1790 que les constructions rurales en terre crue garantissent « les laboureurs du froid et des excessives chaleurs³ », tandis qu'il constatait l'inconfort des maisons bourgeoises de l'époque où « on y grille dans les brûlantes chaleurs de l'été, et on y gèle au moindre froid⁴ ». Mais l'inertie thermique n'a été comprise qu'à partir des travaux en physique de Joseph Black sur la chaleur spécifique au XVIII^e siècle⁵ et ceux de Fourier au XIX^e siècle, mais aussi grâce à l'effort de vulgarisation et d'application de ces recherches entrepris par exemple par Yellott et Frank Kreith aux États-Unis⁶, ainsi que par Charles Fabry⁷ ou par Camia en France au XX^e siècle. La schématisation des « chemins thermiques⁸ » ou du « cheminement des flux thermiques⁹ » à l'intérieur d'une construction découle de ces travaux et permet une compréhension clarifiée de l'inertie thermique, qui est

1 *Ibid.*, p. 217.

2 *Ibid.*

3 F. Cointeraux, *École d'architecture rurale, ou Leçons par lesquelles on apprendra soi-même à bâtir solidement les maisons de plusieurs étages avec la terre seule, ou autres matériaux les plus communs et du plus vil prix*, Paris : auto-édition, mars 1790, p. 33-34.

4 F. Cointeraux, *Traité sur la construction des manufactures, et des maisons de campagne : ouvrage utile aux fabricants, & à tous ceux qui veulent élever des fabriques ou manufactures, ainsi qu'aux propriétaires, fermiers, hommes d'affaires, architectes, & entrepreneurs*, Paris : auto-édition, août 1791, p. 117.

5 G. Bachelard, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, *op. cit.*, p. 25-26.

6 F. Kreith, *Transmission de la chaleur et thermodynamique*, *op. cit.*

7 C. Fabry, *Propagation de la chaleur*, [1^{ère} éd. 1942], Paris : Armand Colin, (coll. Armand Colin), 1961, 221 p.

8 J.-L. Izard, A. Guyot, *Archi bio*, *op. cit.*, p. 18.

9 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 84.

elle-même déterminante pour la compréhension du confort thermique à l'intérieur des constructions vernaculaires en terre crue.

L'étude de l'architecture vernaculaire mobilise cette connaissance progressivement affinée et vulgarisée des phénomènes thermiques. C'est pourquoi Ayoub peut écrire que les « traditions locales millénaires [...] fournissent souvent des enseignements utiles susceptibles d'être scientifiquement expliqués¹. » Sur la base de ces explications « scientifiques », il affirme même que certaines techniques traditionnelles « n'ont jamais pu être dépassées du point de vue du confort thermique par nos techniques modernes, sinon dans le fini de l'ouvrage² ». Il prend l'exemple de la hutte traditionnelle des zones tropicales humides africaines, dont l'analyse montre qu'elle est « thermiquement parfaite à tous égards³ » (*figure 136*). Cela tient essentiellement à sa toiture qui assure la fonction climatique de protection solaire et de ventilation. Elle est formée « d'une épaisse couche de paille⁴ » de plus de 20 cm qui déborde largement vers le bas, et dont la perméabilité permet la ventilation tout en assurant « une protection thermique quasiment parfaite comme autant de résistances superficielles successives⁵ ».

L'approche d'Ayoub est caractéristique de cette compréhension renouvelée de l'architecture vernaculaire : la paille n'est pas seulement présentée comme un matériau traditionnel, mais avant tout comme un matériau isolant performant formé de « résistances superficielles successives ». Cette terminologie parle aux ingénieurs qui identifient immédiatement le rôle des résistances superficielles pour l'isolation thermique. De la même manière que la paille est étudiée comme un matériau isolant conventionnel, la conductivité et la capacité thermique massique de matériaux traditionnels comme la terre ou la pierre sont mentionnés dans certains manuels, au même titre que des matériaux plus modernes comme l'aluminium ou le béton⁶. Ainsi, pour une même inertie thermique recherchée, la terre crue apparaît comme une alternative plus économique que le béton⁷. En plus d'être un matériau thermiquement peu conducteur comme l'avait déjà remarqué Fathy⁸, elle était aussi valorisée

1 *Ibid.*, p. 78.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*, p. 79.

4 *Ibid.*, p. 78.

5 *Ibid.*

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 268-269.

7 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 3-4.

8 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Egypte : Gourni*, op. cit., p. 90-91.

pour son faible impact environnemental par de nombreux architectes, comme David Wright¹. Mis à part leur matériau, la forme en dôme ou voûtée de certaines constructions traditionnelles en terre crue était considérée comme particulièrement bien adaptée à leur refroidissement nocturne et propice au rafraîchissement². Par exemple, la morphologie des cases des Mousgoum au Cameroun a été comparée à celle d'un moteur à explosion hérissé d'ailettes de refroidissement par Stein³ (*figure 137*). Il affirme que les motifs en relief à la surface de ces constructions « fournissent une surface de transfert de chaleur supplémentaire pour accélérer le refroidissement la nuit, semblable aux ailettes métalliques que l'on trouve sur le haut d'un petit moteur à essence⁴. »



Figure 136 : *Hutte traditionnelle des zones tropicales humides africaines dont le confort thermique est vanté par R. Ayoub.*

(R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *Techniques & Architecture*, 20^{ème} série, n°2, février 1960, p. 78)

-
- 1 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 41 ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.
 - 2 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 7.
 - 3 R. G. Stein, *Architecture and Energy: Conserving Energy Through Rational Design*, op. cit., p. 33.
 - 4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « provide additional heat-transfer surface to speed the cooling at night, similar to the metal fins we find on the head of a small gasoline motor. »



Figure 137 : Mise en correspondance des cases des Mousgoum au Cameroun avec un moteur à explosion hérissé d'ailettes de refroidissement par R. Stein. (R. G. Stein, *Architecture and Energy: Conserving Energy Through Rational Design*, [1ère éd. 1977], New York : Anchor Books, 1978, p. 33)

L'influence des concepts et des notions issues du champ de la thermique est encore plus nette en ce qui concerne l'analyse de la fonction climatique des surfaces extérieures des constructions traditionnelles et vernaculaires. Nous avons évoqué précédemment la distinction entre les « matériaux sélectifs froids », comme la chaux, et les « matériaux sélectifs chauds » popularisée par Yellott en 1966¹. Le lait de chaux est utilisé comme enduit dans beaucoup de constructions traditionnelles situées dans les climats chauds et secs (bassin méditerranéen...). Le choix de la chaux apparaît optimal et particulièrement bien adapté à ce type de climat, puisqu'elle fonctionne comme une surface sélective froide qui possède un albédo et une

1 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *op. cit.*

émissivité élevée, au même titre que d'autres matériaux plus modernes comme les plastiques clairs¹. Ses qualités sont reconnues par les ingénieurs qui ont compris que la chaux était plus qu'une matière claire et réfléchissante : en tant que surface sélective froide avec une émissivité élevée, elle possède la capacité de se refroidir plus rapidement que d'autres matériaux plus réfléchissants, comme l'aluminium poli².

Daniels affirme même à la suite de Tabor que le toit des constructions traditionnelles enduites à la chaux en Israël constitue une surface dont la sélectivité est variable à mesure qu'elle s'altère³. Lorsque le toit est repeint au printemps, l'albédo et l'émissivité de la chaux fraîche sont maximums et limitent l'élévation de température en été. En automne, les pluies lavent la chaux et assombrissent l'enduit extérieur du toit, qui devient alors une surface de captage de l'énergie solaire à l'absorptivité élevée en hiver⁴. Suivant ce point de vue, ce cycle de restauration et d'altération de l'enduit à la chaux permet à la toiture de ces constructions traditionnelles de se comporter successivement comme une surface sélective froide en été et un corps noir en hiver. Ce cycle est corrélé à l'alternance des besoins de rafraîchissement et de chauffage dans ce climat. Il constitue un exemple très net d'une fonction climatique particulièrement complexe à concrétiser, puisque dans ce cas la chaux agit comme une surface dotée d'une sélectivité thermique variable. C'est à partir de ses recherches sur les surfaces sélectives que Tabor a pu comprendre l'intérêt des phénomènes de sélectivité thermique existants dans l'architecture traditionnelle israélienne⁵.

IV.2.2.3. Fonction climatique contre fonction culturelle : le cas du mur d'acrotère

Cependant, l'étude de l'architecture vernaculaire par la fonction climatique s'est parfois heurtée à une limite importante : la fonction d'un élément ou d'un choix technique dans une construction peut apparaître à l'analyse comme climatiquement absurde ou anti-climatique. Un cas intéressant concerne la fonction du mur d'acrotère et des parapets dans les constructions traditionnelles des climats chauds et secs, particulièrement en Afrique du Nord (Algérie, Libye...). Construits dans le plan des murs porteurs, les murs d'acrotère s'élèvent généralement

1 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 148, 246.

2 *Ibid.*, p. 131.

3 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, op. cit., p. 164.

4 *Ibid.* Voir également : J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », op. cit., p. 46.

5 F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, op. cit., p. 164.

à environ 1,50 m au-dessus du sol des toitures-terrasses et sont parfois percés de petites ouvertures¹ (figure 138). Outre leur rôle évident de garde-corps, la fonction des murs d'acrotères est essentiellement culturelle selon Ravéreau et consiste à préserver l'intimité des toitures-terrasses². Bien que leur hauteur soit « insuffisante pour opposer un obstacle réel aux regards sur la terrasse voisine³ », elle est en revanche « suffisante pour avertir l'homme qu'il ne doit pas insister, se pencher, regarder⁴. » Ravéreau a observé qu'au « M'Zab, tout abri construit est équipé et doublé de sa terrasse accessible, habitable, qu'il s'agisse de la mosquée ou de la maison⁵ » et que « c'est la terrasse superposée au rez-de-chaussée qui sert le soir et la nuit⁶. » L'occupation nocturne des terrasses s'explique par l'effet du déphasage thermique dans les constructions lourdes, qui tend à générer un inconfort thermique important à l'intérieur des habitations dès le début de soirée. La toiture-terrasse constitue alors un espace de repos privilégié durant les nuits particulièrement chaudes⁷. Pour Ravéreau, le mur d'acrotère est « d'une grande importance pour la qualité du lieu protégé, lieu privilégié des heures calmes, des soirées et des nuits estivales – où la température est douce alors que les pièces couvertes sont encore très chaudes –, lieu aussi d'une vie diurne ensoleillée l'hiver⁸. »

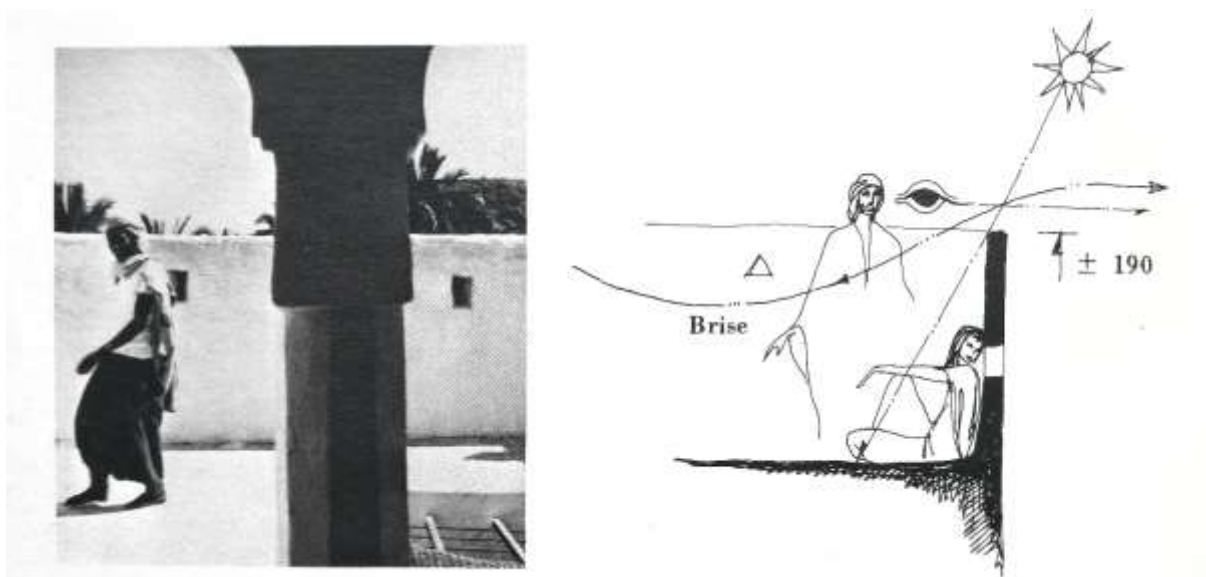


Figure 138 : Photographie et coupe d'un mur d'acrotère de la région du M'Zab en Algérie.
(A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Paris : Sindbad, (coll. Hommes et sociétés), 1981, p. 66)

1 A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, op. cit., p. 62.

2 *Ibid.*, p. 61.

3 *Ibid.*, p. 62.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*, p. 249.

6 *Ibid.*

7 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, op. cit., p. 256-257.

8 A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, op. cit., p. 61.

Bien que Ravéreau affirme que « le soleil et l'air peuvent passer¹ », pour de nombreux ingénieurs le mur d'acrotère constitue en réalité un brise-vent, qui a pour effet de bloquer le refroidissement de la toiture-terrasse par convection le long de sa surface extérieure. C'est le point de vue de Dreyfus, qui soutient que le mur d'acrotère entraîne une augmentation sensible de la température de la toiture horizontale qui est alors soustraite aux effets de la convection. Selon lui, s'il « est fréquent d'entourer les toitures-terrasses par des murs d'acrotère² », il affirme qu'on « peut penser, bien que l'on ne dispose d'aucune donnée précise à ce sujet, qu'il y a là une erreur si l'on se place au point de vue de la protection contre le rayonnement solaire³. » Ce point de vue est également partagé par Ayoub, qui recommande quant à lui d'utiliser des parapets largement ajourés afin de ne pas entraver le refroidissement par convection sous l'action du vent⁴. Le point de vue de Givoni est plus nuancé, quoiqu'il ne contredise pas ceux de Dreyfus et Ayoub. Il affirme que le parapet permet d'isoler une mince couche d'air susceptible d'être refroidie en dessous de la température de l'air ambiant par contact avec la toiture-terrasse, qui est elle-même facilement refroidie par rayonnement de grande longueur d'onde si la nébulosité est faible⁵.

Les points de vue de Dreyfus, d'Ayoub et de Givoni s'accordent sur le fait qu'un mur d'acrotère constitue un brise-vent. Cet exemple montre une tension intéressante à relever puisque des fonctions climatiques et culturelles s'opposent directement. L'occupation nocturne des toitures-terrasses illustre le phénomène de « nomadisme interne⁶ ». Ce nomadisme de type journalier peut s'expliquer du point de vue climatique par le déphasage thermique des constructions lourdes, qui est à l'origine d'un inconfort thermique important à l'intérieur de celle-ci en début de soirée et durant une partie de la nuit⁷. Mais paradoxalement, l'occupation temporaire des toitures-terrasses qui peut être climatiquement expliquée génère un besoin d'intimité qui prime la recherche d'un refroidissement maximal de la toiture : il aboutit au mur d'acrotère qui est un choix technique définitif qui peut être présenté comme anti-climatique,

1 *Ibid.*, p. 62.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 135.

3 *Ibid.*

4 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 94.

5 B. Givoni, *L'Homme, l'architecture et le climat*, *op. cit.*, p. 357.

6 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 39, 56.

7 O. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew, S. V. Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design*, *op. cit.*, p. 102.

mais qui en réalité trouve son origine dans le problème d'inconfort thermique des constructions lourdes.

IV.2.2.4. Fonction climatique et actualité de l'architecture vernaculaire

Comme nous l'avons vu précédemment et comme on le voit à propos des discussions relatives à la fonction du mur d'acrotère, l'analyse de l'architecture vernaculaire par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique a mobilisé de nombreux concepts issus de la thermique et des sciences de l'ingénieur. Malgré ses limites, cette approche renouvelée de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques et à la lumière de la connaissance des phénomènes thermiques permettait souvent de justifier de la pertinence des choix techniques qu'on trouve dans certaines constructions, indépendamment de leur ancienneté. Fathy affirme même en 1986 :

« L'analyse physique et aérodynamique a montré que de nombreux concepts incorporés dans la conception des maisons du passé restent aussi valables aujourd'hui qu'ils l'étaient hier et que, jugée selon les mêmes normes, une grande partie de ce qu'on appelle moderne est en fait anachronique¹. »

Selon lui, les méthodes et les concepts scientifiques permettent de relire l'architecture vernaculaire et d'en défendre l'actualité. C'est pourquoi il affirme que l'étude des constructions vernaculaires devrait mobiliser « les sciences physiques et humaines, y compris les domaines de la technologie des matériaux, de la physique, de l'aérodynamique, de la thermodynamique, de la météorologie et de la physiologie². » Cette approche, comme celles d'Ayoub ou de Knowles, n'oppose pas l'architecture vernaculaire à l'architecture moderne ou internationale, mais cherche à déterminer les choix techniques les mieux justifiés du point de vue climatique, indépendamment de l'époque à laquelle ils renvoient. Fathy affirme que chaque élément ou choix technique doit être examiné isolément et que « [toutes] les solutions traditionnelles

1 H. Fathy, *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, Chicago/Londres : University of Chicago Press, 1986, p. XXII. Traduction personnelle, citation originale : « Physical and aerodynamic analysis has shown that many of the concepts embodied in the design of houses of the past remain as valid today as they were yesterday and that, judged by the same standards, much of what is called modern is in fact anachronistic. »

2 *Ibid.*, p. 37. Traduction personnelle, citation originale : « the physical and human sciences, including the fields of materials technology, physics, aerodynamics, thermodynamics, meteorology, and physiology. »

doivent être évaluées scientifiquement avant qu'elles ne soient rejetées ou que des substituts soient proposés¹. »

Cette capacité à affirmer et parfois à prouver l'actualité des constructions anciennes contredit les quelques analyses qui ont pu être faites de la conception bioclimatique. Dans son essai sur l'approche énergétique en architecture, l'historien de l'architecture espagnol Luis Fernández-Galiano évoque la conception bioclimatique à partir des constructions de Frank Lloyd Wright et présente cette démarche comme essentiellement « ahistorique² » et indifférente aux constructions anciennes. Selon lui, la conception bioclimatique ne prendrait en compte que la consommation énergétique de fonctionnement des bâtiments, sans inclure l'ensemble de leurs cycles de vie. Pour Fernández-Galiano, il existe une nette différence entre la conception bioclimatique ou solaire passive qui serait attentive à la consommation d'énergie des bâtiments sans y inclure l'énergie grise, et ce qu'il nomme « l'architecture de réhabilitation³ » qui « est tout aussi attentive à la dissipation d'énergie qu'à la dégradation de la matière et de l'information⁴ ». La conception bioclimatique encouragerait indirectement la construction de bâtiments neufs en oubliant l'énergie grise déjà consommée dans toutes les constructions anciennes. Dès lors, seule une « architecture de réhabilitation⁵ » favoriserait la conservation et la rénovation des bâtiments anciens, afin de limiter la consommation d'énergie induite par les phases de construction et de démolition qui serait négligée par la conception bioclimatique⁶.

Mais la critique de Fernández-Galiano présuppose que la conception bioclimatique ne servirait qu'à concevoir des constructions neuves selon une approche essentiellement « ahistorique » et indifférente aux constructions déjà existantes. En plus de négliger les nombreuses rénovations qui ont été réalisées par des architectes ou des ingénieurs associés à la conception bioclimatique dès les années 1950, sa critique oublie que cette méthode de conception est plus généralement une approche bioclimatique de l'architecture, sensible aux qualités des constructions vernaculaires. On peut même renverser sa critique et affirmer que la conception bioclimatique est d'abord une « architecture de réhabilitation », dans la mesure où l'approche bioclimatique des constructions anciennes par le biais de la fonction climatique des

1 *Ibid.*, p. 9. Traduction personnelle, citation originale : « All traditional solutions should be evaluated scientifically before they are discarded or substitutes proposed. »

2 L. Fernández-Galiano *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, *op. cit.*, p. 125.

3 *Ibid.*, p. 124. Traduction personnelle, citation originale : « rehabilitative architecture ».

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « that is as attentive to the dissipation of energy as it is to the degradation of matter and information ».

5 *Ibid.*, p. 124.

6 *Ibid.*, p. 124-125.

éléments permettait de réhabiliter théoriquement les choix techniques effectués dans les constructions du passé. Loin d'être « ahistorique », la conception bioclimatique aurait à l'inverse permis de légitimer des choix techniques considérés comme passés, traditionnels ou anciens, en montrant qu'ils étaient justifiés du point de vue de leur fonction climatique et qu'ils pouvaient légitimement être réemployés ou réactualisés.

Comme nous l'avons vu, certains architectes ou ingénieurs ont même mis en évidence la supériorité de certaines constructions traditionnelles par rapport aux constructions contemporaines en matière de contrôle climatique et de confort thermique intérieur¹. Ayoub affirme en 1977 que « dans des pays tropicaux tels que la Syrie ou l'Irak des températures intérieures de confort ou au moins supportables sont atteintes en été dans des bâtiments traditionnels sans air conditionné et que des Européens du Nord choisissent de tels bâtiments pour y vivre et travailler². » Fathy faisait le même constat en Égypte³, tandis qu'à la même époque l'ingénieur Roubinet spécialisé dans la climatisation constatait la meilleure « protection thermique⁴ » des constructions traditionnelles en France, moins largement vitrées que les bâtiments modernes. Ces ingénieurs ont montré que certaines constructions anciennes étaient en ce sens plus contemporaines et plus performantes que les constructions les plus récentes selon ces critères thermiques.

On peut encore radicaliser ce point de vue et affirmer que l'étude des constructions vernaculaires par les fonctions climatiques permettait d'abolir provisoirement la distinction entre passé et présent. Dans la mesure où l'analyse d'un élément ou d'un choix technique montre qu'il assure une ou plusieurs fonctions climatiques bien déterminées et indispensables au maintien d'un confort thermique acceptable, il peut être présenté comme actuel indépendamment de son ancienneté. L'ancienneté des constructions vernaculaires n'intéressait pas réellement les architectes ou les ingénieurs associés à la conception bioclimatique, qui jugeaient avant tout la performance des éléments de ces constructions du point de vue climatique. Ce point est particulièrement important. Il explique pourquoi certains architectes en France comme aux États-Unis envisageaient leur pratique dans la continuité directe des constructeurs des maisons vernaculaires. Ils avaient le sentiment de prolonger l'œuvre des

1 R. Ayoub, « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *op. cit.*, p. 78-79.

2 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 34.

3 H. Fathy, *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Égypte : Gourni*, *op. cit.*, p. 90-91.

4 M. Roubinet, *La Climatisation*, *op. cit.*, p. 123.

bâtitseurs anonymes dont ils avaient méticuleusement étudié les constructions. Ce sentiment très particulier recèle une signification technique que nous souhaitons étudier dans les chapitres suivants.

IV.2.3. Prolonger l'architecture vernaculaire par la conception bioclimatique

IV.2.3.1. L'idéal d'un néo-vernaculaire

La reprise d'éléments ou de choix techniques observés dans les constructions vernaculaires et ayant une fonction climatique déterminée est une pratique attestée chez certains architectes modernes, particulièrement en zone tropicale. Par exemple, des éléments de l'architecture traditionnelle en zone tropicale humide comme la construction sur pilotis ou les toits ventilés ont été repris par José Luis Sert et Paul Lester Wiener pour le plan de Tumaco, en Colombie, au début des années 1950¹. Si cette pratique était déjà attestée au XX^e siècle et pouvait être courante chez un architecte comme Le Corbusier², les architectes associés à la conception bioclimatique ont essayé de la systématiser. Comme nous l'avons évoqué précédemment, nombre d'entre eux présentaient leur approche de la conception comme un « néo-vernaculaire³ », selon l'expression de Vaye et Nicolas, ou « un nouveau vernaculaire⁴ », selon l'expression de Georges et Jeanne-Marie Alexandroff.

Cette perspective d'un néo-vernaculaire ou d'un nouveau vernaculaire peut s'illustrer par la réappropriation d'éléments et de choix techniques observés dans les constructions vernaculaires et réutilisés pour leur fonction climatique. En les reprenant, certains architectes avaient acquis la certitude de concevoir et de construire dans la continuité directe de l'architecture vernaculaire. Ils revendiquaient parfois directement ces emprunts qu'ils estimaient climatiquement bien adaptés. À propos d'un ensemble de maisons qu'il a réalisé dans la région toulousaine, Cordier affirme qu'elles « empruntent des éléments au vocabulaire

1 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, *op. cit.*, p. 221-222.

2 A. M. Vogt, *Le Corbusier, le bon sauvage : vers une archéologie de la modernité*, Gollion : Infolio, (coll. Archigraphy), trad. de l'allemand par L. Biétry, 2003, 304 p.

3 *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « À l'heure solaire », *op. cit.*, n. p. (Archives personnelles de Frédéric Nicolas – Apt)

4 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 278.

de l'architecture traditionnelle, en particulier la forme du toit¹. » Cette réappropriation directe d'éléments et de choix techniques observés dans des constructions vernaculaires était donc revendiquée. Pour Bardou et Arzoumanian, cette pratique était indissociable de la conception bioclimatique et ils affirment en 1978 que l'approche bioclimatique « ne fait que se souvenir des solutions traditionnelles, améliorées par de nouveaux matériaux et adaptées aux besoins architecturaux contemporains². » Comme Vaye et Nicolas, ils présentent la conception bioclimatique comme « la tendance à l'intégration d'un habitat différencié à un climat particulier, c'est-à-dire le renouveau d'une architecture proprement vernaculaire³ ».

Si les constructions bioclimatiques et solaires passives étaient parfois décrites selon leurs emprunts aux constructions anciennes, l'architecture vernaculaire était quant à elle présentée comme un répertoire d'éléments et de choix techniques susceptibles d'être directement empruntés ou améliorés. C'est ce qu'affirment Georges et Jeanne-Marie Alexandroff :

« Dans l'optique bioclimatique, la "leçon du passé" est maximale ; la lecture des architectures vernaculaires donne aux concepteurs des exemples d'implantation dans le site, de volumétrie générale et d'orientation qui sont directement transposables ; des choix de matériaux ; des jeux spatiaux modulant des relations variables avec les forces et contraintes du milieu naturel ; bref, un langage cohérent et riche dans ses applications⁴. »

Le fait qu'ils soutiennent que ces éléments et choix techniques sont « directement transposables » est particulièrement important. Selon eux, l'exemple le plus frappant d'une reprise directe d'élément et de choix techniques empruntés à l'architecture vernaculaire dans des constructions solaires passives contemporaines concerne les constructions en *adobe* du Nouveau-Mexique et de l'Arizona⁵. Cette technique de construction en terre crue était déjà utilisée par les Indiens Pueblos et est attestée dès le XIV^e siècle dans cette région⁶. Elle a été reprise et améliorée sous l'influence espagnole entre le XVIII^e et le XIX^e siècle, qui a généralisé

1 J.-P. Cordier, « Quatre maisons bioclimatiques et la recherche d'une nouvelle tradition », *Techniques & Architecture*, « Architecture climatique », *op. cit.*, p. 78.

2 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, *op. cit.*, p. 54.

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, *op. cit.*, p. 19. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

4 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 136.

5 *Ibid.*

6 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, *op. cit.*, p. 36.

l'usage du bois pour les franchissements et les ornements¹. L'amélioration des enduits et l'utilisation du béton pour les fondations ont pérennisé cette technique au XX^e siècle et la construction en *adobe* est restée économiquement très compétitive dans ces régions du sud des États-Unis². Alors que les techniques constructives traditionnelles aux États-Unis sont généralement « légères³ » (ossature bois, *balloon frame*...), il existe au Nouveau-Mexique une tradition des constructions massives⁴, due à la faible résistance à la compression des briques d'*adobe* qui nécessite des murs maçonnés épais.

Les constructions « lourdes » réalisées suivant ces techniques bénéficient généralement d'une importante inertie thermique⁵, analogue à celle des constructions traditionnelles en pierre qui existent en France⁶. Étant donné les qualités thermiques de la terre crue, cette technique a connu un « essor considérable⁷ » entre les années 1970 et 1980, où la majorité des constructions solaires passives de cette région ont été construites en *adobe*. Pour Bardou et Arzoumanian, le « Nouveau-Mexique est à ce titre l'un des rares exemples de continuité de l'habitat traditionnel, perpétuation explicable par la parfaite adaptation de ce modèle d'habitat au climat semi-désertique de ces hauts plateaux (plus de 2000 m d'altitude⁸). » Cette reprise des techniques traditionnelles de construction en brique de terre crue dans les maisons solaires passives est présentée comme un véritable « transfert de technologie⁹ » en 1977, dans la revue *L'Architecture d'Aujourd'hui*. Ce « transfert de technologie » s'est fait sous l'impulsion des architectes et des ingénieurs américains qui considéraient la construction en *adobe* comme une technique directement transposable et parfaitement adaptée aux constructions solaires passives du Nouveau-Mexique.

Il n'existe pas à notre connaissance d'exemple de cette nature en France, bien que la construction en brique de terre crue ou en pisé ait pu être utilisée par certains architectes associés à la conception bioclimatique¹⁰. Ce sont moins des techniques de construction que des choix techniques relatifs à l'orientation, l'implantation, la protection ou la morphologie du bâti

1 *Ibid.*, p. 38.

2 *Ibid.*, p. 41.

3 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 88.

4 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, op. cit., p. 37-38.

5 *Ibid.*

6 E. Mazria, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, op. cit., p. 88.

7 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 41.

8 *Ibid.*, p. 39 ; R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 283.

9 P. Diaz-Pedregal, « Architecture solaire : quelques perspectives », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », op. cit., p. 2.

10 Entretien avec Joseph Colzani, le 20/06/2019 à Lavalette.

qui étaient empruntés à l'architecture vernaculaire et étaient parfois repris dans des constructions bioclimatiques par les architectes français. Par exemple, Ménard présente les espaces-tampons comme des « pièces pouvant n'être pas ou peu chauffées¹ » qui assurent la protection des pièces à vivre « comme le sont dans le vernaculaire rural, l'étable, la grange, les réserves et autres annexes² ». Les pratiques de talutage des façades les plus exposées aux vents ou l'utilisation de la végétation comme brise-vent sont également des choix techniques observés dans les constructions rurales et vernaculaires qui ont été repris³.

Il importe de préciser que les éléments et les choix techniques observés dans les constructions vernaculaires étaient rarement employés tels quels dans les constructions bioclimatiques et solaires passives. Ils étaient généralement transformés, simplifiés ou transposés dans des matériaux plus récents, mais leur principe et surtout leur fonction restaient conservés. Par exemple, lorsqu'il évoque l'abaissement nocturne des températures intérieures par la ventilation naturelle dans les constructions massives, Ayoub affirme que de telles températures « sont observables dans des bâtiments anciens à maçonnerie très lourde⁴ » mais que « [les] connaissances actuelles de la physique du bâtiment permettent d'obtenir des résultats similaires avec des maçonneries modérément lourdes⁵. » En plus de réduire la masse des constructions, cette meilleure connaissance de la physique du bâtiment permet également selon lui « de mettre à profit la masse des maçonneries pour le chauffage en hiver grâce aux grandes baies vitrées thermiquement isolées dont nos aïeux ne disposaient pas⁶. » Comme Yellott, Anderson et Riordan avant lui⁷, Ayoub reconnaît l'importance de l'industrialisation des produits verriers, qui étaient généralement utilisés avec parcimonie dans les constructions rurales avant leur industrialisation⁸. Ces précisions ayant été faites, il est possible d'étudier dans le détail comment s'effectuaient ces emprunts d'éléments observés dans les constructions vernaculaires.

1 J.-P. Ménard, « Architecture solaire. Inventaire technique », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Solaire : passif ou actif ? », *op. cit.*, p. 4.

2 *Ibid.*

3 J.-P. Auriault, E. Pogu, C. Doré (dir.) *Construire avec le climat*, « Les déperditions », *op. cit.*, n. p.

4 R. Ayoub, « Chauffage et climatisation naturelle sans équipements thermiques », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 36.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 1 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, *op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille) ; B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, *op. cit.*, p. 13.

8 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 143.

IV.2.3.2. Étudier les constructions traditionnelles pour concevoir et pour construire : le cas des Corbières

Il est possible de suivre très précisément certains emprunts à l'architecture vernaculaire, de l'étude de leur fonction climatique à leur réutilisation dans une construction bioclimatique. On peut observer ce mouvement dans une étude intitulée *Architecture régionale et architecture solaire* réalisée en 1979 et financée par le ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, en France¹. Cette étude menée par Michel Gerber, Mimi Tjoyas, Monique Faure et Mariette Gerber portait sur huit villages, tous situés dans les Corbières. Elle croise une analyse architecturale des constructions du point de vue de leur contrôle climatique et une importante enquête sociologique menée auprès des habitants de ces constructions sur leur mode de vie². Elle comporte une seconde partie qui est consacrée à la présentation du projet de rénovation de la maison des *Perdrigals*, également située dans les Corbières et conçue à partir des résultats obtenus lors de l'enquête préliminaire. De l'enquête à ce projet, cette étude permet de suivre chacun des emprunts à l'architecture vernaculaire qui ont été intégrés à cette nouvelle construction.

L'enquête sociologique menée auprès des habitants a mis en évidence l'importance de leurs habitudes, de leurs modes de vie et de leurs exigences de confort. En plus de limiter leurs dépenses de chauffage au strict minimum en chauffant seulement la cuisine, certains habitants avaient adopté un véritable « nomadisme interne³ » qui prenait la forme de « migrations internes saisonnières⁴ » dans le souci de se protéger des températures estivales. Dans une maison du village de Feuilla, l'étude a montré qu'il existait deux chambres : une petite « chambre d'hiver⁵ », dépourvue de fenêtre et située près de la cuisine continuellement chauffée, et « une grande chambre au nord » utilisée pour dormir l'été⁶. Mimi Tjoyas se rappelle avoir été particulièrement marquée par l'intelligence de cette disposition et par l'intérêt de cette dissociation pour le confort thermique intérieur⁷. Les habitants de ces constructions avaient

1 M. Gerber, M. Faure, M. Tjoyas, M. Gerber, *Architecture régionale et architecture solaire*, rapport pour le Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, Direction de la construction, 1979, 52 p. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

2 *Ibid.*, p. 1.

3 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 39, 56.

4 M. Gerber, M. Faure, M. Tjoyas, M. Gerber, *Architecture régionale et architecture solaire*, op. cit., p. 15. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

5 *Ibid.*, p. 15.

6 *Ibid.*

7 Entretien avec Mimi Tjoyas et David Roditi, le 23/10/2019 à Perpignan.

généralement conservé les choix architecturaux initiaux et les éléments techniques originaux de ces habitations : l'étude de leur plan montrait des pièces généralement petites avec très peu d'ouvertures, organisées autour de la cuisine qui était la seule pièce qui pouvait rester continuellement chauffée en hiver et qui était souvent la mieux exposée, en règle générale au sud¹.

Les éléments et choix techniques les plus intéressants observés par Gerber et son équipe assuraient les fonctions climatiques de protection contre les effets du vent (cers et tramontane) et de protection du rayonnement solaire durant les périodes estivales. Outre les murs en maçonnerie « toujours très épais² » et enduits, ils ont remarqué que l'entrée des pièces des différentes habitations ne donne « jamais directement sur l'extérieur³ ». Elle est généralement protégée par un espace-tampon ou par une joue, formée par le mur d'une construction voisine⁴. Ils ont aussi observé que la morphologie des constructions offrait « une faible prise aux vents⁵ » et que les ouvertures orientées au sud étaient généralement protégées par des arbres à feuillage caduc. L'étude conclut sur les observations suivantes :

« On est amené à constater que la maison traditionnelle des Corbières assure essentiellement une fonction de protection contre les extrêmes climatiques : vent dominant froid l'hiver, et chaleur de l'été. Le captage de l'énergie solaire est beaucoup moins évident ; seule l'existence quasi-constante d'une pièce commune exposée au sud témoigne de ce souci. [...] Cette recherche de protection rentre bien dans les préoccupations de l'architecture bioclimatique, où éviter les déperditions énergétiques devient aussi important que capter les calories⁶. »

C'est principalement cette fonction de protection qui va être transposée dans le projet de la maison présentée dans la seconde partie de l'étude. Elle reprend des éléments et des choix techniques relevés dans les différentes constructions vernaculaires étudiées. L'étude retient les choix techniques suivants :

1 M. Gerber, M. Faure, M. Tjoyas, M. Gerber, *Architecture régionale et architecture solaire*, op. cit., p. 5-6. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

2 *Ibid.*, p. 14.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*, p. 13.

« La projection d'un habitat où l'on veut intégrer des éléments traditionnels à une architecture bioclimatique contemporaine doit retenir :

- L'importance de la protection contre le vent dominant. Elle se manifeste par l'absence ou le peu d'ouvertures sur les façades exposées [...].
- La climatisation estivale toujours présente par la protection de la façade sud le plus souvent végétale et à l'intérieur par la circulation d'air frais.
- L'importante inertie thermique des murs de grande masse.
- La possibilité de construire une façade élevée¹ ».

Tous ces éléments et ces choix techniques sont repris dans le projet présenté et ont été mis en œuvre dans la construction finale des *Perdrigals*. Elle se caractérise par une morphologie étudiée pour la protection contre les vents du nord et du nord-ouest. Conformément aux observations qui avaient été faites, la protection des ouvertures a été particulièrement soignée et elles sont munies de déflecteurs aux orientations les plus défavorables (*figure 139*). Cependant, tous les éléments observés lors de l'étude n'ont pas été retenus et réempruntés. Par exemple, le système de rafraîchissement par effet de cheminée observé dans une construction du village de Feuilla, qui permettait de ventiler la construction le long de la façade nord en aspirant l'air frais de la cave semi-enterrée, est apparu comme une technique exceptionnelle et n'a pas été repris².

Cette étude illustre la démarche de nombreux architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique. L'étude de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques ainsi que l'enquête sur les modes de vie des habitants de ces constructions sont présentées comme un préliminaire nécessaire à la mise au point d'un projet. Elle montre qu'il est possible de déduire certains éléments et choix techniques appropriés à un climat local de l'étude de l'architecture vernaculaire, pour les réintégrer directement ou avec certaines modifications dans une maison bioclimatique contemporaine. En pratique, ces opérations d'observation, de déduction et de conception n'étaient jamais réalisées successivement comme dans cette étude, mais l'intégration d'éléments et de choix techniques préalablement observés était une pratique courante chez les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Ces éléments formaient alors un « langage cohérent³ » susceptible de résoudre certains

1 *Ibid.*, p. 16.

2 *Ibid.*, p. 14.

3 G. Alexandroff, J. M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 136.

antagonismes techniques rencontrés lors de la conception d'un projet. Comme les techniques solaires passives, leur intégration et leur dimensionnement pouvaient poser certains problèmes et faisaient l'objet d'ajustement d'une construction à l'autre.



Figure 139 : *Déflecteur protégeant des vents dominants une ouverture à l'ouest de la maison des Perdrigals conçue par M. Gerber.*
(photo Clément Gaillard, le 16 octobre 2019)

Cette étude menée dans les Corbières illustre également l'idée partagée par de nombreux architectes et ingénieurs selon laquelle la conception bioclimatique « ne fait que se souvenir des solutions traditionnelles¹ ». Le projet de la maison des *Perdrigals* proposé par Gerber est présenté comme une « projection dans une réalisation expérimentale des éléments retenus comme participants à l'architecture bioclimatique² », indépendamment de l'ancienneté relative de ces éléments. Finalement, Gerber affirme que la « réponse architecturale apportée par ce bâtiment [...] est en fait très proche de l'architecture vernaculaire³. » La perspective d'un néo-vernaculaire envisagée par de nombreux architectes associés à la conception bioclimatique s'incarnait particulièrement à travers ce type de projet, conçu à partir d'éléments et de choix techniques observés dans des constructions vernaculaires. Bien qu'il soit relativement spécifique et qu'il soit l'aboutissement d'un travail d'enquête exceptionnel dans les villages des Corbières, le projet de la maison des *Perdrigals* montre que l'idéal d'un « nouveau vernaculaire » n'était pas seulement théorique, mais s'est concrètement manifesté dans certaines constructions.

IV.2.3.3. La volonté de prolonger l'architecture vernaculaire

On pourrait présenter cette volonté de concevoir et de construire dans la continuité des bâtisseurs des constructions vernaculaires comme une forme de passéisme ou d'attrait pittoresque pour les constructions du passé. Il serait possible d'affirmer, comme Banham, que cette approche témoignait plus profondément d'une idéologie technophobe d'un « retour à des modes traditionnels de construction et à une sagesse héritée des anciens en matière de situation géographique et d'orientation⁴ ». Mais ce jugement néglige le fait que les constructions vernaculaires étaient valorisées pour leurs qualités techniques, par l'intermédiaire de l'étude de la fonction climatique des éléments et des choix techniques que nous avons présentée. Cette approche de l'architecture vernaculaire n'impliquait nullement un rejet des progrès effectués dans la compréhension des phénomènes thermiques au XIX^e et au XX^e siècle ni un rejet des techniques de mesure de ces phénomènes. Bien au contraire, elle devait intégrer l'ensemble des

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 54.

2 M. Gerber, M. Faure, M. Tjoyas, M. Gerber, *Architecture régionale et architecture solaire*, op. cit., p. 37. (Archives du L.A.B. – Toulouse)

3 M. Gerber, « Toward a Bioclimatic Architecture », p. 670 in : J. Hayes, W. A. Kolar (éds.) *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference*, op. cit. Traduction personnelle, citation originale : « The architectural response brought up by this building [...] is actually very close to the vernacular architecture. »

4 R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, op. cit., p. 37.

connaissances obtenues dans différentes sciences afin d'enrichir la compréhension des constructions anciennes¹. Par exemple, c'est grâce à des mesures de la température à différentes profondeurs dans le sol que l'ingénieur et architecte français Jean-Paul Loubes a pu justifier des qualités thermiques des constructions troglodytiques traditionnelles². Ces mesures du « climat souterrain³ » fournissaient la preuve qu'à une profondeur de 5 mètres les conditions étaient pratiquement isothermes, ce qui expliquait la quasi-isothermie des constructions troglodytiques qui bénéficient d'une inertie thermique presque infinie, formée par toute l'épaisseur de la roche dans laquelle elles ont été creusées⁴. Grâce à ces mesures, Loubes souhaitait ainsi prouver les qualités hygrothermiques des habitats troglodytiques et la légitimité à réactualiser ce type de construction⁵. L'idée selon laquelle la valorisation des constructions anciennes était essentiellement idéologique et passéiste est donc totalement infondée.

Pour comprendre la signification de cette recherche de continuité, il faut nous placer du point de vue de la philosophie des techniques. Simondon a souvent évoqué la place des objets techniques anciens et des techniques considérées comme dépassées dans la « technologie générale⁶ » qu'il souhaitait fonder et qu'il définissait comme « une science des corrélations et des transformations⁷ », c'est-à-dire comme une étude générale du fonctionnement de tous les objets techniques. L'étude qu'il a initiée des objets techniques anciens nous permet d'expliquer pourquoi certains architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont été animés par la volonté de réactualiser l'architecture vernaculaire, en empruntant ou en améliorant des choix techniques observés dans des constructions du passé. En ce qui concerne les techniques et les objets techniques, Simondon permet de comprendre que l'opposition entre ancien et moderne, ou entre passé et présent, peut être dépassée.

Pour Simondon, tout « objet technique peut être lu comme porteur d'une information définie⁸ » indépendamment de l'époque à laquelle il renvoie. Selon lui, la condition *sine qua non* pour qu'un objet technique soit interprété comme « porteur d'une information définie » est d'identifier le fonctionnement de cet objet plutôt que l'usage qui a pu en être fait, qui est

1 H. Fathy, *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, op. cit., p. XXII.

2 J.-P. Loubes, *Archi troglo*, op. cit., p. 115-121.

3 *Ibid.*, p. 115.

4 *Ibid.*, p. 117.

5 Entretien avec Jean-Paul Loubes, le 01/03/2021 (à distance).

6 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 48.

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*, p. 247.

contingent et a pu changer au cours de son histoire. Il doit donc être compris selon des critères techniques par l'observateur, qui doit prioritairement chercher à identifier le fonctionnement d'un objet technique ancien, c'est-à-dire en quoi il constitue « un ensemble ordonné d'opérations¹ ». Simondon affirme en effet que « pour qu'un objet technique soit reçu comme technique et non pas seulement comme utile, pour qu'il soit jugé comme le résultat d'invention, porteur d'information, et non comme ustensile, il faut que le sujet qui le reçoit possède en lui des formes techniques². » Le schème de fonctionnement d'un objet ou la suite d'opérations qui définit une technique sont des formes techniques qui peuvent être identifiées dans un objet technique ancien. En ce qui nous concerne, les fonctions climatiques étudiées par les architectes ou les ingénieurs associés à la conception bioclimatique constituaient autant de formes techniques susceptibles de justifier de la performance des éléments et des choix techniques observés dans les constructions vernaculaires. Les notions d'inertie thermique ou de surface sélective froide étaient des « formes techniques » pertinentes pour expliquer le fonctionnement de certaines techniques passées. Les schèmes de compréhension des techniques solaires passives du type « soleil → masse → espace » pouvaient également représenter une « forme technique » susceptible d'expliquer la fonction climatique d'éléments observés dans l'architecture vernaculaire.

Compte tenu du fait qu'un objet technique peut toujours être « lu comme porteur d'une information définie³ » suivant certaines formes techniques, Simondon affirme que le fonctionnement d'un objet technique est potentiellement toujours actuel et réactualisable, indépendamment de son ancienneté ou du fait qu'il ait pu être dépassé par des objets plus récents ou performants. Selon lui, « [les] techniques ne sont jamais complètement et pour toujours au passé⁴ » dans la mesure où elles « recèlent un pouvoir schématique inaliénable et qui mérite d'être conservé, préservé⁵. » Dans la perspective qui l'anime, Simondon pense que « [la] technologie approfondie doit apprendre non seulement à inventer du nouveau, mais à réinsérer l'ancien et à le réactualiser pour en faire un présent sous l'appel de l'avenir⁶. » Cela justifiait selon lui la nécessité « de conserver le matériel du passé parce qu'il représente une

1 *Ibid.*, p. 244.

2 *Ibid.*, p. 247-248.

3 *Ibid.*

4 G. Simondon, « Sauver l'objet technique », *Sur la technique (1953-1983)*, *op. cit.*, p. 454.

5 *Ibid.*

6 G. Simondon, « Trois perspectives pour une réflexion sur l'éthique et la technique », *Sur la technique (1953-1983)*, *op. cit.*, p. 351.

possibilité de reprise¹ ». Il affirme que les objets techniques sont considérés comme passés à cause de l'obsolescence économique, qui entretient l'illusion que ces objets sont techniquement dépassés².

En reprenant les éléments évoqués précédemment, il est clair que les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique partageaient l'idée selon laquelle l'étude de l'architecture bioclimatique suivant les fonctions climatiques servait « à réinsérer l'ancien et à le réactualiser pour en faire un présent sous l'appel de l'avenir³ », selon la formule de Simondon. Les constructions vernaculaires étaient envisagées comme autant de tentatives de contrôle climatique dont les éléments et les choix techniques étaient susceptibles d'être repris ou améliorés. L'attrait des architectes ou des ingénieurs associés à la conception bioclimatique pour les constructions anciennes peut être pleinement justifié du point de vue de la philosophie des techniques et n'était pas le résultat d'un passéisme implicite. Ces acteurs souhaitaient étudier et connaître l'ensemble du patrimoine des techniques de contrôle climatique présent dans l'architecture vernaculaire, et ils ne souhaitaient pas limiter leurs choix de conception aux techniques mises au point au cours du XX^e siècle. La recherche d'un néo-vernaculaire était donc portée par le souhait de réactualiser les techniques de contrôle climatique les mieux justifiées pour un climat local.

Étant donné l'importance accordée à l'architecture vernaculaire, peut-on pour autant affirmer que les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique revendiquaient l'appartenance à une tradition ? Cette réponse peut être positive à condition de comprendre qu'une tradition technique ne vise pas la conservation d'un style, mais la reproduction des techniques les mieux éprouvées. Du point de vue technique, une tradition a pour fonction de sélectionner les formes et les techniques les mieux appropriées selon des critères sociaux et culturels et de privilégier la reproduction de ces techniques, notamment par leur enseignement. Une tradition a une fonction régulatrice⁴ : elle limite l'invention de nouvelles techniques et valorise systématiquement les techniques considérées comme « traditionnelles ». La sélection des éléments et des choix techniques assurant le contrôle climatique le plus efficace dans un climat local donné jouait le rôle analogue à une tradition pour les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique. Étudier les

1 *Ibid.*

2 G. Simondon, « Entretien sur la mécanologie », *Sur la technique (1953-1983)*, *op. cit.*, p. 416-417.

3 G. Simondon, « Trois perspectives pour une réflexion sur l'éthique et la technique », *Sur la technique (1953-1983)*, *op. cit.*, p. 351

4 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, *op. cit.*, p. 8-9.

constructions vernaculaires du point de vue des fonctions climatiques peut être interprété comme une manière de redéfinir une tradition technique, qui leur permettait de sélectionner les éléments et les choix techniques les plus performants du point de vue du contrôle climatique.

La volonté de concevoir et de construire dans la continuité de l'architecture vernaculaire peut donc être expliquée du point de vue de la philosophie des techniques. Cette explication contredit les analyses proposées par Banham en ce qui concerne le rapport de la conception bioclimatique aux constructions du passé, qui visait à légitimer les éléments et les choix techniques qui peuvent être observés dans les constructions vernaculaires du point de vue de leurs fonctions climatiques. Nous avons analysé la relation des architectes et de certains ingénieurs associés à la conception bioclimatique aux bâtiments et aux aménagements appartenant à l'architecture vernaculaire. Pour eux, les constructions vernaculaires n'étaient « jamais complètement et pour toujours au passé¹ » selon la formule de Simondon, dans la mesure où les fonctions climatiques des éléments et les choix techniques qu'elles concrétisaient pouvaient être repris tels quels ou améliorés pour être intégrés à une nouvelle construction. Nous avons vu que l'étude de l'architecture vernaculaire par les fonctions climatiques avait permis à certains architectes et ingénieurs d'éviter de définir ces constructions suivant un déterminisme strict, critiqué à juste titre par Rapoport. Si certains architectes ont pu affirmer que les constructions vernaculaires étaient toujours climatiquement déterminées dans leurs formes, ces excès venaient vraisemblablement d'une généralisation abusive des conclusions tirées par d'autres architectes et ingénieurs sur les fonctions climatiques des éléments et des choix techniques dans ces constructions.

Nous avons pu voir que la conception bioclimatique n'était pas seulement une démarche de conception en architecture, mais engageait une approche des constructions et des aménagements passés étudiés du point de vue du contrôle climatique qu'ils réalisent. Contre la critique de Fernández-Galiano qui affirme que la conception bioclimatique ne chercherait qu'à construire de nouveaux bâtiments indépendamment des constructions préexistantes², nous avons montré qu'au contraire les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont essayé de systématiquement valoriser les constructions qui préexistaient, au

1 G. Simondon, « Sauver l'objet technique », *Sur la technique (1953-1983)*, op. cit., p. 454.

2 L. Fernández-Galiano *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, op. cit., p. 124-125.

risque d'aboutir à des simplifications sur le fait qu'il n'existerait « pas d'architecture vernaculaire anti-climatique¹ ».

Cette partie a montré que l'approche bioclimatique porte un projet plus général. S'il serait abusif d'affirmer qu'on y trouve une conception originale de l'histoire, l'approche bioclimatique permet néanmoins de suspendre provisoirement l'*a priori* selon lequel un élément ou un choix technique ancien aurait nécessairement été dépassé par une technique plus récente et performante². Suivant l'approche bioclimatique, il existe des climats locaux et régionaux dans lesquels la construction traditionnelle en *adobe* reste le choix le plus justifié en vue du contrôle climatique et du maintien d'un confort thermique intérieur acceptable. L'approche bioclimatique englobe une compréhension renouvelée des productions techniques anciennes. Entre cette partie et la précédente, nous souhaitons montrer ce qui caractérise l'approche bioclimatique dans toute sa généralité. Nous verrons dans la partie suivante qu'il est possible d'atteindre un niveau de généralité supplémentaire, en montrant comment l'approche bioclimatique permet de reposer le problème de l'influence du climat.

IV.3. Penser la relation au climat suivant l'approche bioclimatique

Nous avons essayé de montrer que l'approche bioclimatique présente un rapport original aux constructions et aux aménagements du passé, et qu'elle porte un projet plus général d'étude systématique des choix techniques selon leurs fonctions climatiques. Mais la signification de l'approche bioclimatique peut encore être généralisée si l'on s'intéresse à sa capacité à structurer le problème de la relation entre les techniques et le climat, que nous avons déjà abordé sous l'angle du déterminisme climatique, et qui n'est qu'une dimension du problème philosophique général de la relation entre nature et techniques. En effet, si l'approche bioclimatique a systématisé l'étude des éléments et des choix techniques passés selon leurs fonctions climatiques, cette démarche reposait sur une compréhension renouvelée du microclimat et du climat local ou régional à travers les qualités climatiques qui singularisent

1 M. Vaye, F. Nicolas, « Pour une approche bio-climatique de l'architecture », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, « Quelle architecture solaire ? », *op. cit.*, p. 28.

2 L'idée que tout élément technique peut être une « solution moderne » indépendamment de son ancienneté apparaît également chez Frank Lloyd Wright. Voir : R. Banham, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, *op. cit.*, p. 305.

une localité. Ce mode de compréhension des qualités climatiques d'une localité peut être généralisé et permettrait de reposer le problème philosophique de la relation entre le milieu naturel et les techniques qui en dépendent. Ce travail de généralisation nécessite de croiser les documents et les témoignages relatifs à l'approche bioclimatique avec d'autres travaux appartenant à la géographie humaine, à l'anthropologie et à la philosophie des techniques. Comme nous le verrons, quelques-uns de ces travaux, particulièrement ceux en géographie humaine, ont directement pu influencer certains des principaux acteurs de la conception bioclimatique en France, comme aux États-Unis.

D'un point de vue très général et à la lumière de ces différents travaux, on peut affirmer que l'approche bioclimatique permet de renouveler au moins deux problèmes de nature philosophique. Le premier concerne directement le déterminisme climatique. Comme nous l'avons vu, l'approche bioclimatique a défendu ce que nous avons appelé un déterminisme localisé, dont on peut néanmoins déduire des conséquences généralisables en ce qui concerne les possibilités techniques climatiquement déterminées. Le second problème concerne plus directement la géographie et la possibilité de définir une localité géographique singulière du point de vue climatique. L'approche bioclimatique peut être présentée comme une climatologie qualitative, dont le but est de définir des localités climatiques favorables en vue de l'implantation d'une technique. Si l'approche bioclimatique essayait de définir objectivement ces singularités climatiques et géographiques, nous verrons qu'elles ont aussi été subjectivement comprises par les architectes et les habitants des maisons bioclimatiques. Pour certains d'entre eux, le bioclimatisme était le nom d'une nouvelle relation symbolique au climat, impliquant de nouveaux modes de vie et de nouvelles valeurs. Certains habitants avaient le sentiment de vivre dans une localité géographique et climatique privilégiée et ils accordaient une grande importance aux rythmes climatiques locaux afin d'ajuster leur mode de vie en conséquence. Ce dernier point nous permettra d'aborder la dimension symbolique du climat telle qu'elle a été véhiculée par le bioclimatisme.

IV.3.1. L'approche bioclimatique et l'intuition des possibilités climatiques

IV.3.1.1. La géographie humaine et le problème du déterminisme

Nous avons précédemment évoqué le problème du déterminisme climatique strict à propos de l'étude de l'architecture vernaculaire et la manière avec laquelle il avait été contourné par une forme de déterminisme localisé, appliqué à l'analyse des éléments et des choix techniques dans les constructions anciennes. Mais ce déterminisme localisé n'explique pas comment le climat a pu influencer ces choix techniques par le passé et le terme « d'influence » que nous employons renvoie encore à un déterminisme climatique strict, qui présuppose une relation causale simpliste. Afin de surmonter cette difficulté et grâce aux résultats présentés précédemment, il paraît possible d'interpréter l'approche bioclimatique en dehors d'un cadre conceptuel strictement déterministe, à la lumière des travaux en géographie humaine.

Au XIX^e puis au XX^e siècle, le problème de l'influence du climat, et surtout de la manière avec laquelle se manifeste cette influence, avait été particulièrement étudié par les géographes, notamment ceux associés à la géographie humaine. En 1903, Paul Vidal de la Blache présente la géographie humaine comme l'étude de « la physionomie terrestre modifiée par l'homme¹ ». Loin d'opposer techniques et nature, il affirme que l'espèce humaine « agit sur la nature qu'en elle et par elle² », par exemple par l'intermédiaire de son action agricole qui « consiste à ouvrir la porte à de nouvelles combinaisons de la nature vivante³. » Cependant, Vidal de la Blache avoue que « le plus délicat chapitre de la géographie humaine⁴ » concerne « l'étude des influences que le milieu ambiant exerce sur l'homme⁵ ». Malgré le secours de disciplines comme l'ethnographie et l'écologie, qu'il présente comme la « science du milieu local⁶ », il affirme qu'il reste difficile de distinguer « l'influence du milieu local⁷ » sur un groupe ou une société. Ainsi, le problème qui consiste à savoir si une invention « est le résultat

1 P. Vidal de la Blache, « La Géographie humaine. Ses rapports avec la géographie de la vie », *Revue de synthèse historique*, tome VII-2, n°20, octobre 1903, p. 223.

2 *Ibid.*, p. 222.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 235.

5 *Ibid.* Voir également : S. Barles, *La Ville délétère. Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain XVIIe-XIXe siècle*, Paris : Champs Vallon, (coll. Milieux), 1999, p. 18-24.

6 P. Vidal de la Blache, « La Géographie humaine. Ses rapports avec la géographie de la vie », *op. cit.*, p. 235.

7 *Ibid.*, p. 236.

d'une inspiration locale¹ » ou provient d'un emprunt à un autre groupe ne peut pas être résolu en géographie humaine tant que l'influence du milieu local n'est pas précisément expliquée.

Vidal de la Blache a placé le problème de l'influence du climat sur les sociétés et leurs techniques au centre de la géographie humaine². Comme de nombreux autres géographes français de la première moitié du XX^e siècle, Sorre a été très influencé par la géographie vidalienne. Critique du déterminisme strict défendu par certains de ses contemporains américains, il marque notamment sa distance par rapport aux travaux du géographe américain Ellsworth Huntington qui avaient particulièrement influencés Olgyay³. Sorre critique surtout la méthodologie d'Huntington, qui consiste à définir expérimentalement par des mesures physiologiques faites dans des environnements contrôlés en laboratoire le climat qui serait optimal pour le développement d'une civilisation⁴. Sorre défend l'idée que l'action humaine est toujours en train de modifier le milieu naturel et que par conséquent l'influence du milieu naturel n'est jamais directe et univoque, puisqu'elle s'exerce à travers un milieu déjà transformé par l'activité technique. Il affirme que « [dans] l'ordre biologique, l'homme contribue à créer, inconsciemment ou d'une manière délibérée, le milieu dont il reçoit l'empreinte⁵ », mais qu'inversement « dans l'exercice même de ses techniques, il reste soumis aux conditions de l'ambiance et pour ainsi dire dirigé par elles⁶. » C'est pourquoi il insiste particulièrement sur l'importance des microclimats comme nous l'avons déjà vu, car selon lui « [la] plupart des hommes passent une grande partie de leur existence au sein de micro-climats artificiellement réalisés⁷. » Ainsi, l'activité humaine n'est pas directement sous l'influence du climat local, ni plus généralement du milieu naturel, puisque cette activité produit ce qu'on pourrait nommer avec Leroi-Gourhan « un milieu technique⁸ » intermédiaire. Pour Sorre, c'est dans ce « milieu technique » que vivent les hommes et c'est par la médiation de ce milieu intermédiaire et toujours déjà transformé que s'exerce un certain déterminisme du milieu naturel.

1 *Ibid.*

2 G. Bertrand, « Pour une histoire écologique de la France rurale », p. 37-105 in : G. Duby, A. Wallon (dir.), *Histoire de la France rurale, Tome I*, Paris : Seuil, 1975.

3 V. Olgyay, *Design with Climate, op. cit.*, p. 1-3.

4 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme, op. cit.*, p. 413, 415.

5 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, Tome II, 1^{ère} partie, [1^{ère} éd. 1948], Paris : Armand Colin, 1954, p. 6.

6 *Ibid.*, p. 6.

7 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme, op. cit.*, p. 16.

8 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. Milieu et technique, op. cit.*, p. 333-335, 340-351.

À partir de ces travaux, on peut désigner un milieu comme « naturel » dans la mesure où il a été très faiblement transformé par l'action humaine et a subi un petit nombre d'opérations techniques¹. Le problème de l'influence du milieu naturel et du climat sur les actions techniques paraît complexifié par les travaux en géographie humaine de Sorre, qui observe que cette influence n'est jamais univoque et que l'adaptation d'un individu ou d'un groupe à un milieu déterminé est toujours relative. Il écrit :

« En premier lieu, il n'est guère de problème posé par le milieu naturel qui n'admette deux ou plusieurs solutions. En second lieu, la survivance d'un groupe, pas plus que celle d'un individu, n'implique une adaptation absolument rigoureuse et parfaite au milieu. Une certaine tolérance existe, une marge d'inadaptation². »

Ces observations montrent selon lui que la géographie humaine ne doit pas « céder aux sollicitations d'un déterminisme rigide³ », mais ne doit pas pour autant abandonner tout projet déterministe, dans la mesure où le milieu naturel impose indirectement « des empêchements, des contraintes, des directions⁴ » aux actions techniques possibles. Sa position est donc nuancée. En ce qui concerne l'architecture vernaculaire, Sorre affirme que si l'influence de ce qu'il nomme les « facteurs primaires⁵ » comme le climat ou la nature du sol « se révèle dans la géographie des types de maisons⁶ », elle n'est ni « la seule ni même toujours prédominante⁷. »

Dans l'approche proposée par Sorre, le climat local ou régional d'une localité impose vraisemblablement des empêchements et des contraintes qui restreignent les choix techniques possibles lors de la conception d'une construction. Pour un même climat local ou régional donné, il est donc possible de concevoir plusieurs choix techniques qui peuvent être climatiquement justifiés, tandis que d'autres sont inenvisageables, voire absurdes. Certaines contraintes sont généralisables et tendent à être universelles : l'abri et le vêtement répondent systématiquement pour Sorre au « problème de protection contre les rigueurs du climat⁸ », mais

1 J. Demangeot, *Les Milieux « naturels » du globe*, [1ère éd. 1984], Paris : Armand Colin, 2002, p. 1.

2 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, op. cit., p. 6.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 15.

5 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, Tome II, 2ème partie, Paris : Armand Colin, 1950, p. 925.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 M. Sorre, *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*, op. cit., p. 37.

la forme de cette protection n'est pas pour autant déterminée. S'il définit un certain nombre de contraintes, le climat local ou régional fournit également selon lui « des directions¹ » qui suggèrent certains choix techniques. Ces « directions » concernent par exemple la disponibilité d'une ressource qui favorise l'emploi de techniques déterminées en vue de son captage. Sorre affirme par exemple que « [la] disponibilité d'énergie facile à capter et à discipliner est une des caractéristiques naturelles les plus importantes de la géographie d'une contrée². » Il défend donc un déterminisme lâche qui laisse une large place à la « plasticité³ » de l'espèce humaine, qui s'est non seulement adaptée « aux grandes formes climatiques⁴ », mais a aussi cherché à maximiser l'utilisation de « toutes les ressources de l'environnement⁵. »

Lecteur des travaux en géographie humaine⁶, le philosophe Georges Canguilhem a spécifiquement étudié le problème du déterminisme dans des termes très analogues à ceux posés par Sorre à la même époque. Ses travaux abordent directement le problème philosophique de la « marge d'inadaptation⁷ » d'un individu biologique par rapport à son milieu. Pour Canguilhem, comme pour Sorre, « [l'homme] peut apporter plusieurs solutions à un même problème posé par le milieu⁸ ». Dès lors, le milieu « propose sans jamais imposer une solution⁹ » et ce qui peut être tenu « pour obstacle à un moment¹⁰ » peut se révéler « comme un moyen d'action¹¹ » par la suite. Selon lui, la géographie humaine montre que l'activité humaine est « créatrice de configuration géographique¹² » et que cette activité est sous-tendue par ce qui est tenu « comme désirable¹³ » par un groupe, selon « l'ensemble des valeurs¹⁴ » partagées au sein de ce groupe. Pour Canguilhem, il n'existe pas de milieu universel et neutre pour un individu ou un groupe d'individus biologiques, puisque les valeurs portées par un ou plusieurs individus « découpent

1 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, op. cit., p. 15.

2 *Ibid.*, p. 286.

3 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : L'Habitat. Conclusion générale*, Paris : Armand Colin, 1952, p. 439.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 G. Canguilhem, « Le Vivant et son milieu », *La Connaissance de la vie*, [1ère éd. 1952, 2e éd. rev. et corr. 1965], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque des textes philosophiques), 2009, p. 181-182.

7 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, op. cit., p. 6.

8 G. Canguilhem, « Le Vivant et son milieu », *La Connaissance de la vie*, op. cit., p. 181.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*

12 *Ibid.*, p. 182.

13 *Ibid.*

14 *Ibid.*

des objets qualifiés¹ » et les polarisent suivant des besoins². Complétant le point de vue de Sorre et de Leroi-Gourhan, il montre que si « l'homme est évidemment soumis à un déterminisme³ », ce déterminisme est celui des « créations artificielles⁴ » qu'il a pu inventer et dont l'invention est elle-même sous-tendue par un ensemble de valeurs.

IV.3.1.2. Possibilités et impossibilités climatiques

Les travaux évoqués précédemment nuancent les positions déterministes trop strictes et générales, mais ne parviennent pas à expliquer la manière avec laquelle l'influence du milieu naturel s'exerce concrètement, sinon sous la forme de contraintes ou de « directions », en reprenant l'expression de Sorre. Selon nous, la notion la plus importante qui a émergé de ce débat sur le déterminisme dans la première moitié du XX^e siècle est celle de « possibilité », proposée par l'historien Lucien Febvre en 1922 dans *La Terre et l'évolution humaine*. L'intérêt de cette notion est qu'elle est essentiellement positive et qu'elle peut être traduite très concrètement dans les termes de l'approche bioclimatique. Dans cet ouvrage, Febvre dénonce tout d'abord l'abstraction et l'imprécision de la notion « d'influence », qu'il associe à l'astrologie, et dont la seule fonction est de relier « deux groupes de forces obscures⁵ ». Selon lui, affirmer que le climat influence l'architecture ne constitue pas une explication, puisque ce type d'influence est postulé comme une « loi géographique constante dont rien ne vient restreindre l'application ou préciser la portée⁶. » Ainsi, l'idée de déduire intégralement la morphologie des maisons traditionnelles d'un pays par la simple observation d'une carte climatique de ce pays lui paraît absurde. Pour Febvre, une maison n'est pas un « fait géographique⁷ » mais d'abord un « fait humain⁸ », c'est pourquoi il affirme que le géographe ne devrait « pas étudier "la maison", mais seulement ce qu'il y a de géographique dans la maison⁹ ». Selon lui, cette étude ne peut être faite qu'en isolant des facteurs ou des éléments climatiques précis, et en les confrontant aux faits géographiques avec lesquels ils peuvent être

1 *Ibid.*, p. 195.

2 *Ibid.*, p. 197.

3 *Ibid.*, p. 182.

4 *Ibid.*

5 L. Febvre, *La Terre et l'évolution humaine. Introduction géographique à l'histoire*, op. cit., p. 27. Sa critique de la notion d'influence est très proche de celle de Bachelard, voir : G. Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 220.

6 L. Febvre, *La Terre et l'évolution humaine. Introduction géographique à l'histoire*, op. cit., p. 58.

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*

9 *Ibid.*

en rapport¹, selon une démarche très analogue à l'approche par les fonctions climatiques que nous avons présentée.

Afin d'éviter toutes les simplifications qu'il condamne, Febvre propose de penser le rapport entre le climat et les productions techniques en termes de « possibilités d'action² » ou simplement de « possibilités³ ». Selon cette perspective, les différents milieux naturels sont des « ensembles de possibilités⁴ » qui « ne sont pas toutes de même valeur⁵ », ni de même qualité. En substituant la notion de « possibilité » à celle « d'influence », il veut insister sur le fait que les possibilités d'un milieu n'impliquent aucun déterminisme strict et évoluent constamment au cours du temps. À une époque donnée et pour des techniques analogues, les possibilités de différentes régions sont hiérarchisées entre elles et ne se manifestent pas toutes également⁶. De nouvelles techniques génèrent de nouvelles possibilités, qui pouvaient être ignorées ou inaccessibles auparavant. D'une manière générale, Febvre affirme que les milieux naturels apparaissent aux groupes humains comme autant de « systèmes de possibilités », qui suggèrent des choix techniques déterminés. Il retient comme des possibilités très élémentaires la disponibilité des ressources qui existe dans certaines régions géologiquement et botaniquement favorisées, qui sont comme les « points d'appui des hommes⁷ » selon sa formule.

Bien que Febvre ne donne pas de définition précise d'une « possibilité », cette notion a considérablement enrichi le problème du déterminisme climatique après 1922. Elle a été reprise par Canguilhem et par Sorre, qui affirme en 1961 que l'activité humaine consiste à choisir « entre les possibilités offertes par la nature⁸ », ce qui explique « le sentiment que les choses pourraient être autres⁹ » qu'elles ne le sont, étant donné que certains choix ont pu être faits au détriment d'autres. Cependant, à l'autre pôle de ce « champ de possibilités¹⁰ », Sorre insiste sur le fait que le milieu impose aussi des « interdits¹¹ » tout aussi importants à relever. Connaissant les travaux Vidal de la Blache, de Febvre et de Sorre, Rapoport reprend cette notion de « possibilité¹² » en 1969. Il emprunte à la géographie vidalienne l'idée que « la nature prépare

1 *Ibid.*, p. 390-392.

2 *Ibid.*, p. 192.

3 *Ibid.*, p. 200-201.

4 *Ibid.*, p. 200.

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*, p. 207-208.

8 M. Sorre, *L'Homme sur la terre*, Paris : Hachette, 1961, p. 5.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*

12 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, *op. cit.*, p. 59.

le site¹ » mais « n'offre que des possibilités, non des impératifs, et que c'est à l'homme – et non au site ou au climat – de décider². » En ce qui concerne l'architecture, il affirme que « *la forme de la maison est le résultat d'un choix entre les possibilités existantes*³ », mais il rappelle que ces possibilités peuvent être contraintes par la culture qui prescrit certaines impossibilités⁴. Par exemple, le milieu naturel du Cambodge offre la possibilité de planter des arbres pour protéger les constructions, mais la culture religieuse des Chams empêche ce type de pratique.

Les travaux de Febvre, de Sorre et de Rapoport que nous avons évoqués ont étonnamment circulé parmi les acteurs de la conception bioclimatique, ce qui montre que les problématiques qu'ils soulevaient résonnaient avec celles portées par l'approche bioclimatique. Ces auteurs ont été des références très importantes pour Bardou et Arzoumanian⁵, dont nous avons vu l'influence sur la diffusion de la conception bioclimatique en France. Les travaux de Febvre et de Rapoport ont également été repris par Georges et Jeanne-Marie Alexandroff dans leur étude des constructions vernaculaires. Prolongeant l'intuition de Febvre, ils affirment que des « possibilités similaires⁶ » existantes dans différents milieux peuvent être associées à des « projets et desseins comparables⁷ » qui permettent d'expliquer la forme finale des habitats vernaculaires sans postuler un déterminisme climatique strict. Plus généralement, l'intérêt pour la géographie humaine était partagé par de nombreux acteurs de la conception bioclimatique en France, comme aux États-Unis. Il apparaît jusque chez Olgyay, qui s'appuie dans *Design with Climate* sur la traduction anglaise publiée en 1955 de *L'Homme et le vent*, qui est un ouvrage rédigé par le géographe français Edgar Aubert de La Rüe⁸. Dans ce livre, Aubert de la Rüe consacre de longs développements relatifs à l'adaptation des constructions et des techniques aux vents⁹. Il met en évidence la prédominance de l'orientation sud et sud-est dans les constructions rurales en France et affirme « [qu'aucun] des différents facteurs du climat n'a sans doute plus influencé l'homme que le vent pour la construction de sa maison¹⁰ ». Olgyay s'appuie sur *L'Homme et le vent* pour étayer ses préconisations relatives à l'orientation des

1 *Ibid.*, p. 42.

2 *Ibid.*, p. 59.

3 *Ibid.*, p. 82.

4 *Ibid.*

5 Entretien avec Patrick Bardou, le 09/10/2019 à Marseille ; P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, *op. cit.*, p. 113.

6 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 17.

7 *Ibid.*

8 V. Olgyay, *Design with Climate*, *op. cit.*, p. 188.

9 E. Aubert de la Rüe, *L'Homme et le vent*, Paris : Gallimard, (coll. Géographie humaine), 1940, p. 72-208.

10 *Ibid.*, p. 72-73.

rués¹, mais aussi pour défendre un déterminisme climatique strict à partir des travaux en géographie humaine d'Ellsworth Huntington.

Compte tenu de ces travaux et de l'intérêt qu'ils ont suscité chez les acteurs de la conception bioclimatique, cette notion de « possibilité » nous paraît importante à développer et pourrait être enrichie à la lumière de l'approche bioclimatique. Il semblerait que l'intuition de Febvre selon laquelle le milieu naturel devrait être présenté comme un « ensemble de possibilités² » éclaire la signification de l'approche bioclimatique et permette de comprendre la généralité du projet qu'elle porte, à condition de préciser cette notion. En effet, la notion de « possibilité » est encore très abstraite chez Febvre et les autres auteurs que nous avons mentionnés, qui ne précisent pas la manière avec laquelle apparaissent concrètement ces possibilités au sein du milieu naturel et surtout comment celles-ci induisent des choix techniques déterminés. Or, c'est précisément ce que l'approche bioclimatique nous permet de comprendre dans le cas du climat : elle illustre la prise de conscience de l'existence de certaines possibilités climatiques. On peut définir l'approche bioclimatique comme une méthode qui étudie les possibilités climatiques d'un climat local ou régional, dans le but de déduire des choix techniques susceptibles de tirer parti de ces possibilités.

La connaissance de ces possibilités climatiques explique que les architectes et les ingénieurs privilégient tel climat local plutôt que tel autre, choisissent certaines techniques solaires passives qu'ils estiment mieux adaptées et effectuent certains choix techniques motivés par leurs expériences (orientation, protections solaires...). Par exemple, lorsque Trombe montre que le chauffage et le rafraîchissement peuvent être facilement réalisés « dans les pays à ciel clair³ » des régions montagneuses ou désertiques grâce aux techniques qu'il a mise au point, il met en évidence qu'il existe des possibilités climatiques qui caractérisent spécifiquement ces climats et qui justifient l'emploi de ces techniques. Ces possibilités ont pu être intuitivement exploitées auparavant dans les constructions vernaculaires, mais la démarche de Trombe consiste à signaler ces possibilités et à les expliquer physiquement pour montrer qu'il existe un potentiel de chauffage et de rafraîchissement singulier dans tous « les pays à ciel clair ». Par la suite, Hay et Yellott vont montrer qu'il est possible de climatiser naturellement certaines constructions dans les climats chauds et secs situés en dessous du 35^e parallèle avec le système

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 94.

2 L. Febvre, *La Terre et l'évolution humaine. Introduction géographique à l'histoire*, op. cit., p. 200.

3 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 110 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

Skytherm qu'ils ont mis au point¹, et que ces climats bénéficient donc de possibilités de climatisation naturelle exceptionnelles. Pour Trombe, Hay et Yellott ce potentiel de chauffage et de rafraîchissement dépend des possibilités spécifiques des climats faiblement nébuleux, où l'humidité relative reste généralement faible². Par leurs travaux appliqués à des climats régionaux déterminés, ils exemplifient ce que l'approche bioclimatique a cherché par la suite à étendre à tous les climats : fournir aux concepteurs une méthodologie pour étudier les climats locaux et régionaux en fonction de leurs possibilités climatiques, afin qu'ils puissent en déduire des choix techniques appropriés.

IV.3.1.3. L'exemple d'une possibilité climatique identifiée : le cas du « gisement solaire »

Dans le cas de l'approche bioclimatique, cette notion de « possibilité » prend un sens concret et circonscrit à l'étude des possibilités climatiques. Parmi les possibilités qui ont été principalement étudiées sous l'impulsion de l'approche bioclimatique durant la période qui nous intéresse, on trouve celles qui concernent le « gisement solaire³ » et le potentiel d'utilisation directe de l'énergie solaire en vue du chauffage et du rafraîchissement des constructions. L'étude du gisement solaire, c'est-à-dire de la répartition géographique de l'ensoleillement en vue de son utilisation potentielle, s'est particulièrement développée dans la seconde moitié du XX^e siècle, au moment où l'énergie solaire est présentée comme « la houille d'or de l'avenir⁴ » selon l'expression de Trombe. Elle a mobilisé certains architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique à partir du milieu des années 1970 en France. L'étude du gisement solaire a mis en évidence les possibilités inégales d'utilisation directe de l'énergie solaire sur le territoire métropolitain. L'émergence de cette notion de « gisement solaire⁵ », et la signification qu'elle a pu avoir pour les architectes et les ingénieurs associés à

-
- 1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, op. cit., p. 85. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)
 - 2 R. W. Bliss Jr. « Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers », op. cit., p. 118-119.
 - 3 C. Perrin de Brichambaut, C. Vauge, *Le Gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique*, Paris, Lavoisier, (coll. Technique et documentation), 1982, 222 p.
 - 4 F. Trombe, « L'énergie solaire, houille d'or de l'avenir », *L'Astronomie*, vol. 64, 1950, p. 413-421 ; S. Le Gars, « Dans le champ solaire : cartographie d'un objet scientifique », p. 17 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, op. cit.
 - 5 La notion de « gisement » était employée « par analogie avec les énergies fossiles », voir : *Actualités-Documents. Service d'information et de diffusion*, « Énergies nouvelles : l'énergie solaire », n° 110, mars 1976, p. 12. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

la conception bioclimatique, montrent comment s'est opérée la prise de conscience de l'existence de possibilités climatiques propres à quelques climats régionaux, considérés comme plus propices à l'utilisation de certaines techniques solaires passives.

Dès 1950, Siple mettait en évidence l'inégale répartition de l'ensoleillement direct aux États-Unis et définissait des zones de « faisabilité maximum¹ », de « faisabilité d'ingénierie² » et de « faisabilité minimum³ » pour le captage de l'énergie solaire⁴ (*figure 140*). Le rayonnement solaire avait été identifié comme une « ressource⁵ » par des climatologues et des météorologues comme Landsberg dès 1946, mais la mesure de la répartition géographique de cette ressource restait imprécise et mal connue⁶, et ce jusqu'au début des années 1960⁷. Sorre affirme à la même période que « l'exploitation du rayonnement solaire⁸ » est difficilement réalisable « dans les stations de plaine des zones dites tempérées, surtout à influences marines plus ou moins accusées, et dans les régions urbaines⁹ ». En revanche, il observe « que les climats subtropicaux du type méditerranéen (Méditerranée, Chili, Californie) présentent les conditions les plus favorables¹⁰ » à l'utilisation directe de l'énergie solaire et « que l'optimum se rencontre dans les climats désertiques chauds (Sahara et lisières, Chili¹¹) ». Au cours des années 1950 et 1960, ces observations qualitatives ont été complétées par des mesures actinométriques permettant de déterminer l'intensité de l'énergie solaire reçue par une surface en fonction de son orientation, particulièrement dans les régions désertiques considérées comme propices à l'utilisation de l'énergie solaire¹².

1 P. Siple, « Climatic Considerations of Solar Energy for Space Heating », p. 14-16 in : R. W. Hamilton (éd.), *Space Heating with Solar Energy: Proceedings of a Course-Symposium held at the Massachusetts Institute of Technology, August 21-26, 1950*, Cambridge : MIT/Bemis Foundation, 1954.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Maximum feasibility », « Engineering feasibility », « Minimum feasibility ».

4 D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, *op. cit.*, p. 111.

5 H. E. Landsberg, « Climate as a Natural Resource », *op. cit.*, p. 295.

6 *Ibid.*

7 M. Perrot, *La Houille d'or, ou l'énergie solaire*, *op. cit.*, p. 38.

8 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, *op. cit.*, p. 289.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*

12 P. Bouet, « A Silent Graph. Tracing the Algerian Past of French Solar Experiments », [en ligne], *ABE Journal*, n°18, p. 6-7.

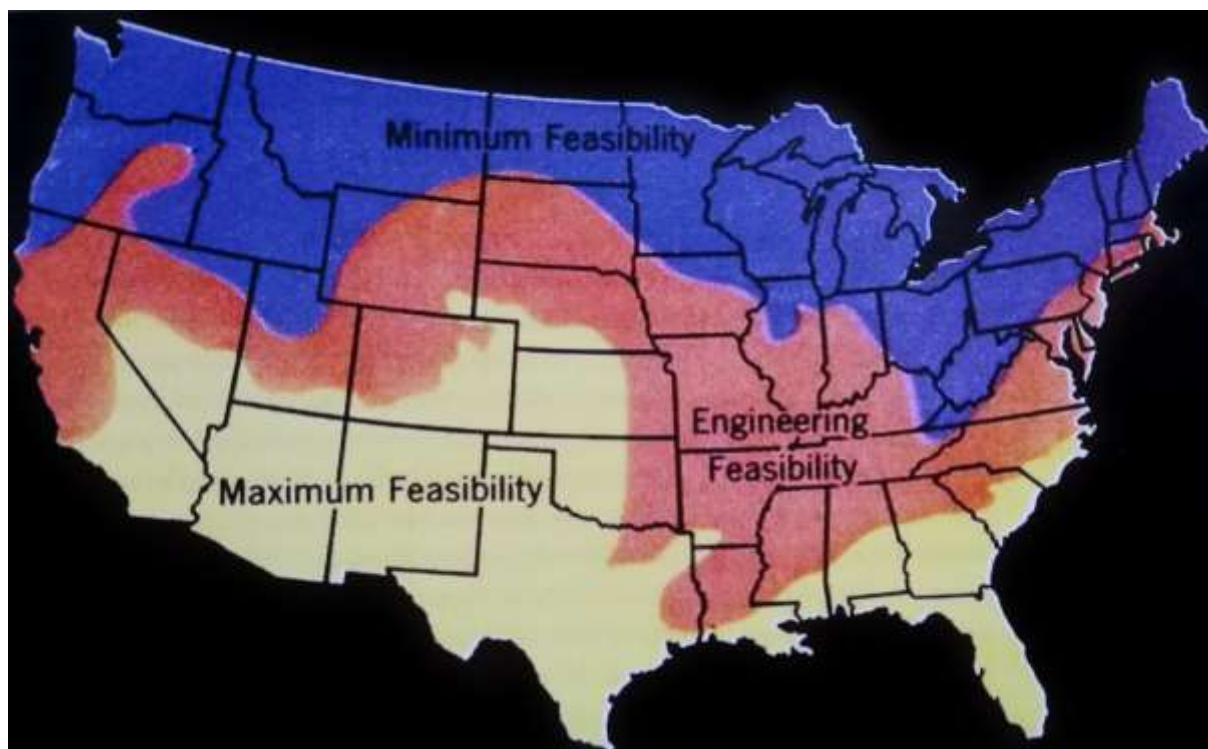


Figure 140 : Carte du potentiel d'utilisation de l'énergie solaire aux États-Unis selon une « faisabilité maximum » (jaune), une « faisabilité d'ingénierie » (rouge) et une « faisabilité minimum » (bleu) d'après P. Siple. (D. A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, New York : Oxford University Press, 2016, p. 111)

En France, l'ensoleillement de la région de Nice a été mesuré dès le début des années 1940 afin d'étudier la faisabilité d'un « chauffage au moins partiel des habitations¹ » grâce à l'énergie solaire. Des cartes de la durée d'ensoleillement annuel sur le territoire métropolitain circulent au moins depuis 1947 dans des revues agricoles². Mais l'étude du gisement solaire sur l'ensemble du territoire métropolitain a été véritablement popularisée par le météorologue Christian Perrin de Brichambaut au milieu des années 1970³. Le travail entamé par Perrin de Brichambaut a été complété dans la seconde moitié des années 1970 par l'*Atlas énergétique du rayonnement solaire en France* réalisé par Jean-François Tricaud à la demande de Trombe⁴, et

1 M. D'Halluin, « Actinométrie et applications de la chaleur solaire », *Le Génie civil*, tome CXIX, n°3-4, janvier 1942, p. 25.

2 P. Teissier, « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo », p. 194 in : S. Le Gars, G. Boistel (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, op. cit.

3 C. Perrin de Brichambaut, « Météorologie et énergie : l'évaluation du "gisement" solaire », *La Météorologie*, VIe série, n°5, juin 1976, p. 129-158 ; R. Chareyre, *La Maison autonome n°2*, op. cit., p. 58.

4 J.-F. Tricaud, *Atlas énergétique du rayonnement solaire en France*, Paris : PYC, 1978, 278 p.

issu de sa thèse présentée en 1976¹. Cet atlas est la première étude d'ampleur sur le gisement solaire du territoire métropolitain français². Ces travaux ont été utilisés par les architectes et les ingénieurs associés à la conception bioclimatique³, et ont servi à la mise au point de méthodes de calcul des apports solaires dès le début des années 1980⁴.

Outre le fait que les cartes d'ensoleillement de la France métropolitaine ont abondamment circulé par l'intermédiaire des publications relatives à la conception bioclimatique, l'intérêt pour l'étude du gisement solaire recèle selon nous une signification plus profonde, relative aux possibilités climatiques qu'elle met en évidence. Si l'approche bioclimatique peut être présentée comme une analyse qualitative des possibilités d'un climat local ou régional, l'étude du gisement solaire a permis de mettre en évidence les possibilités inégales d'utilisation directe de l'énergie solaire au sein d'un même territoire. Ainsi, les valeurs rapportées par Perrin de Brichambaut en 1976 montrent que la quantité moyenne d'énergie solaire reçue quotidiennement durant le mois de janvier par une même surface verticale orientée au sud est trois fois plus importante dans l'extrême sud de la France que dans le nord-est, alors qu'elle est quasiment égale durant le mois de juillet⁵ (*figure 141*). Dans ces régions du sud de la France, la fraction moyenne d'ensoleillement, qui est le rapport de la durée d'ensoleillement mesurée sur la durée maximale d'ensoleillement possible, est toujours supérieure à 0,5 durant la majeure partie de l'année et traduit une nébulosité bien plus faible que dans les régions plus au nord⁶. À la lecture de ces cartes, on comprend pourquoi de nombreux architectes français associés à la conception bioclimatique ont souhaité s'installer dans la région des Corbières, dans les Pyrénées-Orientales, qui bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel⁷.

1 J.-F. Tricaud, *Contribution à l'estimation des ressources énergétiques solaires. Ébauche d'un atlas du rayonnement pour la France*, Thèse de doctorat en Sciences, Université Paris-Diderot, avril 1976, 180 p., Dir. inconnu.

2 Entretien avec Jean-François Tricaud, le 18/10/2019 à Odeillo-Font-Romeu.

3 J.-L. Izard, *Le Gisement solaire et le projet d'architecture*, s.l.n.d, 369 p. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

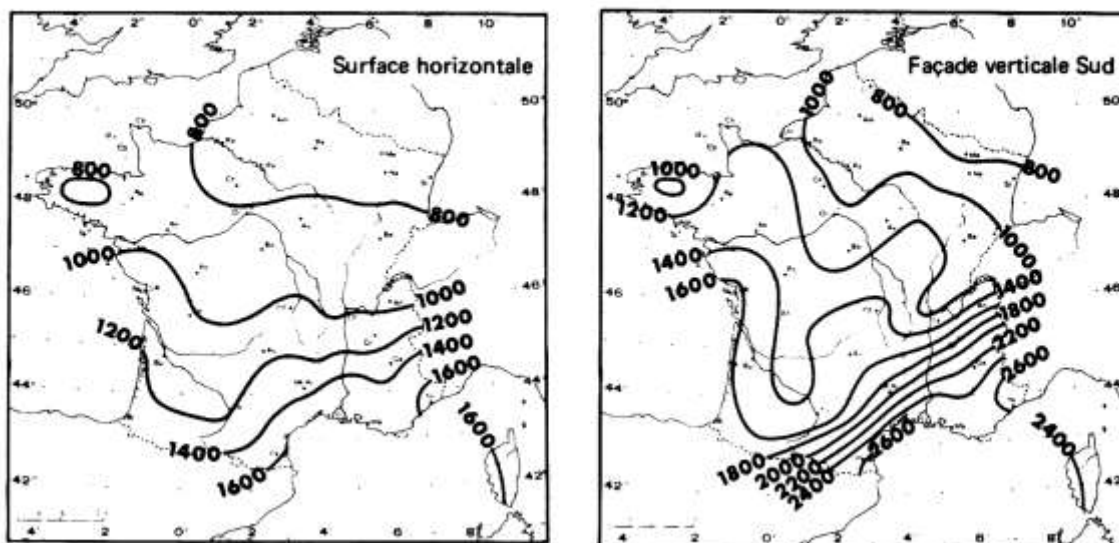
4 R. Célaire, P. Diaz-Pedregal, J.-L. Izard, *Méthode B-Sol. Calcul du coefficient volumique des besoins de chauffage des logements*, *op. cit.*

5 C. Perrin de Brichambaut, « Météorologie et énergie : l'évaluation du "gisement" solaire », *op. cit.*, p. 134.

6 *Ibid.*, p. 133.

7 Entretien avec Robert « Bob » Laignelot, le 28/01/2020 à Ventenac-Cabardès.

JANVIER



JUILLET

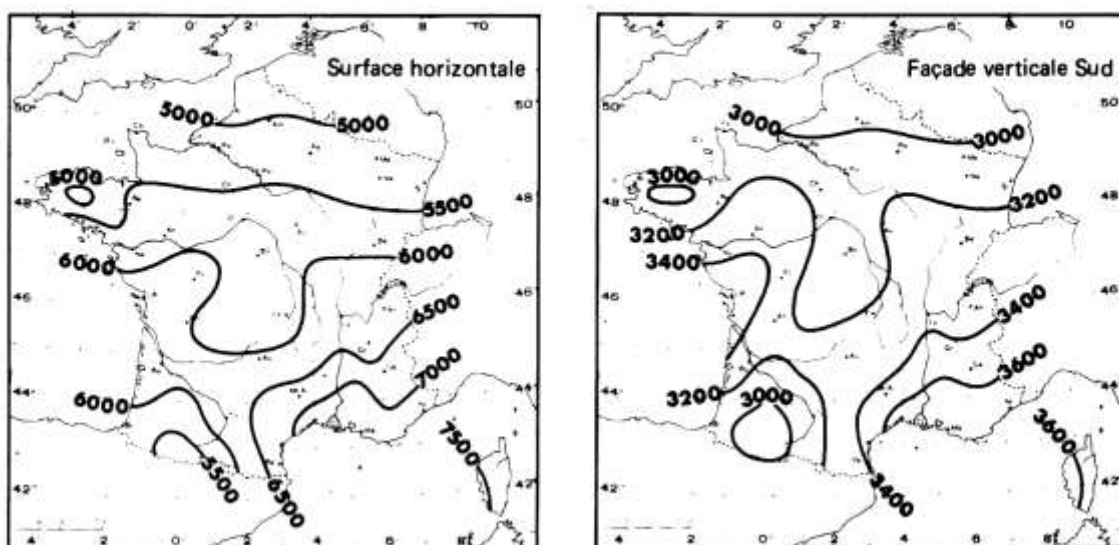


Figure 141 : Évaluation du gisement solaire de la France métropolitaine en 1976 : carte de l'énergie solaire reçue chaque jour en moyenne en janvier et en juillet (en Wh/m^2)
(C. Perrin de Brichambaut, « Météorologie et énergie : l'évaluation du "gisement" solaire », *La Météorologie*, VIe série, n°5, juin 1976, p. 134)

A priori et indépendamment de toutes considérations du microclimat et du climat local, l'étude du gisement solaire montre qu'il existe des régions très favorablement ensoleillées et particulièrement propices à l'utilisation de techniques solaires passives de chauffage adaptées au captage du rayonnement solaire direct (mur Trombe, système de captage isolé...). La tendance évoquée précédemment à la concentration des constructions bioclimatiques et solaires passives dans les climats d'altitude très favorablement ensoleillés du sud de la France et des États-Unis dans la seconde moitié des années 1970, est confirmée par les études sur le gisement solaire de cette époque. Ces constructions sont implantées dans des zones bénéficiant d'une qualité et d'une durée d'ensoleillement annuel bien supérieure à la moyenne nationale du pays où elles sont situées. En ce sens il existe plus de possibilités d'utilisation directe de l'énergie solaire dans les climats d'altitude d'Odeillo-Font-Romeu ou de Santa Fe que dans les climats de plaine plus humides et nébuleux. Ces possibilités sont d'autant plus favorables que les besoins de chauffage sont généralement importants et que les besoins de rafraîchissement sont faibles.

On peut comprendre à la lumière de cet exemple du gisement solaire la signification de cette notion de « possibilité » que nous avons présentée et qui a circulé par l'intermédiaire des travaux de Febvre, de Sorre et de Rapoport parmi les acteurs de la conception bioclimatique. Il convient de garder à l'esprit que cette notion n'est pas univoque, mais est toujours corrélée à un besoin identifié et à des choix techniques qui permettent d'en tirer parti. L'existence de vents locaux ou de brises relativement régulières dans un climat local peut constituer une impossibilité tout autant qu'une possibilité : si elle peut empêcher le chauffage d'une construction par la seule énergie solaire dans certaines localités et à certaines périodes de l'année, elle peut tout autant permettre d'en assurer le refroidissement durant l'été, comme c'est le cas du cers et du marin dans les Corbières¹. En plus de l'étude du gisement solaire et des possibilités d'utilisation directe de l'énergie solaire, certains architectes et ingénieurs associés à la conception bioclimatique ont proposé d'étudier d'autres gisements de même nature, susceptibles de mettre en évidence d'autres possibilités climatiques importantes. C'est notamment le cas de Dreyfus et d'Olgyay qui regrettaient le manque de données sur les possibilités de rafraîchissement nocturne par rayonnement de grande longueur d'onde, qui dépend en première approximation de la nébulosité du ciel². Ce dernier affirme en 1963 que

1 M. Gerber, « Trois maisons bio-climatiques dans l'Aude », *Techniques & Architecture*, « Les 4 éléments », *op. cit.*, p. 65-67.

2 J. Dreyfus, *Le Confort dans l'habitat en pays tropical*, *op. cit.*, p. 136.

« [cette] possibilité n'est pas suffisamment reconnue ni utilisée de manière significative dans la pratique de la construction¹ » et qu'un « manque de données coordonnées entrave de tels développements². » Comme il existe « un gisement solaire », il existerait ce qu'on pourrait nommer un gisement de ciel clair qui resterait à étudier et à cartographier afin de déterminer les possibilités de rafraîchissement nocturne qui peuvent exister dans certaines régions.

On comprend à travers ces exemples l'idée que certains climats locaux ou régionaux présentaient un plus grand potentiel d'utilisation des techniques solaires passives. Ces climats seraient plus riches en gisements climatiques et offriraient plus de possibilités climatiques que d'autres en vue du chauffage ou du rafraîchissement des constructions. On trouve dans les publications relatives à la conception bioclimatique de nombreux calcul du potentiel de chauffage par le rayonnement solaire dans certains climats³, ou bien du potentiel de refroidissement par évaporation des surfaces arrosées, comme chez Landsberg⁴. Ils mettent en évidence qu'il existe un gisement climatique et une possibilité peu ou pas exploitée, voire ignorée⁵. Cependant, un point qu'il nous reste encore à éclaircir concerne la relation entre les possibilités climatiques et les choix techniques qu'elles induisent. Si théoriquement l'approche bioclimatique peut être présentée comme une méthode conçue pour mettre en évidence les possibilités climatiques d'un climat local ou régional, cette méthode corréle l'exploitation de ces possibilités à certains choix techniques déterminés et considérés comme mieux appropriés aux possibilités existantes. Il importe d'étudier la nature de cette corrélation, afin d'approfondir la signification de l'approche bioclimatique et d'éclairer la relation entre possibilités et choix techniques.

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 34.

2 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « This possibility is not adequately recognized nor significantly utilized in building practice. [...] However at present a lack of coordinated data hinders such developments. »

3 Voir par exemple : R. Chareyre, *La Maison autonome*, op. cit., p. 44-47.

4 H. E. Landsberg, « Microclimatology: facts for architects, realtors, and city planners on climatic conditions at the breathing line », op. cit., p. 119.

5 V. Olgyay, « The Temperate House », op. cit., p. 180.

IV.3.2. L'approche bioclimatique et les points-clés climatiques

IV.3.2.1. Milieu techno-géographique et points-clés selon Simondon

Pour chaque climat local ou régional, l'approche bioclimatique permet d'étudier simultanément les possibilités climatiques et le choix des techniques solaires passives susceptibles d'exploiter ces possibilités. Par cette opération, elle fait correspondre des techniques avec des possibilités climatiques identifiées. La découverte d'un gisement climatique induit l'utilisation de certaines techniques, et réciproquement le bon fonctionnement d'une technique solaire passive dans un climat mal connu suggère l'existence d'un gisement climatique ignoré. Alors que le sens commun oppose la nature et les techniques et considère que la fabrication ou le fonctionnement d'un objet technique altère nécessairement le monde naturel, l'approche bioclimatique postule l'existence de complémentarités entre un certain type de technique et certaines possibilités naturelles. Mais comment comprendre cette relation de complémentarité ?

Dans *Du Mode d'existence des objets techniques*, Simondon aborde directement le problème de la relation entre les objets techniques et le « monde naturel¹ », qu'il nomme parfois « monde géographique² ». À l'occasion de cet examen, il utilise la notion de « milieu techno-géographique³ » qui nous paraît intéressante à développer, car elle nous semble susceptible d'expliquer cette relation originale entre possibilités naturelles et choix techniques qui apparaît à travers l'approche bioclimatique. Elle permet de montrer en quoi certains objets techniques prolongent des possibilités naturelles dont ils dépendent afin d'assurer leur fonctionnement optimal. Cette notion apparaît lorsque Simondon étudie une catégorie d'objets techniques dont la conception reflète les caractéristiques du « monde géographique⁴ » dans lequel ils s'intègrent. Il prend l'exemple de la turbine Guimbal, qui est une turbine hydraulique intégralement miniaturisée. Simondon explique que le fonctionnement de cette turbine est conditionné par l'existence d'un milieu techno-géographique qui a été anticipé lors de sa conception et sert à maintenir la turbine dans des conditions thermiques optimales⁵. Ce milieu techno-géographique est entre autres formé par l'eau canalisée dans la conduite forcée où est intégrée la turbine

1 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 46.

2 *Ibid.*, p. 56.

3 *Ibid.*, p. 55.

4 *Ibid.*, p. 52-56.

5 *Ibid.*, p. 55.

Guimbal et elle assure à la fois l'entraînement et le refroidissement nécessaire au bon fonctionnement de cette turbine, qui s'échauffe considérablement étant donné la miniaturisation de ses éléments¹. Ici le « monde géographique » agit positivement puisqu'il maintient les conditions optimales de fonctionnement de cet objet technique.

Bien qu'elle ne soit pas plus développée par Simondon, cette notion de milieu techno-géographique nous paraît importante à approfondir. Elle exprime selon nous l'idée que des possibilités naturelles qui ont induit des choix techniques font partie de l'objet technique une fois finalisé : ainsi le débit d'eau de la canalisation qui alimente la turbine Guimbal qu'analyse Simondon, qui est lui-même fonction de la hauteur de chute, est déjà technique et n'est pas dissociable de la turbine². La notion de milieu techno-géographique nous force à penser la dimension géographique et climatique de certains choix techniques. D'un point de vue techno-géographique, le mur Trombe n'est pas qu'un élément de maçonnerie exposé au soleil qui assure le chauffage d'un local par convection, conduction et rayonnement : il réalise aussi un milieu techno-géographique dans la mesure où son importante inertie thermique reflète les besoins de chauffage des climats d'altitude. De même, le système *Skytherm* forme un milieu techno-géographique puisque son fonctionnement est conditionné par une faible nébulosité, l'humidité de l'air agissant comme de gigantesques « stores³ » qui bloquent le refroidissement de la toiture-bassin par rayonnement de grande longueur d'onde. Les choix techniques qui ont été effectués lors de la conception de ces techniques solaires passives reflètent les caractéristiques singulières des climats régionaux où elles ont été mises au point, donc un milieu techno-géographique particulier.

L'intuition simondonienne selon laquelle des possibilités naturelles interviennent dans le fonctionnement de certains objets techniques et peuvent induire des choix techniques déterminés apparaît implicitement chez d'autres auteurs. Elle est évoquée par le géographe André Fel en 1978, qui a proposé de constituer une « géotechnique⁴ », définie comme « une véritable science géographique des techniques⁵ » qui serait inspirée des travaux de Sorre et d'autres géographes français. Cette discipline imaginée par Fel étudierait la distribution géographique des techniques et permettrait d'expliquer leur implantation, par exemple à la

1 *Ibid.*, p. 57.

2 *Ibid.*, p. 54-55.

3 J. I. Yellott, « How Materials React to Solar Energy », *op. cit.*, p. 197.

4 A. Fel, « La Géographie et les techniques », p. 1062 in : B. Gille (dir.), *Histoire des techniques*, Paris : Gallimard, (coll. Encyclopédie de la Pléiade), 1978.

5 *Ibid.*

lumière des « inégalités géographiques et géologiques¹ » qui permettent de comprendre l'installation des grands sites industriels au XIX^e siècle. L'intuition selon laquelle il y aurait des caractéristiques géographiques et géologiques propices à l'utilisation de certaines techniques apparaît chez Leroi-Gourhan. Outre l'agriculture, il affirme qu'il existe déjà des structures géomorphologiques qui cristallisent des gestes techniques élémentaires, comme celui de collecter et de contenir². Il présente les cours d'eau, les bassins, les lacs ou les étangs naturels comme « des contenants fixes³ » de dimension géographique, qui forment des « cavités naturelles ou artificielles qui permettent de retenir de grandes masses fluides⁴. » Ces contenants naturels peuvent assurer des fonctions techniques élémentaires de stockage ou de transport. Cette intuition nous paraît profonde puisqu'elle exprime l'idée qu'on trouve déjà dans la nature des structures qu'on pourrait nommer quasi techniques ou susceptible d'induire des choix techniques déterminés. Le philosophe Pierre Ducassé partage le même point de vue que Leroi-Gourhan, mais à propos de la naissance de certaines techniques. Il affirme qu'il existe déjà dans l'environnement des « mécanismes "*tout montés*"⁵ », générés par exemple « par l'activité géologique⁶ » et qui prennent la forme des structures quasi techniques comme « le support, le barrage, le levier, le siphon⁷ », qui sont à l'origine de l'invention de ces techniques par la suite.

Simondon approfondit les intuitions de Leroi-Gourhan et Ducassé en montrant que certains objets techniques prolongent des qualités géographiques et géologiques naturelles, mais il va plus loin qu'eux en affirmant que leur localisation et leur implantation possèdent alors une signification déterminante pour la compréhension de leurs fonctionnements⁸. Selon lui, l'objet technique dont les actions et les réactions ont été anticipées « selon le milieu dans lequel il doit s'insérer⁹ » a été conçu de tel sorte qu'il « reflète et intègre les caractères du monde naturel¹⁰ ». Un tel objet est intégré au monde naturel suivant ce qu'il nomme « des points-clefs¹¹ » géographiques, qu'il présente comme des « lieux remarquables¹² » et des « points

1 *Ibid.*, p. 1069.

2 A. Leroi-Gourhan, *Évolution et techniques. L'Homme et la matière*, op. cit., p. 299.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 P. Ducassé, *Histoire des techniques*, [1ère éd. 1945], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1961, note p. 5.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*

8 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 219.

9 *Ibid.*

10 *Ibid.*

11 *Ibid.*, p. 181. Nous conservons la graphie ancienne du mot « clef » utilisée par Simondon quand nous faisons référence à son concept.

12 *Ibid.*, p. 184.

exceptionnels¹ » du monde, de par leur topographie ou leur géologie par exemple. Cette notion de point-clé géographique a un sens à la fois esthétique et technique². Pour Simondon, la sensibilité esthétique ressent qu'il y a « des vides qui doivent être remplis, des rocs qui doivent porter une tour³ » et que ces points-clés constituent des lieux privilégiés pour l'implantation de certains objets techniques. De la même manière qu'on « ne place pas une statue⁴ » et qu'on « ne plante pas un arbre n'importe où⁵ », car la localisation de ces objets doit renforcer certains points-clés géographiques, il affirme qu'un « barrage ne peut être construit n'importe où, non plus qu'un four solaire⁶ », car le fonctionnement de ces objets techniques ne peut être optimal que dans certaines configurations géographiques singulières, formant un milieu technogéographique spécifique. Ce n'est qu'une fois implanté dans un lieu techniquement remarquable que cet objet « renforce⁷ » et « concrétise⁸ » pleinement un point-clé géographique. Simondon oppose l'objet technique intégré à un point-clé géographique, comme le barrage ou le four solaire qui « sont concrètement rattachés au monde naturel⁹ », à l'outil qui « au contraire, ne s'insère pas, parce qu'il peut agir partout, fonctionner partout¹⁰. »

Le fait que Simondon mentionne les fours solaires et affirme que ces objets techniques sont situés à des points-clés géographiques est important pour nous. Les constructions bioclimatiques et solaires passives sont aux basses températures ce que les fours solaires sont aux hautes températures : l'un et l'autre exploitent le climat pour produire une différence de température utile, que ce soit pour le chauffage ou le rafraîchissement dans les maisons bioclimatiques, ou l'étude du changement d'état de la matière dans les fours solaires. Pour Simondon, les fours solaires sont situés à des points-clés à la fois géographiques et climatiques, qui singularisent les climats d'altitude. Dans un entretien donné en 1968, il évoque une nouvelle fois les fours solaires et avance l'idée que les régions montagneuses sont des points-clés climatiques, riches en possibilités techniques¹¹. Il affirme :

1 *Ibid.*

2 *Ibid.*, p. 186.

3 *Ibid.*, p. 184.

4 *Ibid.*, p. 183. Cette idée est aussi évoquée par certains géographes, voir : É. Dardel, *L'Homme et la terre. Nature de la réalité géographique*, [1ère éd. 1952], Paris : Comité des Travaux historiques et scientifiques, 1990, p. 82-85.

5 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 219.

6 *Ibid.*

7 *Ibid.*, p. 183.

8 *Ibid.*, p. 185.

9 *Ibid.*, p. 219.

10 *Ibid.*, p. 183 ; X. Guchet, *Le Sens de l'évolution technique*, *op. cit.*, p. 190-191.

11 G. Simondon, « Entretien sur la mécanologie », *Sur la technique (1953-1983)*, *op. cit.*, p. 439.

« Il reste à redécouvrir la montagne. Les montagnes sont bien déjà des lieux techniques [...], il y aurait à développer les capacités techniques des montagnes : d'une part, un Soleil plus intense, plus pur, et plus constant, qui permet par exemple d'utiliser l'énergie solaire, comme à Saint-Gaudens, à Mont-Louis, dans les Pyrénées, en France¹. »

Simondon évoque le four solaire de Mont-Louis où Trombe a mené ses premières expérimentations. Comme nous l'avons vu, Trombe avait identifié les possibilités d'utilisation directe de l'énergie solaire dans « certaines régions de montagne² » à ciel clair et avait en ce sens intuitivement compris qu'il existe des gisements climatiques dans les régions montagneuses. Il avait vraisemblablement eu l'intuition que les « montagnes sont bien déjà des lieux techniques³ » comme l'affirme Simondon. L'idée que la montagne est un point-clé géographique et climatique, qui recèle des possibilités qui ont pu être ignorées est évoquée par d'autres auteurs que nous avons déjà mentionnés. Les observations de Simondon sur les possibilités techniques des régions montagneuses rejoignent notamment celles faites par Sorre, qui affirme en 1954 que « les caractères génétiques de la montagne se reflètent dans ses aptitudes énergétiques⁴ » en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie hydraulique. Avec cette notion de point-clé géographique, Simondon conceptualise une intuition déjà présente chez certains auteurs de la géographie humaine. On trouve dans la géographie vidalienne l'idée que « la nature prépare le site⁵ » et qu'il y a des ressources latentes qui peuvent expliquer le caractère plus favorable de certaines localités géographiques⁶.

Mais la philosophie simondonienne est limitée dans la mesure où Simondon affirme que les points-clés géographiques préexistent à leur découverte et ne peuvent pas être inventés⁷. Or, l'approche bioclimatique nous montre comment des points-clés climatiques peuvent être découverts, à travers l'étude de gisements climatiques ignorés et la mise à jour de nouvelles possibilités climatiques susceptibles d'être exploitées par certaines techniques solaires passives. Il faut donc dépasser Simondon, puisque l'approche bioclimatique nous met en présence de

1 *Ibid.*

2 F. Trombe, Ch. Henry La Blanchetais, « Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair », p. 110 in : United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, op. cit. (Archives Nations Unies – en ligne)

3 G. Simondon, « Entretien sur la mécanologie », *Sur la technique (1953-1983)*, op. cit., p. 439.

4 M. Sorre, *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, op. cit., p. 298.

5 A. Rapoport, *Pour une anthropologie de la maison*, op. cit., p. 42.

6 P. Pinchemel, G. Pinchemel, *La Face de la terre*, Paris : Armand Colin, 1988, p. 309.

7 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 181-183.

points-clés nouvellement découverts grâce aux développements de la climatologie, de la microclimatologie et la compréhension améliorée des phénomènes thermiques. Ce que nous avons appelé le gisement de ciel clair, dont Dreyfus, Trombe et Olgyay avaient eu l'intuition, caractérise des climats régionaux où les possibilités de rafraîchissement pouvaient être inconnues et regroupent autant de points-clés climatiques qui ont pu être ignorés. Bliss a par la suite précisé la répartition géographique de ce gisement de ciel clair, en montrant que « [toutes] choses égales par ailleurs, l'effet de l'augmentation l'altitude du site est toujours de diminuer le rayonnement atmosphérique¹ », donc d'augmenter les possibilités de rafraîchissement. À la suite de ces travaux, Givoni a encore précisé que l'exploitation d'un tel gisement pour le rafraîchissement était maximisée dans les climats peu venteux, où la faible vitesse de l'air durant la période nocturne permet de limiter les apports par convection le long de la surface exposée².

Avec cette notion de point-clé climatique, nous pouvons renverser les critiques que nous avons évoquées précédemment à propos du problème de la reproductibilité des techniques solaires passives et des performances très inégales des maisons bioclimatiques dans différents climats. En construisant la maison d'Atascadero qui est intégralement climatisée naturellement, Hay a implanté sa construction à un point-clé climatique, caractérisé par un équilibre entre les besoins de chauffage et de rafraîchissement et surtout par un microclimat favorable, grâce aux vents catabatiques qui apportent de la fraîcheur nocturne et une humidité de l'air plus faible³. Les constructions bioclimatiques et solaires passives les plus performantes sont généralement situées à des points-clés climatiques et bénéficient d'un climat d'altitude abondamment ensoleillé. Les régions de Santa Fe et d'Albuquerque au Nouveau-Mexique et celle d'Odeillo-Font-Romeu en France concentrent ces points-clés, ce qui explique que les constructions bioclimatiques et solaires passives les plus performantes et les mieux diffusées y soient situées. Van Dresser affirmait en 1977 que l'utilisation directe de l'énergie solaire relevait du « bon sens⁴ » dans « les hauts plateaux et les régions montagneuses⁵ » du Nouveau-Mexique, tandis

1 R. W. Bliss Jr. « Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers », *op. cit.*, p. 119. Traduction personnelle, citation originale : « Other factors being equal, the effect of increasing altitude of site is always to decrease the atmospheric radiation »

2 B. Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, *op. cit.*, p. 122.

3 H. R. Hay, « The California Solarchitecture House », p. EH.73-4 in : *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973*, Paris : UNESCO, 1973. (Archives UNESCO – en ligne).

4 P. van Dresser, *Homegrown Sundwellings*, *op. cit.*, p. 21.

5 *Ibid.*

que Yellott reconnaissait l'exceptionnelle « combinaison de la haute altitude et du ciel relativement sans nuages¹ » dans ce climat d'altitude, qui génère d'importants besoins de chauffage qui peuvent être facilement satisfaits. Selon nous, Van Dresser et Yellott exprimaient intuitivement l'idée que le climat régional d'altitude du Nouveau-Mexique concentre des points-clés climatiques, qui justifient l'abondance des maisons solaires passives qui y sont implantées. De la même manière que pour Simondon il y a « des rocs qui doivent porter une tour² » parce que cette tour concrétiserait un point-clé géographique, pour ces ingénieurs il a des climats régionaux qui devaient concentrer les maisons solaires passives, afin d'en exploiter les possibilités climatiques exceptionnelles.

Le philosophe Martin Heidegger affirme que l'intégration d'une technique ou d'un objet technique moderne au sein d'un milieu naturel constitue toujours un appauvrissement et une dégradation de ce dernier³. En ce sens, il valide l'opinion commune et souvent reprise qui oppose la technique moderne et la nature. Mais les notions simondoniennes de milieu technogéographique et de point-clé montrent que le milieu naturel et les techniques ne sont pas deux domaines nécessairement séparés, puisqu'il est possible de penser leur complémentarité et le fait qu'il existe des hauts lieux naturels plus propices à l'utilisation de certaines techniques. Ces notions permettent d'expliquer la relation entre des possibilités climatiques identifiées et des choix techniques telle qu'elle peut être conceptualisée à partir de l'approche bioclimatique. Puisqu'elle a été en mesure d'identifier de nouveaux gisements et possibilités climatiques, l'approche bioclimatique a aussi cherché à faire coïncider ces possibilités avec des choix techniques déterminés, susceptibles d'exploiter au mieux ces possibilités. Par le prisme des techniques solaires passives, et plus généralement de la fonction climatique des éléments, l'approche bioclimatique a aussi mis en évidence l'existence de points-clés climatiques plus favorables à la réalisation d'un contrôle climatique par l'emploi de ces techniques. Cet effort a abouti à des tentatives pour cartographier ces points-clés et les techniques solaires passives susceptibles d'y être implantées.

1 J. I. Yellott, « Passive Systems for Solar Heating and Cooling – Historical Perspective », p. 3 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

2 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 184.

3 M. Heidegger, « La Question de la technique », *Essais et conférences*, [1ère éd. 1958], Paris : Gallimard, (coll. Tel), 1980, p. 20-28.

IV.3.2.2. Cartographier les points-clés climatiques et les techniques solaires passives aux États-Unis

Nous avons évoqué certains gisements climatiques qui avaient été mis en évidence grâce à l'approche bioclimatique. Mais il existe un ensemble de travaux regroupés aux États-Unis et appartenant à l'approche bioclimatique qui ont encore essayé d'approfondir ces tentatives en cartographiant des points-clés climatiques, afin de montrer le potentiel d'utilisation de certaines techniques solaires passives dont « les climats préférentiels d'utilisation ¹ » avaient été progressivement définis au cours des années 1970. Bien que ces travaux soient restés marginaux et n'aient concerné que quelques États des États-Unis, ils illustrent selon nous l'originalité de l'approche bioclimatique et particulièrement cette compréhension implicite de l'existence de points-clés climatiques propices à l'utilisation de certaines techniques solaires passives et à la réalisation d'un contrôle climatique.

Des cartographies de points-clés climatiques de l'État du Texas et du potentiel d'utilisation de techniques solaires passives comme le mur Trombe ou le système *Skytherm* dans cette région ont été réalisées par le Center for Maximum Potential Building Systems (Centre pour les systèmes du bâtiment à potentiel maximum ou C.M.P.B.S.). Les travaux de ce centre de recherche et de formation fondé en 1975 et situé à Austin, au Texas, étaient particulièrement inspirés par ceux d'Olgyay². Le C.M.P.B.S. a édité en 1978 un atlas intitulé *An Appropriate Technology Working Atlas for the State of Texas* (*Un atlas opérationnel de technologies appropriées pour l'État du Texas*) qui regroupe de nombreuses cartographies³. Quelques cartes montrent la répartition géographique des sols argileux en vue de la fabrication de briques d'*adobe* ou de mur en pisé, mais d'autres cartes de cet atlas présentent les principaux gisements climatiques de l'État du Texas, favorables à l'utilisation du mur Trombe et du système *Skytherm*. Si la carte relative au potentiel d'utilisation du mur Trombe montre que cette technique solaire passive peut être largement utilisée dans la majorité du Texas (*figure 142*), celle qui concerne le système *Skytherm* est assez différente (*figure 143*), puisqu'elle montre que cette technique n'est susceptible d'assurer le chauffage et le rafraîchissement des constructions que dans une petite moitié ouest de cet État. Le C.M.P.B.S. a cartographié à l'échelle du Texas

1 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

2 D. Bolton Fisk, The Center for Maximum Potential Building Systems, « Teaching Regional Passive Climatic Design », p. 773-774 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille)

3 The Center for Maximum Potential Building Systems, *An Appropriate Technology Working Atlas for the State of Texas*, op. cit., n. p.

le potentiel de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde qu'Olgyay souhaitait pouvoir cartographier à l'échelle nationale, voire mondiale. Cette carte montre le gisement de ciel clair pour cet État.

Les recherches du C.M.P.B.S. sur le potentiel d'utilisation du système *Skytherm* ont mis en évidence l'inadaptation de cette technique solaire passive au climat régional plus humide du sud-est du Texas, à proximité de la Côte du Golfe. Pourtant, des techniques de rafraîchissement par évaporation avaient été expérimentées dès 1850 dans certaines constructions de cette région équipées de toitures-bassins initialement conçues pour collecter l'eau de pluie¹. Mais l'analyse des données météorologiques du Texas disponibles en 1978 a montré que des changements climatiques régionaux ont vraisemblablement augmenté l'humidité relative de cette région, et ont rendu inefficaces ces techniques de rafraîchissement par évaporation qui avaient été imaginées au XIX^e siècle. Daria Bolton Fisk, qui était membre du C.M.P.B.S., explique en 1978 que dans le sud-est du Texas « un bâtiment construit à l'origine avec une toiture-bassin et refroidi par évaporation, serait beaucoup moins efficace aujourd'hui à cet endroit en raison de l'augmentation de l'humidité au cours des cent dernières années². » Elle en conclut qu'en « raison des changements climatiques [...] certaines méthodes plus anciennes ne sont plus applicables aux lieux où elles ont été construites à l'origine³. » Cette étude du C.M.P.B.S. montre que des gisements climatiques ont pu exister à une époque et ont pu disparaître par la suite sous l'effet d'un changement climatique régional ou local. Ainsi, un gisement climatique ne constitue pas une réalité permanente et immuable puisqu'il est soumis aux variations de certains facteurs climatiques. Ce qui est apparu comme un point-clé climatique à une époque donnée peut ne plus l'être à une époque ultérieure : le sud-est du Texas, qui était manifestement un lieu privilégié d'expérimentation sur le rafraîchissement par évaporation au milieu du XIX^e siècle, apparaît peu propice à l'utilisation de cette technique dans la seconde moitié du XX^e siècle. Suivant les travaux du C.M.P.B.S., il semblerait que certains points-clés climatiques puissent s'atténuer au cours du temps, tandis que d'autres peuvent apparaître sous l'effet de changements climatiques.

1 *Ibid.*

2 D. Bolton Fisk, The Center for Maximum Potential Building Systems, « Teaching Regional Passive Climatic Design », p. 774 in : D. Prowler, I. Duncan, B. Bennett (éds.), *Passive Solar State of the Art, op. cit.* (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille). Traduction personnelle, citation originale : « a building constructed originally with a roof pond and cooled by evaporation, would be far less effective today in that location due to increased humidity over the last hundred years. »

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Due to climatic shifts as well, some older methods are no longer applicable to the places where they were originally built. »

Trombe

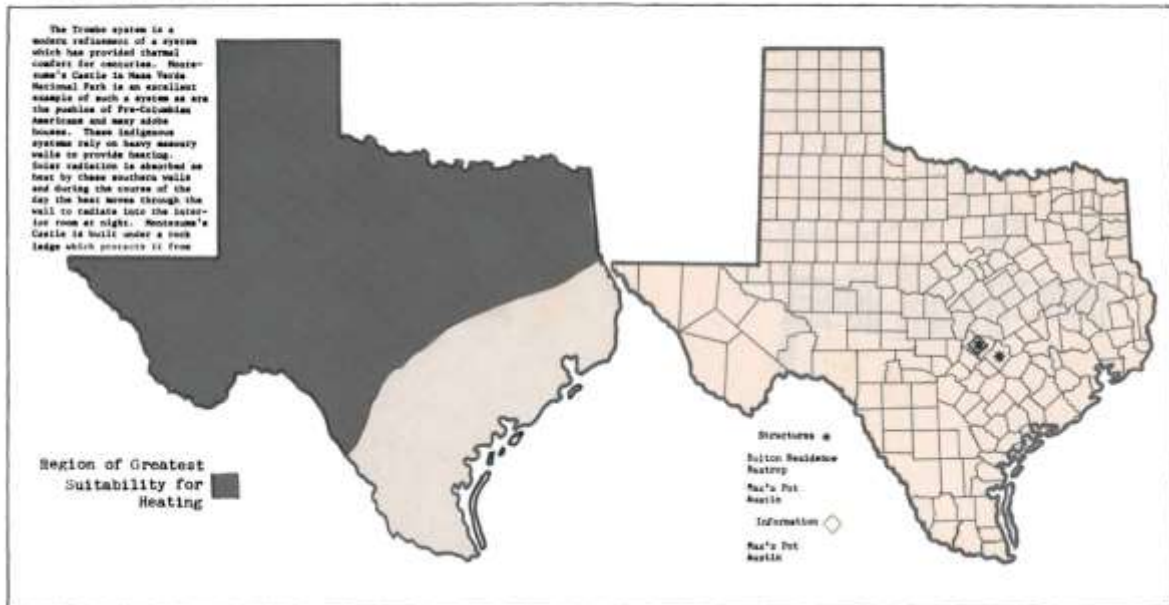


Figure 142 : Potentiel d'utilisation du mur Trombe pour le chauffage et la ventilation dans l'État du Texas (en foncé, carte de gauche) et emplacement des bâtiments existants utilisant cette technique (carte de droite)
(The Center for Maximum Potential Building Systems, *An Appropriate Technology Working Atlas for the State of Texas*, Austin : C.M.P.B.S., 1978, n. p.)

Skytherm

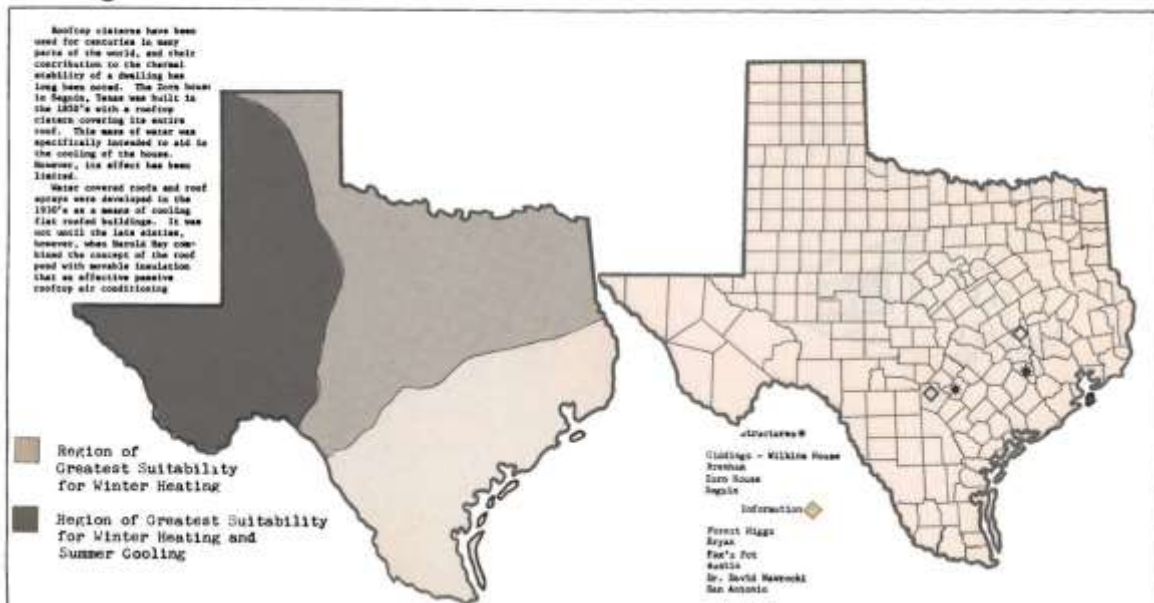


Figure 143 : Potentiel d'utilisation du système Skytherm pour le chauffage et le rafraîchissement dans l'État du Texas (en foncé, carte de gauche) et emplacement des bâtiments existants utilisant cette technique (carte de droite).
(The Center for Maximum Potential Building Systems, *An Appropriate Technology Working Atlas for the State of Texas*, Austin : C.M.P.B.S., 1978, n. p.)

Les travaux du C.M.P.B.S. ont vraisemblablement inspiré des recherches analogues pour d'autres États. En 1979, Jeffrey Cook publie un manuel consacré aux techniques solaires passives de rafraîchissement et de chauffage adaptées au climat régional de l'Arizona et intitulé *Cool Houses for Desert Suburbs*¹ (*Maisons fraîches pour les banlieues du désert*). Ce manuel est essentiellement adressé aux concepteurs et aux promoteurs, afin de les sensibiliser au fonctionnement des techniques solaires passives et à leur potentiel d'utilisation dans les zones désertiques². Parmi les diagrammes illustrant les différentes techniques de rafraîchissement par évaporation existantes, on trouve dans ce manuel une carte qui présente les zones climatiques de l'Arizona en fonction de la « qualité du rafraîchissement par évaporation³ » qu'il est possible d'y réaliser (*figure 144*). Cook distingue trois zones en fonction des besoins de contrôle climatique : celles où les charges de chauffage sont supérieures aux charges de rafraîchissement, celles où elles sont équivalentes et celles où les charges de rafraîchissement dépassent celles de chauffage⁴. Si le rafraîchissement par évaporation est « idéal⁵ » dans la majorité de ces zones, il n'est que partiellement efficace dans les déserts de basse altitude du sud de l'Arizona repérés dans cette dernière zone, où « les étés chauds nécessitent beaucoup plus de refroidissement que la charge de chauffage hivernale⁶. » Dans ces zones le rafraîchissement par évaporation est « loin d'être idéal⁷ » et limite l'utilisation des techniques solaires passives.

Cook situe la ville de Phoenix à l'intérieur de cette zone. En plus de charges de rafraîchissement élevées, cette ville est localisée dans un climat local relativement humide en été, ce phénomène étant vraisemblablement accentué par l'abondante irrigation des zones agricoles alentour⁸. Cette humidité relative élevée empêche le fonctionnement optimal d'un système de rafraîchissement par évaporation à certains moments de la journée pour les mois de juillet et août et nécessite le recours éventuel à un système conventionnel⁹. Ces observations de Cook rejoignent celles faites par Hay et Yellott lors de leurs premières expérimentations sur le système *Skytherm* menées à Phoenix entre 1967 et 1968. Ils avaient observé que « l'afflux d'air

1 J. Cook, *Cool Houses for Desert Suburbs. Optimizing Heating & Cooling for Arizona's Builders*, [1ère éd. 1979], Phoenix : Arizona Solar Energy Commission, 1984, 126 p.

2 *Ibid.*, p. 5.

3 *Ibid.*, p. 9.

4 *Ibid.*

5 *Ibid.*

6 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « the hot summers require considerably more cooling than the winter heating load. »

7 *Ibid.*

8 *Ibid.*, p. 14-16.

9 *Ibid.*, p. 13-14.

chaud et humide du golfe du Mexique¹ » rendait particulièrement délicat le rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde et par évaporation durant les mois de juillet et août dans cette ville². S'il mentionne les problèmes de rafraîchissement dans les déserts de basse altitude du sud de l'Arizona, Cook montre que les zones d'altitude sont bien plus favorisées en ce qui concerne les possibilités d'utilisation des techniques solaires passives. Il affirme que « [les] besoins de chauffage et de refroidissement en Arizona sont presque directement liés à l'altitude³ », puisque les « altitudes plus élevées ont des hivers froids avec d'importantes charges de chauffage⁴ » et que généralement entre 70 % et 100 % de ces besoins de chauffage peuvent être assurés naturellement. Cook confirme donc le fait déjà évoqué que les zones montagneuses de ces régions très ensoleillées concentrent des points-clés climatiques.

On peut lire à travers ces cartographies réalisées par le C.M.P.B.S. et par Cook une tentative pour corréler directement des possibilités climatiques avec des choix techniques déterminés. Ces cartes représentent autant de points-clés virtuels, dont les gisements climatiques ont été identifiés. Alors qu'elles ne concernaient que quelques régions, les possibilités de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde ont été cartographiées et quantifiées à partir de 1980 à une plus grande échelle pour tous les États-Unis⁵. En Europe, les cartes des gisements climatiques de rafraîchissement par rayonnement de grande longueur d'onde et par évaporation n'ont circulé qu'au début des années 2000⁶. Les cartes du C.M.P.B.S. et de Cook exemplifient pour une technique solaire passive ce que l'approche bioclimatique a tenté de systématiser pour toutes les techniques relatives au contrôle climatique. Ces recherches montrent comment l'approche bioclimatique a cherché à déterminer les choix techniques, par l'étude des gisements climatiques et la mise en évidence de points-clés climatiques généralement regroupés dans les régions montagneuses. À partir des notions issues de Febvre et de Simondon, il est possible d'affirmer que l'approche bioclimatique

-
- 1 J. I. Yellott, « Early Test of the "Skytherm" System », p. 56 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 H. R. Hay, J. I. Yellott, « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », op. cit., p. 435.
 - 3 J. Cook, *Cool Houses for Desert Suburbs. Optimizing Heating & Cooling for Arizona's Builders*, op. cit., p. 9. Traduction personnelle, citation originale : « Heating and cooling requirements in Arizona are almost directly related to elevation. »
 - 4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « The higher elevations have cold winters with large heating loads. »
 - 5 E. Clark, P. Berdhal, « Radiative Cooling: Resource and Applications », p. 167-201 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille).
 - 6 S. Yannas, E. Errell, J. L. Molina, *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*, Londres : James & James, 2005, p. 72-87.

articule simultanément deux points de vue complémentaires : une compréhension des possibilités climatiques selon les techniques qui permettent de les exploiter, et une compréhension des techniques selon les points-clés climatiques les plus favorables à leur fonctionnement.

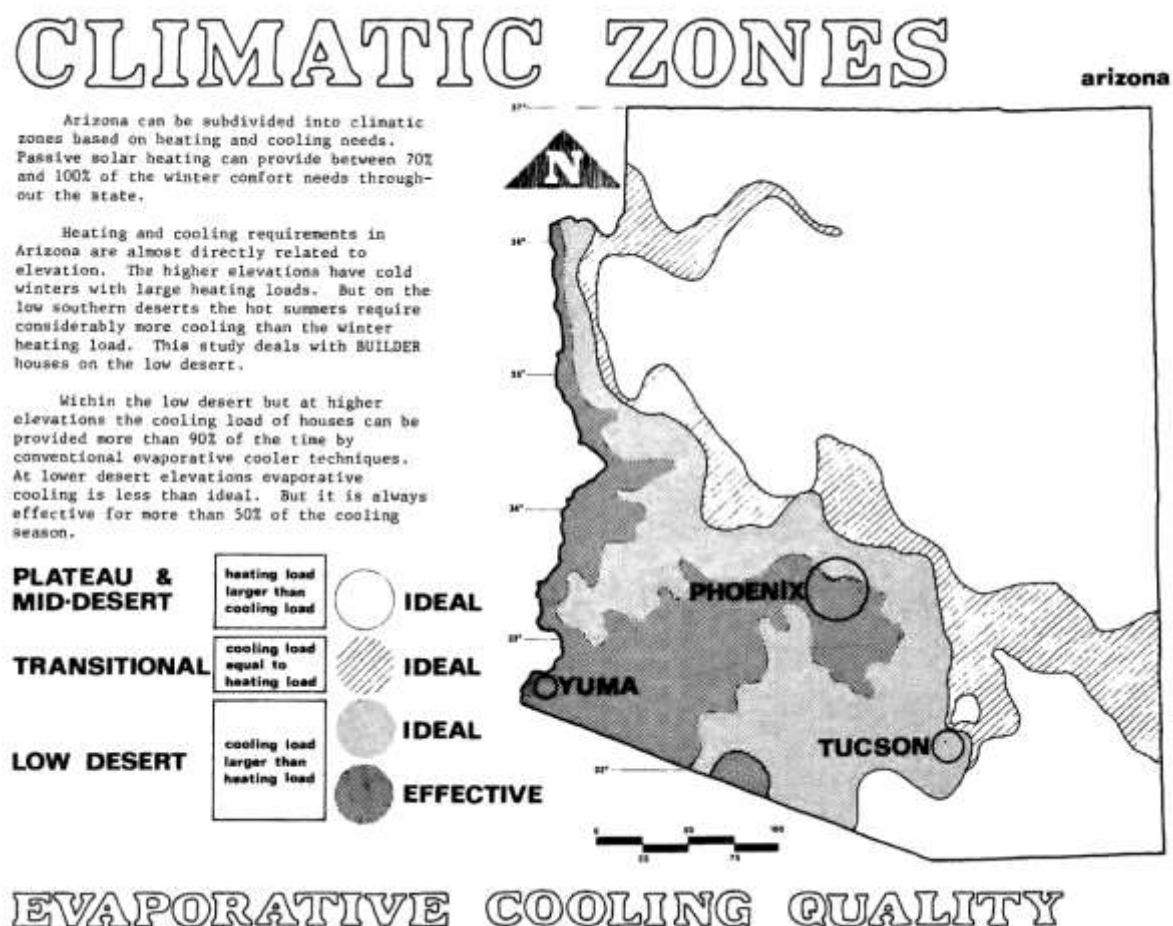


Figure 144 : Potentiel de rafraîchissement par évaporation dans l'État de l'Arizona en fonction des besoins relatifs de chauffage et de rafraîchissement liés à la latitude et à l'altitude.

(J. Cook, *Cool Houses for Desert Suburbs. Optimizing Heating & Cooling for Arizona's Builders*, [1ère éd. 1979], Phoenix : Arizona Solar Energy Commission, 1984, p. 9)

Tous les éléments précédents montrent que les techniques et le milieu naturel ne forment pas nécessairement deux domaines séparés, et qu'il existe une compréhension des possibilités climatiques comme s'il s'agissait de gisements concentrés en points-clés et susceptibles de déterminer objectivement certains choix techniques. Cependant, on peut encore compléter le point de vue présenté dans ce chapitre en montrant la dimension subjective de cette notion de point-clé climatique que nous avons développée. Pour Simondon, la compréhension de

l'existence d'un point-clé possède aussi une dimension esthétique partiellement subjective, qui explique le sentiment de singularité qui accompagne cette prise de conscience¹. Nous n'avons pour l'instant pas développé cette dimension, mais il nous paraît nécessaire de l'évoquer en dernier lieu afin de montrer comment certains architectes, ingénieurs ou habitants ont pu subjectivement prendre conscience de l'existence de points-clés climatiques. Cet examen sera l'occasion d'évoquer la dimension symbolique du bioclimatisme, défini comme une manière de penser les modes de vie et les actions humaines en relation avec le climat.

IV.3.3. La dimension symbolique du bioclimatisme

IV.3.3.1. Vivre à un point-clé climatique : le cas de Paul Davis et du climat local de Corrales au Nouveau-Mexique

De la même manière que les techniques et le milieu naturel sont souvent pensés comme deux domaines séparés, voire antagonistes, Simondon affirme que la dimension symbolique des objets techniques est rarement reconnue par le sens commun qui considère les techniques selon leur utilité et leur capacité à répondre à des besoins². Ce point de vue utilitaire est aussi présent chez Heidegger, qui aborde les techniques comme des moyens conçus en vue d'une fin³. Or l'approche bioclimatique, et par extension le bioclimatisme, montrent qu'un symbolisme abondant a pu être associé à l'utilisation des techniques solaires passives. L'idée que les principales constructions bioclimatiques et solaires passives aient été théoriquement situées à des points-clés climatiques nous permet d'aborder la dimension symbolique du bioclimatisme et la manière avec laquelle l'existence de ces points-clés a pu être subjectivement ressentie par certains ingénieurs, architectes ou habitants. Cette dimension subjective transparaît à la lecture des témoignages d'habitants des maisons solaires passives qui avaient souhaité habiter ce type de construction, et qui partageaient nombre des motivations environnementales que nous avons déjà mentionnées.

En ce qui concerne la dimension symbolique du bioclimatisme, l'un des témoignages les plus intéressants est celui de Paul Davis qui habite depuis 1972 avec sa famille dans une maison solaire passive située à Corrales que nous avons déjà présentée (*figure 66*, p. 286). Ami et voisin de Baer, il a été invité à de nombreuses reprises à s'exprimer sur son mode de vie et

1 G. Simondon, *Du Mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 185-186.

2 *Ibid.*, p. 10.

3 M. Heidegger, « La Question de la technique », *Essais et conférences*, *op. cit.*, p. 9-11.

son choix d'habiter dans ce type de maison qu'il a conçu conjointement avec Baer, et qui est équipée d'un système de chauffage fonctionnant par thermosiphon avec un stockage de pierre (*figure 67*, p. 287). Le témoignage donné par Davis en 1976, après plusieurs années de vie dans cette maison, est particulièrement riche. Il affirme tout d'abord avoir été frappé par l'adaptation des techniques solaires passives à thermosiphon au climat local de Corrales. Il a ainsi observé que « [les] caractéristiques naturelles de tels systèmes les rendent parfaitement adaptées aux environnements désertiques avec des cycles climatiques quotidiens¹. » Selon lui, cette adaptation tient à la faible inertie de ces systèmes, qui fonctionnent en phase avec les cycles climatiques quotidiens des zones désertiques, marqués par l'alternance des périodes diurnes et nocturnes. Davis explique :

« Un thermosiphon à air avec stockage de pierre établit un rythme harmonieux avec le climat du Nouveau-Mexique. Il répond rapidement à l'apparition du soleil, répétant les changements soudains de la nuit au jour dans le désert en ployant les premiers rayons du matin en chaleur. L'alternance prévisible de jours ensoleillés et de nuits froides et claires au Nouveau-Mexique établit un rythme quotidien, correspondant au volant thermique du système à air qui fonctionne de manière optimale sur un cycle de vingt-quatre heures². »

Le synchronisme observé par Davis entre le fonctionnement de cette technique solaire passive et le climat désertique de Corrales est riche en significations. Il traduit selon nous le fait que ce climat local constitue un point-clé climatique pour cette technique, qui est apparu à l'usage et qui a été subjectivement compris *a posteriori*. De la même manière que les techniques solaires passives ont des « climats préférentiels d'utilisation³ », il apparaît réciproquement que chaque climat local ou régional peut être associé à des techniques solaires passives préférentielles. Pour prendre un autre exemple, l'épaisseur optimale d'un mur Trombe doit être ajustée afin de

1 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 40 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « The natural characteristics of such systems make them ideally suited to desert environments with daily climatic cycles. »

2 *Ibid.*, p. 43. Traduction personnelle, citation originale : « An air thermosiphon with rock storage establishes a harmonious rhythm with the New Mexican climate. It responds quickly to the appearance of the sun, repeating the sudden changes from night into day in the desert by bending the first morning rays into warmth. New Mexico's alternation of predictably sunny days and clear cold nights, establishes a daily rhythm matching the thermal flywheel of the air system which operates optimally on a twenty-four hour cycle. [...] Made like the desert of air and rock, the passive air system is attuned to the daily rhythm of New Mexico. »

3 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil*, op. cit., p. 43.

produire un déphasage thermique qui synchronise son fonctionnement avec les besoins de chauffage des climats des régions montagneuses¹, le fait qu'une technique solaire passive puisse fonctionner en phase avec les cycles quotidiens d'un climat local nous semble montrer qu'elle est située à un point-clé, ou au moins à un lieu climatiquement privilégié.

Bien qu'il n'emploie pas cette notion de point-clé climatique, Davis insiste particulièrement sur la singularité du climat de Corrales et plus généralement du climat régional du Nouveau-Mexique. Il fait même l'hypothèse qu'il existe une analogie de fonctionnement entre le système à thermosiphon et stockage de pierre utilisé dans sa maison, qui est « [fabriqué] d'air et de roche comme le désert² », et le climat local des zones désertiques de cette région : l'un et l'autre sont accordés « au rythme quotidien du Nouveau-Mexique³. » En ce qui concerne le « rythme quotidien » de ce climat régional, il explique par ailleurs :

« Le soleil se lève avec une régularité étonnante, particulièrement au Nouveau-Mexique ; les nuits claires, froides et glaciales sont presque toujours suivies d'un ciel bleu limpide et d'un soleil brûlant ; le ciel gris nous protège du froid cosmique du ciel nocturne par l'isolation naturelle des nuages⁴. »

Pour Davis, même la nébulosité et la couverture nuageuse du climat du Nouveau-Mexique contribuent à limiter les besoins de chauffage et favorisent l'emploi des techniques solaires passives, qui ne sont pas adaptées au chauffage durant les périodes de froideur exceptionnelle. Il donne une dimension technique à ce climat et à ses possibilités : la fonction climatique d'isolation thermique, normalement assurée à l'échelle du bâtiment, est ici réalisée à l'échelle de la couverture nuageuse, qui permet de limiter l'amplitude diurne des températures.

-
- 1 F. Trombe, J.-F. Robert, M. Cabanat, B. Sésolis, « Caractéristiques de performance des insolateurs équipant les maisons à chauffage solaire du CNRS », p. XV.19 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)
 - 2 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 44 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit.
 - 3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Made like the desert of air and rock, the passive air system is attuned to the daily rhythm of New Mexico. »
 - 4 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 45 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles). Traduction personnelle, citation originale : « The sun rises with astounding regularity, particularly in New Mexico; clear, cold, chilling nights are almost always followed by lucid blue skies and a burning sun; grey skies protect us from the cosmic chill of the night sky by the natural insulation of cloud. »

L'intuition que le climat local de Corrales, et plus largement la région du Nouveau-Mexique, concentrent des points-clés climatiques transparait nettement à travers son témoignage.

L'intuition que le climat de Corrales constitue un point-clé climatique a manifestement enrichi la dimension symbolique associée au fait d'habiter une maison solaire passive. Elle se manifeste par les changements de mode de vie que Davis a adopté depuis qu'il habite cette maison. Ainsi, le fait que son système de chauffage fonctionne en phase avec le climat local l'a incité à ajuster lui-même ses besoins et à coordonner son mode de vie aux cycles de ce climat. Il explique par exemple avoir pris l'habitude d'attendre le chauffage en début de matinée et la mise en route du thermosiphon via le rayonnement solaire, plutôt que d'allumer un chauffage d'appoint¹. Il ironise sur le fait que cette habitude était une redécouverte de sa « capacité à porter un pull² » et affirme avoir compris l'intérêt d'adapter ses besoins aux cycles climatiques quotidiens. L'ajustement de ses besoins produit une satisfaction éthique, mais surtout intellectuelle : Davis affirme qu'il lui a permis de connaître « à nouveau la sensation des changements de la Terre, la rotation de saison en saison, du jour à la nuit et de la nuit au jour³ », ainsi que « le luxe du soleil de décembre⁴ » et qu'il a redécouvert « les lignes spiralées de lumière tracées par le soleil changeant de position à travers les étapes de l'année⁵. » Habiter une maison solaire passive en ajustant son mode de vie aux contraintes qu'elle impose serait une manière de redécouvrir les mécanismes cosmiques du climat et ce « sens météorologique perdu⁶ » évoqué par Cordier. On peut lire à la même époque en France dans une revue alternative que « [construire] une maison solaire, c'est partir en voyage à la découverte de son système solaire⁷ » et que cette découverte est aussi « le premier pas vers un changement de vie⁸. »

De la même manière qu'une maison solaire passive ou bioclimatique est plus qu'une simple habitation puisqu'elle engage un certain mode de vie et une compréhension renouvelée du climat, une technique solaire passive est plus qu'un système de chauffage : son

1 *Ibid.*, p. 44.

2 *Ibid.*, p. 45. Traduction personnelle, citation originale : « [I] rediscovered my ability to wear a sweater »

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « To know once again the feel of the earth's changes, the rotation from season to season, from day into night and night into day. To know the luxury of December sun, to learn again the spiraling lines of light scribed by the sun shifting position through the stages of the year. »

6 J.-P. Cordier, « L'Autoclimatisation », *Techniques & Architecture*, « Du Bon usage des énergies », *op. cit.*, p. 48.

7 A. Hervé, « À travers les hautes herbes pâles... », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, *op. cit.*, p. 11.

8 *Ibid.*, p. 10.

fonctionnement concrétise un point-clé climatique et instaure une relation de participation avec un climat local¹. Davis déclare qu'il peut « dire quand il y a des nuages la nuit sans ouvrir les yeux² », simplement grâce à la température intérieure, ce qui illustre bien l'influence de la couverture nuageuse sur l'amplitude diurne des températures dans les climats désertiques, et surtout le niveau de sensibilité aux phénomènes thermiques qui caractérise certains habitants des maisons solaires passives et bioclimatiques. On comprend alors pourquoi il peut affirmer qu'un « système d'air passif élimine les barrières artificielles entre l'homme et son environnement³ » en « rétablissant les connexions entre l'énergie humaine et les dynamiques du monde naturel⁴. » Dans ce cas, la sensibilité de cette technique aux variations du climat local est une source d'information, qui permet d'enrichir la compréhension de ce climat.

Reprenant une métaphore organiciste souvent employée, il insiste sur le fait que cette technique solaire passive à thermosiphon « fait partie d'un système vivant, qui refait de notre monde un microcosme et rétablit nos liens avec les dynamiques de notre environnement naturel⁵. » On retrouve dans le témoignage de Davis un lieu commun de l'imaginaire symbolique, qui conçoit le microcosme comme un reflet du macrocosme et le petit comme une réplique du grand. Mais cette notion de « microcosme » prend une autre signification dans le cas des maisons solaires passives et bioclimatiques qui ont été conçues pour produire un microclimat déterminé, qui renvoie nécessairement à un climat local ou régional et aux rythmes imposés par les phénomènes cosmiques (durée du jour, saisonnalité...). Cette idée est partagée par des architectes, comme Kelbaugh, qui affirme que la conception bioclimatique n'est « rien de moins qu'une nouvelle cosmologie⁶ », fondée sur une prise en compte des cycles naturels,

1 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 40 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles).

2 N. Skurka, J. Naar, *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, New York : Ballantine Books, 1976, p. 51. Traduction personnelle, citation originale : « I can tell when there are clouds at night without opening my eyes. »

3 P. Davis, « To Air is Human: Some Humanistic Principles in the Design of Thermosiphon Air Heaters », p. 40 in : H. M. Keller (éd.), *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles).

4 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « a passive air system removes artificial barriers between man and his environment, reestablishing connections between human energy and the dynamics of the natural world. »

5 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « A passive air system is part of a living system which makes our world a microcosmos again and reestablishes our bonds with the dynamics of our natural surroundings. »

6 D. Kelbaugh, « The Seven Principles of Energy Efficient Architecture », p. 12 in : J. Hayes, R. Snyder (éds.), *Passive Solar 1980*, op. cit. (Archives du Groupe A.B.C. – Marseille). Traduction personnelle, citation originale : « nothing less than a new design cosmology »

particulièrement climatiques et écologiques. Davis et Kelbaugh partagent l'idée qu'une maison solaire passive ou bioclimatique reflète les phénomènes cosmiques périodiques et oblige à prendre conscience des rythmes imposés par le climat.

L'anthropologue Marcel Jousse a créé le concept de « rythmo-mimisme¹ » pour expliquer le fait que certaines pratiques ou techniques ont pu être instituées par reproduction des rythmes cosmiques dans certaines cultures. Ces rythmes se refléteraient dans les langages et les rites de ces cultures. Sans pouvoir affirmer que Davis et Kelbaugh partageaient cette attitude, on peut lire à travers leurs propos l'idée qu'une maison solaire passive met en correspondance un microcosme et un macrocosme par l'intermédiaire de rythmes réguliers. Ils considèrent qu'une construction bioclimatique ou solaire passive conçue pour fonctionner en phase avec un climat local réplique certains rythmes climatiques importants et induit une forme de « rythmo-mimisme » dans la manière de l'habiter. Ce « rythmo-mimisme » est nettement perceptible dans les propos de Davis, mais il apparaît aussi plus subtilement dans le témoignage d'autres habitants de maisons bioclimatiques et solaires passives, par exemple à travers leur pratique du « nomadisme interne ».

Plus généralement, ces différents témoignages s'accordent sur le fait qu'une construction bioclimatique ou solaire passive bien conçue institue une forme de « communication² » entre un climat local et ses habitants, ou plus globalement entre un microcosme et un macrocosme. Cette intuition selon laquelle une habitation possède une fonction de communication symbolique avec l'environnement avait été proposée par Camia en 1976, qui affirmait :

« L'habitat a toujours été pour l'homme à la fois un moyen de défense et de communication : défense contre les agressions de toute nature venant de l'environnement et communication avec ce même environnement en tant qu'il est chargé également de valeurs estimées positives³. »

À travers le bioclimatisme, le climat est effectivement appréhendé selon des « valeurs estimées positives » par certains habitants en quête d'un changement dans leurs modes de vie, qui

1 M. Jousse, *L'Anthropologie du geste*, [1ère éd. 1974], Paris : Gallimard, (coll. Tel), 2008, p. 43-44.

2 F.-M. Camia, « Pour une meilleure compréhension des échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement », VIII.1 in : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement*, op. cit. (Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles)

3 *Ibid.*

pouvaient trouver une satisfaction éthique et intellectuelle dans le fait d'ajuster leurs habitudes et leurs besoins aux rythmes imposés par un climat local, comme l'a fait Davis. Ils se considéraient alors comme plus proches du climat et en relation directe avec ses variations.

Du point de vue philosophique, la notion subjective de « communication » mentionnée par Camia n'est pas très éloignée de celle de point-clé que nous avons évoquée. Simondon emploie ces deux notions conjointement. Selon lui, un objet technique comme le moulin à vent relie « le ciel, milieu de l'énergie, à la terre, milieu du travail¹ » et fait communiquer ces deux milieux. Le moulin à vent constitue en ce sens un « système de communication² » en tant qu'il est « capteur de l'énergie la plus impalpable³ ». L'observateur attentif qui regarde le moulin à vent fonctionner le perçoit comme faisant communiquer le vent et un travail mécanique. À travers cette notion de « communication », Simondon retrouve implicitement celle de point-clé que nous avons déjà présentée. De la même manière qu'un moulin à vent concrétise un point-clé géographique et fait communiquer le ciel et la terre, une maison bioclimatique ou solaire passive produit une communication analogue entre le climat et l'abri. L'habitant d'une telle maison ressent qu'elle a été conçue pour faire correspondre un microclimat désiré avec un climat local disponible.

Mais Simondon a une intuition très importante : selon lui un objet technique situé à un point-clé est perçu comme faisant communiquer deux dimensions et reproduit une relation sacrée qui pouvait exister entre deux « ordres de réalité antérieurement séparés⁴ », comme le ciel et la Terre. Il prend l'exemple de l'emplacement du clocher d'une église dans un village, qui manifeste un point-clé géographique selon la définition qu'il donne en 1958 : le clocher symbolise la relation sacrée entre le Ciel et la Terre pour les croyants, mais il est aussi généralement le point le plus élevé d'un bourg et le lieu privilégié d'installation d'un paratonnerre⁵. En tant qu'objet technique, le paratonnerre conçu pour conduire la foudre à la terre est situé à un point-clé géographique qui prolonge une relation de communication partiellement désacralisée entre le ciel et la Terre⁶. L'intuition de Simondon est particulièrement intéressante pour nous. Elle indique qu'il existe vraisemblablement un fond de sacralité et un

1 G. Simondon, « Psychosociologie de la technicité », *Sur la technique (1953-1983)*, *op. cit.*, p. 101.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, p. 105.

5 *Ibid.*, p. 104-105.

6 *Ibid.*

imaginaire culturel empreint de religiosité associé au bioclimatisme qu'il importe d'aborder, afin d'en approfondir la signification.

IV.3.3.2. L'imaginaire associé à l'énergie solaire et au climat selon le bioclimatisme

Cette conscience subjective de l'existence de points-clés climatiques et d'une communication avec le climat, qui motivait certains habitants à ajuster leurs modes de vie en fonction des rythmes climatiques, ne peut pas s'expliquer sans évoquer le rôle d'un fond culturel préexistant qui forme un imaginaire associé au climat, et particulièrement au soleil. Bien qu'il ne soit évoqué que par quelques acteurs de la conception bioclimatique, on ne peut pas négliger l'influence de ce fond sur les motivations et l'imaginaire de ces acteurs. Pour Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, les phénomènes mis en jeu dans l'utilisation des énergies naturelles comme l'énergie solaire « appartiennent au patrimoine culturel et à l'inconscient collectif de l'ensemble des sociétés [...] qui recouvre simultanément un besoin profondément ressenti, au moins dans les pays industriels, et une nécessité objective¹. » Selon eux, la conception bioclimatique fait coïncider des nécessités objectives d'économie d'énergie et des désirs subjectifs, comme celui de renouer avec le milieu naturel afin de développer de nouveaux modes de vie.

Suivant l'intuition de Simondon, l'imaginaire associé à l'utilisation des énergies issues du climat doit être le reliquat d'une relation anciennement sacrée aux phénomènes climatiques. Si l'on prend le cas de l'énergie solaire, la dimension symbolique du soleil avait été renouvelée au XX^e siècle avec les progrès de l'écologie scientifique, qui attribuait un rôle primordial au flux quotidien d'énergie solaire dont une partie est transformée au sein de la biosphère². Le minéralogiste et chimiste russe Vladimir Vernadski, à l'origine du concept de biosphère, écrivait en 1926 que « [la] biosphère est tout autant (sinon davantage) *la création du Soleil* que la manifestation de processus terrestres³ » et que les « intuitions religieuses antiques de l'humanité qui considéraient les créatures terrestres, en particulier les hommes, comme des *enfants du soleil* étaient bien plus proches de la vérité⁴ » qu'on ne le pense généralement. Il reconnaissait

1 G. Alexandroff, J.-M. Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, op. cit., p. 203.

2 J. P. Deléage, *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*, Paris : La Découverte, 1991, p. 123-143, 202-210.

3 W. Vernadsky, *La Biosphère*, [1ère éd. 1929], Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), 2002, p. 51.

4 *Ibid.*

donc que la relation privilégiée entre le soleil et la Terre révélée par l'étude de la biosphère prolongeait l'intuition d'une relation sacrée entre le soleil et la Terre, déjà portée par ces croyances anciennes.

La notion de « biosphère » a particulièrement circulé parmi les acteurs de la conception bioclimatique et, plus généralement, l'approche bioclimatique héritait de cette compréhension renouvelée du rôle biologique de l'énergie solaire¹. L'utilisation directe de l'énergie solaire dans les maisons solaires passives et bioclimatiques mobilisait cet imaginaire associé au soleil et renouait indirectement avec les cultes dont il avait fait l'objet par le passé. On peut par exemple lire dans la revue *Le Sauvage*, en 1978 :

« L'énergie solaire contribue à retrouver les principes élémentaires de l'habitat humain, que les hommes des cavernes, les Indiens d'Arizona ou l'homme pré-industriel connaissaient mieux que nous. Le soleil éclaire les évidences oubliées : une maison, ce n'est pas seulement un toit sous lequel s'abriter, ce n'est pas seulement des murs derrière lesquels se cacher, ni un espace à s'approprier ; mais c'est un ensemble plongé dans un environnement, une "enveloppe" soumise au climat ; un système qui respire et transpire². »

Dans cet extrait, l'utilisation directe de l'énergie solaire est explicitement présentée comme une manière de retrouver une relation au soleil qui a été perdue, mais qui existait dans de nombreuses cultures. Le bioclimatisme, défini comme l'effort pour penser les modes de vie et les actions humaines en relation avec le climat, renoue avec ces cultures passées en faisant prendre conscience de la relation de dépendance énergétique de l'abri au climat, et plus particulièrement au soleil. On retrouve des propos analogues chez Davis et dans les témoignages de nombreux habitants des maisons bioclimatiques et solaires passives.

À la lecture des documents et manuels déjà mentionnés, il est clair que l'approche bioclimatique mobilisait un imaginaire relatif au rôle du soleil et de l'énergie solaire partiellement désacralisé, et qui était parfois présenté comme analogue à celui qui devait exister dans certains cultes ou croyances anciennes³. Lorsqu'il aborde la signification de l'orientation et le symbolisme du soleil, Olgyay évoque le fait que « [l'homme] primitif était lié au cycle du soleil et le lever du soleil bienfaisant a été honorée rituellement dans de nombreux groupes, en

1 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 17.

2 D. Simonnet, « Quarante deux maisons solaires », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, op. cit., p. 37.

3 J. Jobé, (dir.), *Le Grand livre du soleil*, Lausanne/Paris : Edita/Denoël, 1973, 314 p.

exposant les bâtiments importants vers ses rayons du levant¹. » L'approche bioclimatique et plus particulièrement la « Théorie de l'orientation air-soleil » qu'il a mis au point prolonge en un sens ce culte solaire à partir de considérations énergétiques, qui font effectivement privilégier l'orientation vers le levant (sud-est) mais pour des raisons de déphasage thermique². Les anciennes croyances relatives au soleil et l'approche bioclimatique que propose Olgyay partagent le même imaginaire et une relation symbolique analogue avec le climat : le rayonnement solaire bénéficie aux humains, qui doivent orienter leurs constructions afin qu'elles puissent profiter des apports solaires le plus régulièrement possible.

Certains manuels très diffusés, comme celui d'Anderson et Riordan, étaient illustrés de dessins mettant en scène le culte du soleil dans différentes cultures, comme les Incas ou les Hopis, qui appartiennent au groupe des Indiens Pueblos³ (*figure 145*). Présentées à chaque début de chapitre, ces illustrations manifestent cet imaginaire associé à l'utilisation de l'énergie solaire et faisaient un parallèle entre les croyances de ces cultures et l'approche bioclimatique : symboliquement, la relation à l'énergie solaire promue par l'approche bioclimatique devaient être analogue à celle qui devait exister dans ces peuples anciens. Certaines de ces illustrations ont été reproduites et diffusées en France⁴. Les constructions des Indiens Pueblos étaient également présentées comme un modèle de relation symbolique au climat⁵. Les villages Pueblos étaient divisés en sept « quartiers du monde⁶ » suivant les quatre points cardinaux, le haut, le bas et le milieu : ainsi chaque village « faisait de la localité un symbole du cosmos⁷ ». Le fait que l'orientation de ces villages unanimement considérée comme exemplaire ait été expliquée par des raisons culturelles et religieuses confirmait le fait qu'un symbolisme riche associé au climat avait guidé les bâtisseurs de ces constructions vernaculaires, et que l'approche bioclimatique devait développer un symbolisme analogue.

1 V. Olgyay, *Design with Climate*, op. cit., p. 53. Traduction personnelle, citation originale : « Early man was bound to the sun's cycle and the rise of the beneficent sun was honored ritually in many groups by facing important buildings towards its dawning rays. »

2 *Ibid.*, p. 55-58.

3 B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, op. cit., p. 10,18.

4 D. Simonnet, « Quarante deux maisons solaires », *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n° 52, op. cit., p. 36.

5 R. L. Knowles, *Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth*, op. cit., p. 111.

6 P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de terre*, op. cit., p. 31.

7 *Ibid.*

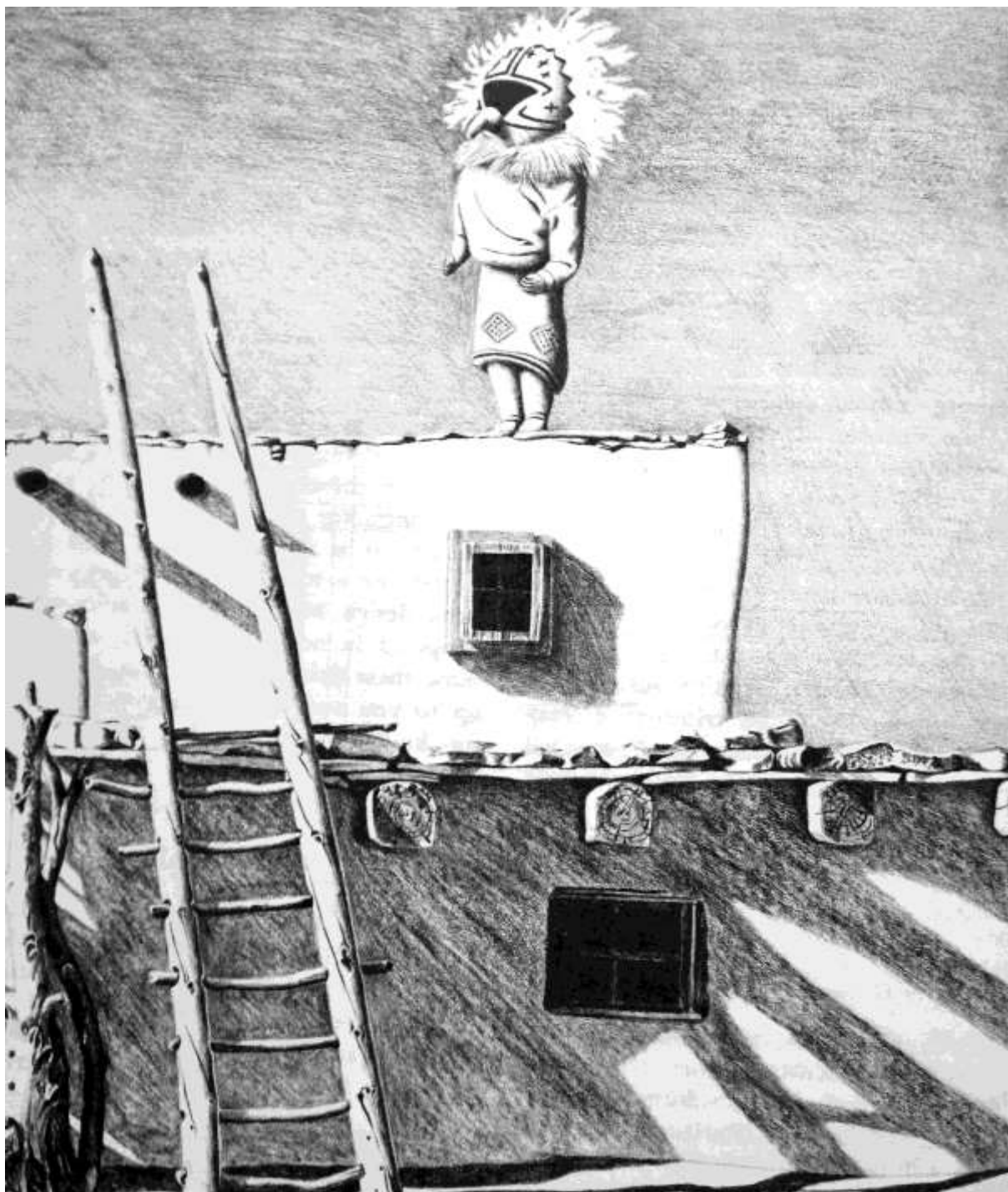


Figure 145 : *Illustration d'un kachina (esprit de la mythologie des Hopis) qui regarde le soleil depuis le toit d'Acoma Pueblo présentée dans le manuel de B. Anderson et M. Riordan.*
(B. Anderson, M. Riordan, *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, p. 18)

Si le désir d'engager un nouvel imaginaire était partagé par de nombreux architectes et habitants, les tentatives pour théoriser cet imaginaire à partir de l'approche bioclimatique ont été marginales et souvent assez naïves. Désireux de remobiliser l'imaginaire associé au soleil et aux énergies naturelles, David Wright affirme à la fin de son manuel que l'utilisation généralisée de l'énergie solaire doit aboutir à un « âge solaire¹ » et une « civilisation du soleil² » dont il entrevoit les prémices dans la conception solaire passive. Mais aucun « âge solaire³ » n'est advenu depuis et ces propos paraissent avant tout traduire la prégnance d'un imaginaire simpliste. C'est à travers ce genre d'anticipation utopique qu'on perçoit le plus nettement l'influence indirecte d'une figure comme Le Corbusier, qui était attentif à certains cycles climatiques et était soucieux de promouvoir l'importance biologique du rayonnement solaire⁴, sous couvert d'un hygiénisme revendiqué. Il avait imaginé organiser à Chandigarh « des fêtes solaires rappelant aux hommes une fois l'an qu'ils sont fils du soleil⁵ », qui auraient certainement eu leur place dans la « civilisation du soleil » rêvée par David Wright. Le Corbusier a pu influencer le bioclimatisme en développant un imaginaire associé au soleil et en insistant sur la dimension symbolique des phénomènes climatiques à travers ses écrits⁶.

Cependant, le témoignage de Davis nous montre que cette dimension symbolique de l'énergie solaire et du climat n'était pas essentiellement pensée ou théorisée, puisqu'elle était avant tout vécue et intégrée à un certain mode de vie par les habitants des maisons bioclimatiques et solaires passives. Le fait que Davis ressente la présence des nuages en fonction de la température intérieure est particulièrement significatif⁷ : il existe un sentiment de communion et de participation avec un climat local, qui exprime la certitude subjective d'être à un point-clé climatique et qui concentre l'imaginaire associé au climat. Si certains habitants des maisons solaires passives ou bioclimatiques ont eu le sentiment de retrouver une relation quasiment religieuse avec le climat et ses cycles, ce sentiment était indissociable des singularités de ces constructions. C'est ce que confirment d'autres témoignages, comme celui de Junius et Louise Eddy, qui vivaient dans une maison solaire passive située dans l'État de Rhode Island aux États-Unis (*figure 146*). Du fait de l'importance du rayonnement solaire pour

1 D. Wright, *Soleil, Nature, Architecture*, op. cit., p. 229.

2 *Ibid.*

3 *Ibid.*

4 F. De Pierrefeu, Le Corbusier, *La Maison des hommes*, Paris : Plon, 1942, p. 40-46.

5 Le Corbusier, « Le Palais de l'Assemblée », *Œuvres complètes 1952-1957*, vol. 6, Erlenbach/Zurich : Les Éditions d'Architecture, 1957, p. 94.

6 J. E. Aronin, *Climate & Architecture*, op. cit., p. 114.

7 N. Skurka, J. Naar, *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, op. cit., p. 51.

le chauffage de leur maison conçue avec un important volume de stockage, ils affirment en 1976 qu'ils sont « convaincus que le soleil [les] renouvelle, d'une manière presque religieuse¹. » Junius Eddy explique ce sentiment par l'observation quotidienne des techniques solaires passives intégrées à leur maison. Il décrit : « nous regardons dans la serre et observons les *Skylids* se fermer automatiquement, un par un et sans ordre particulier [...], et nous avons conscience de l'air chaud qui monte, de l'air froid qui se dépose² », tandis que la mise en route concomitante du système de chauffage soufflant l'air chaud du stockage de pierre « leur rappelle que la terre tourne et que le jour se termine³. » Ce sentiment quasiment religieux que le soleil les renouvelle s'incarne directement à travers l'observation des phénomènes périodiques à l'œuvre dans leur maison solaire passive, et qui suivent la variation des phénomènes climatiques à l'échelle locale comme à l'échelle cosmique.

On voit à travers ce témoignage et celui de Davis comment une relation de dépendance au climat pouvait être positivement vécue par les habitants des maisons solaires passives et bioclimatiques. Le fait que le confort thermique de leurs habitations dépende du climat et soit largement soumis à ses aléas n'était manifestement pas appréhendé comme une contrainte par ces habitants, dans la mesure où cette relation de dépendance était vécue comme symboliquement plus riche et stimulante que si leur confort reposait sur des systèmes de chauffage et de rafraîchissement conventionnels. Même si elle était fausse ou historiquement très simplifiée, l'intuition selon laquelle certaines cultures avaient vécu en phase avec le climat au point de vouer un culte aux facteurs climatiques les plus insignes comme le soleil confortait le point de vue et surtout le mode de vie de ces habitants, mais aussi de certaines architectes et ingénieurs. L'importance de la dimension symbolique associée au climat et de l'imaginaire porté par le bioclimatisme pour ces habitants, architectes ou ingénieurs, montre que la constitution d'un mode de vie dans un milieu déterminé reste « fondée sur des références purement symboliques⁴ », comme l'avait observé Leroi-Gourhan en 1965.

1 *Ibid.*, p. 129. Traduction personnelle, citation originale : « more convinced that the sun renews us, in an almost religious way. »

2 *Ibid.*, p. 130. Traduction personnelle, citation originale : « We look into the greenhouse and watch the Skylids closing automatically, one by one and in no particular order [...] and we are aware of hot air rising, cold air settling »

3 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « remind us that the earth is turning and day is ending. »

4 A. Leroi-Gourhan, *Le Geste et la parole, Tome II. La Mémoire et les rythmes*, Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1965, p. 185.



Figure 146 : *Maison solaire de Junius et Louise Eddy dans l'État de Rhode Island.*
(N. Skurka, J. Naar, *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, New York : Ballantine Books, 1976, p. 128)

Les éléments présentés précédemment confirment l'intuition simondonienne, puisqu'il apparaît que le symbolisme et l'imaginaire du bioclimatisme prolongent une relation anciennement sacrée au climat qui aurait été progressivement désacralisée. Le témoignage de Davis nous permet de comprendre comment certains habitants des maisons bioclimatiques et solaires passives ont pu avoir l'intuition d'habiter à un point-clé climatique et ont pu rechercher à ajuster leur mode de vie en fonction du climat local où ils habitaient. En donnant une signification symbolique à cet effort d'adaptation, ces habitants éprouvaient manifestement en

contrepartie une satisfaction intellectuelle dans le fait d'avoir pu ajuster leur mode de vie en fonction du climat. Les techniques solaires passives n'étaient donc pas envisagées comme de simples substituts aux systèmes de chauffage ou de rafraîchissement conventionnels, puisqu'elles engageaient directement une compréhension du climat local et mobilisaient indirectement cet imaginaire associé au climat.

Conclusion de la quatrième partie

Nous avons souhaité développer la portée philosophique de l'approche bioclimatique prise dans son ensemble suivant trois axes originaux. Cet examen nous a conduits à étudier successivement les analogies qu'elle mobilisait, son rapport aux constructions du passé, ainsi que la compréhension qualitative des possibilités climatiques qu'elle a contribué à développer. Ces trois axes nous semblent particulièrement saillants et susceptibles d'être repris aujourd'hui afin d'être développés. Nous avons vu comment l'approche bioclimatique a enrichi le problème du déterminisme climatique et comment celle-ci nous paraît susceptible d'être prolongée à travers l'étude des points-clés climatiques. Toute cette partie visait à montrer que l'approche bioclimatique partage des problèmes importants avec certaines disciplines et qu'elle peut contribuer à enrichir ces problèmes. Il nous paraissait indispensable de les développer et de montrer leur actualité, afin de comprendre le plus complètement possibles les significations de cette approche.

Nos résultats relatifs aux modes de vie des habitants des maisons bioclimatiques et solaires passives, et l'étude du symbolisme qu'ils accordaient parfois au fait d'habiter dans ce type de construction, pourraient tout à fait s'inscrire dans une « anthropologie du climat¹ », qui étudierait spécifiquement le rôle de l'architecture dans la médiation des phénomènes climatiques. Des travaux en ce sens ont déjà été réalisés par certains anthropologues². Ils nous semblent indispensables afin de résoudre le problème de la responsabilisation des habitants dans les constructions conçues pour être économes en énergie, qui jusqu'à présent a été contourné par un recours croissant à l'automatisation et à la domotique. Nos résultats demanderaient à être approfondis par une étude sociologique, qui mettrait en évidence les

1 E. Katz, A. Lammel, M. Goloubinoff, « Éléments pour une anthropologie du climat », p. 15-22 in : E. Katz, A. Lammel, M. Goloubinoff (éds.) *Entre ciel et terre. Climat et sociétés*, Paris : Ibis Press/IRD, 2002.

2 H. Subrémon, *Habiter avec l'énergie. Pour une anthropologie sensible de la consommation d'énergie*, Thèse NR de Sociologie, Université Paris 10, 2009, 419 p. Dir. P. Bonnin ; A. Guez, H. Subrémon (dir.), *Saisons des villes*, Paris : Donner lieu, 2013, 224 p.

différents « profils de militants¹ » qui habitaient ces constructions pour les comparer avec ceux des habitants des maisons écologiques actuelles.

1 A. Vrignon, « Vers une société solaire ? Réflexions et expérimentations autour d'une transition énergétique potentielle dans les années 1968 », *op. cit.*, p. 348-353 ; F. Jarrige, A. Vrignon *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, *op. cit.*, p. 301.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous avons successivement étudié les connaissances en microclimatologie et en thermique du bâtiment qui ont été intégrées à la conception bioclimatique, ainsi que l'évolution des techniques solaires passives de chauffage et de rafraîchissement jusqu'au début des années 1980. Toutes ces connaissances scientifiques et techniques ont été synthétisées avec la conception bioclimatique qui s'est largement diffusée après le premier choc pétrolier aux États-Unis et en France. Nous avons examiné les conditions de cette diffusion, les problèmes des réalisations bioclimatiques et plus généralement les contradictions de cette démarche de conception qui ont été mises en évidence au fur et à mesure qu'elle s'est développée. Ces contradictions nous paraissaient indispensables à analyser dans le but d'étudier plus précisément les significations qui ont été associées à l'emploi de la conception bioclimatique. Dans la dernière partie, nous avons essayé de montrer la portée philosophique de l'approche bioclimatique en prolongeant certaines intuitions ou notions et certains concepts qu'elle a contribué à diffuser à partir des travaux d'Olgyay. Cette analyse nous a permis de montrer que l'approche bioclimatique renouvelait la compréhension de nombreux problèmes relatifs au climat.

Au terme de cette étude, il est possible de confirmer notre hypothèse selon laquelle la conception bioclimatique serait plus qu'une méthode de conception de bâtiments économes en énergie. L'intérêt des maisons bioclimatiques construites durant la période que nous avons abordée n'était pas seulement d'économiser le recours aux techniques conventionnelles de chauffage et de rafraîchissement fonctionnant aux énergies fossiles. Ces économies étaient la confirmation qu'il est possible de concevoir des constructions qui exploitent des gisements climatiques, grâce aux techniques solaires passives et aux connaissances diffusées par l'intermédiaire de la conception bioclimatique. Elles étaient la preuve objective que le sentiment de communication avec un climat local ressenti par certains habitants des maisons bioclimatiques n'était pas seulement subjectif. Présenter la conception bioclimatique comme une course aux calories ou aux frigories¹ économisées serait la réduire à des préoccupations énergétiques et environnementales dont nous avons vu l'importance, mais qui ne permettent

1 Dans l'ancien langage des thermiciens, le terme « frigorie » désignait une calorie absorbée. La puissance des installations de refroidissement était exprimée en frigories.

pas de comprendre l'originalité de cette méthode de conception, et n'explique pas le fait qu'elle ait été mise au point avant que ces préoccupations soient véritablement popularisées. Ce résultat montre que la recherche d'économie d'énergie ne constituait pas une fin en soi.

Si l'on généralise leurs significations, ces résultats confirment également la seconde partie de notre hypothèse qui soutient que la conception bioclimatique permet une compréhension renouvelée du climat et de nos relations aux phénomènes climatiques. Ce que nous avons appelé la portée philosophique de la conception bioclimatique n'apparaît bien sûr pas dans tous les travaux que nous avons étudiés, mais elle est nettement perceptible dans les écrits les plus approfondis qui revendiquent une approche bioclimatique plus générale et croisent cette approche avec d'autres travaux relatifs au déterminisme climatique en géographie et en anthropologie. Afin de montrer la généralité de l'approche bioclimatique, nous avons néanmoins dû mobiliser d'autres travaux en philosophie des techniques, et nous avons notamment repris les notions de point-clé et de communication utilisées par Simondon pour les développer. Ces notions nous ont permis de comprendre la relation symbolique aux phénomènes climatiques véhiculée par la conception bioclimatique. Elle était concrètement vécue par certains habitants des maisons bioclimatiques qui avaient le sentiment de participer au climat local qu'ils habitaient. Tous ces éléments permettent d'expliquer pourquoi la conception bioclimatique a été définie comme « l'art de construire en harmonie avec le climat¹. »

À partir de l'ensemble de nos résultats, nous pensons que l'approche bioclimatique permet d'aborder certaines thématiques qui nous paraissent importantes, qui concernent l'actualité des techniques solaires passives, l'intérêt croissant pour le développement de techniques appropriées ou basses (*low-tech*) et les relations de ce type de techniques avec les gisements climatiques identifiés. Tout d'abord, certaines techniques solaires passives de rafraîchissement que nous avons évoquées nous paraissent intéressantes à redévelopper au regard des enjeux climatiques et énergétiques contemporains. Le réchauffement climatique global et l'augmentation de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans des agglomérations toujours en croissance posent le délicat problème de la gestion des vagues de chaleur et des canicules à venir². De nombreuses solutions sont proposées et sont localement mises en œuvre pour réduire

1 D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*, op. cit., p. 36.

2 G. Perrin, *Rafraîchissement urbain et confort d'été. Lutter contre les canicules*, Paris : Dunod, 2020, p. 3-12.

l'effet d'îlot de chaleur urbain (protections solaires, peintures claires réfléchives, forêts urbaines, fontaines...). Leur implantation peut aujourd'hui être étudiée grâce à l'amélioration considérable des outils de simulation des microclimats et des climats locaux urbains¹, sans commune mesure avec ceux disponibles à la période que nous avons examinée. Malgré la performance de ces outils, la connaissance du rafraîchissement effectivement produit par ces techniques reste imprécise : l'ordre de grandeur des phénomènes microclimatiques limite la zone de rafraîchissement produite par une forêt urbaine ou une fontaine². Bien qu'elles soient présentées comme des solutions de rafraîchissement, les peintures claires réfléchives ne rafraîchissent pas l'air intérieur des constructions : elles limitent seulement l'élévation de la température des surfaces extérieures et de l'air intérieur avec lequel elle communique.

Les alternatives aux techniques conventionnelles de climatisation à compression pour le rafraîchissement de l'air sont toujours étudiées. Parmi toutes les techniques solaires passives de rafraîchissement que nous avons évoquées, celles basées sur l'eau et son évaporation nous paraissent les plus intéressantes à développer. Givoni a orienté ses recherches dans ce sens dans les années 1990, en développant des tours ventilées où l'air est rafraîchi grâce à de l'eau finement pulvérisée³. L'utilisation de l'évaporation de l'eau pour le rafraîchissement des rues pendant les vagues de chaleur a fait l'objet d'expérimentations récentes en région parisienne⁴. Dans la lignée indirecte des travaux de Hay et d'autres expérimentations en zone tropicale, les recherches les plus abouties s'orientent vers des techniques de rafraîchissement fonctionnant par rayonnement, grâce à la circulation d'eau froide dans des panneaux étudiés pour limiter la condensation, qui permettent de produire une sensation de rafraîchissement même dans les climats tropicaux humides⁵. L'eau et ses changements d'état, dont nous avons vu l'importance dans les constructions solaires passives, semblent être au centre de nombreuses recherches actuelles sur des techniques de rafraîchissement alternatives. Parmi les techniques que nous n'avons pas évoquées, l'utilisation des brasseurs d'air intérieurs est aujourd'hui encouragée et valorisée par l'intermédiaire de la nouvelle réglementation environnementale française, qui

1 *Ibid.*, p. 36.

2 *Ibid.*, p. 75.

3 B. Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, op. cit., p. 143-145.

4 S. Parison, *Urban Materials and Evaporative Cooling for Heat Mitigation in Cities*, Thèse NR Physique, Université de Paris, Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain, 2020, 214 p. Dir. L. Royon.

5 E. Teitelbaum, K. W. Chen, D. Aviv *et. al.*, « Membrane-assisted radiant cooling for expanding thermal comfort zones globally without air conditioning », [en ligne], *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, n° 35, septembre 2020, 8 p.

devrait améliorer la prise en compte du confort d'été dans les constructions par rapport aux réglementations thermiques antérieures jugées insuffisantes¹.

Certaines techniques solaires passives de chauffage que nous avons présentées mériteraient également d'être redéveloppées compte tenu de l'actualité sanitaire. La pandémie récente et la mise en évidence de la transmission virale par aérosol² a remis au centre des préoccupations la qualité de l'air intérieur, et les problèmes posés par la dépendance de nombreuses constructions vis-à-vis de la ventilation mécanique contrôlée pour le renouvellement de l'air³. En France, les débits minimaux de renouvellement d'air pour les différentes pièces sont fixés depuis un arrêté de 1982⁴. Quand ils sont respectés, ces débits sont soigneusement régulés par l'intermédiaire de systèmes de ventilation mécanique contrôlée à simple ou à double flux, ces derniers ayant l'avantage de recycler la chaleur de l'air intérieur et de limiter les besoins de chauffage, ce qui exige des constructions de plus en plus étanches⁵ (standard *Passivhaus*). Mais cette doctrine du renouvellement d'air repose sur l'utilisation d'échangeurs thermiques et de filtres qui demandent un entretien régulier sous peine de diminuer leurs performances. Quand elle est possible, la ventilation naturelle et directe par l'ouverture de fenêtres ou d'autres ouvrants reste la solution privilégiée pour éliminer rapidement les aérosols, mais elle n'est pas réalisable toute l'année pour des raisons climatiques et entraîne d'importantes dépenses de chauffage supplémentaires en hiver. Or, les capteurs à air et les techniques de captage direct à faible inertie que nous avons présentés pourraient permettre d'assurer des débits de renouvellement d'air tout à fait satisfaisants du point de vue des exigences sanitaires, tout en apportant un air neuf préchauffé durant les périodes ensoleillées, qui permettrait de conserver des performances énergétiques satisfaisantes. Le problème du préchauffage de l'air neuf pourrait être résolu avec des capteurs à air du type de ceux que nous avons étudiés⁶. La réintroduction de ce type de technique suppose de ne plus faire reposer l'essentiel du renouvellement d'air des constructions sur la ventilation mécanique contrôlée

1 N. Cabassud (dir.), *Guide RE 2020. Éco-construire pour le confort de tous*, Bron : Cerema, 2020, p. 11.

2 J. Lu, J. Gu, K. Li *et al.* « COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020 », [en ligne], *Emerging Infectious Diseases*, 26 (7), 2020, p. 1628-1631.

3 A.M. Elsaid, H.A. Mohamed, G.B. Abdelaziz, M.S. Ahmed, « A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic », [en ligne], *Process safety and environmental protection: transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, vol. 155, 2021, p. 230-261.

4 A. Bornarel, D. Gauzin-Müller, « Confort d'été passif. Quelques solutions éprouvées », *EK*, n° 38, avril-mai 2014, p. 56.

5 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

6 Entretien avec Michel Raoust, le 21/02/2020 à Paris.

dans des bâtiments de plus en plus hermétiques¹. Ce changement de doctrine revaloriserait indirectement toutes les techniques solaires passives de chauffage.

La reprise de certaines de ces techniques solaires passives de chauffage ou de rafraîchissement pourrait tout à fait s'inscrire dans la redécouverte actuelle des « basses technologies² » ou *low-tech*. Par opposition aux *high-tech*, les *low-tech* regroupent l'ensemble des objets techniques considérés comme durables, facilement réparables et conçus pour économiser les ressources matérielles et énergétiques³. Ils constituent un compromis technique entre des exigences de performance suffisantes, de durabilité et d'économie⁴. L'attrait actuel pour les *low-tech*, n'est pas nouveau, puisque la période que nous avons étudiée était caractérisée par un intérêt analogue pour les « technologies appropriées⁵ » ou « intermédiaires⁶ » inspirées de l'ouvrage *Small is Beautiful* de Ernst F. Schumacher⁷. Une technologie était considérée comme appropriée lorsqu'elle était adaptée « aux conditions d'une situation donnée⁸ » et qu'elle était compatible « avec les ressources humaines, financières et matérielles qui environnent son application⁹. » En ce qui nous concerne, nous préférons l'expression de technologie appropriée à celle de *low-tech*, car elle insiste sur l'adaptation d'une technique aux possibilités matérielles préexistantes, et permet de juger de son intégration par référence au système écologique et social dans lequel elle s'intègre. La notion de technologie appropriée a en quelque sorte le rôle d'un rasoir d'Ockham : elle vise à concevoir des techniques qui soient appropriées à une situation et dépouillées de fonctionnalités superflues.

L'intérêt pour les *low-tech* comme pour les technologies appropriées a encouragé une relecture du patrimoine des techniques anciennes et vernaculaires de différentes cultures¹⁰, dans

1 K. Moe, *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, op. cit., p. 251.

2 P. Bihouix, *L'âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, op. cit., p. 113.

3 *Ibid.*, p. 111-168.

4 *Ibid.*, p. 141.

5 W. Rybczynski, *Paper Heroes. Un regard sur la technologie appropriée*, op. cit.

6 P. D. Dunn, *Appropriate technology: technology with a human face*, New York : Schocken Books, 1979, p. 3.

7 E. F. Schumacher, *Small is Beautiful. A Study of Economics as If People Mattered*, Londres : Blond & Briggs, 1973, 288 p.

8 Canadian Hunger Foundation/Brace Research Institute, *A Handbook on Appropriate Technology*, Ottawa : Canadian Hunger Foundation/Brace Research Institute, avril 1979, n. p.

9 *Ibid.* Traduction personnelle, citation originale : « Appropriate Technology is technology which is most suitably adapted to the conditions of a given situation. It is compatible with the human, financial and material resources which surround its application. »

10 L. Kahn, *Habitats. Constructions traditionnelles et marginales*, Paris : Alternative et Parallèles, trad. et adaptation de l'anglais par P. GAC, 1979, 222 p.

le but de redécouvrir des techniques appropriées qui étaient souvent présentées comme dépassées ou archaïques par l'histoire des techniques conventionnelle¹. Baer estime que si un objet technique actuel paraît inapproprié ou superflu, une solution pour le substituer consiste à « remonter dans le temps avant que l'objet suspect ne soit inventé et n'utiliser que des choses construites avant cette époque². » Il s'inspire lui-même des moteurs à gravité et à air conçus au XIX^e siècle pour concevoir certaines techniques solaires passives³ et considère, comme d'autres promoteurs des technologies appropriées, qu'une technique ancienne n'est pas pour autant dépassée. L'approche bioclimatique s'inscrit dans cette relecture du patrimoine des techniques, comme nous l'avons vu. Elle a systématisé l'étude des constructions vernaculaires selon la fonction climatique des éléments, afin de déterminer si les techniques mises en œuvre dans ces constructions étaient climatiquement appropriées, indépendamment de leur ancienneté. Elle a contribué à réhabiliter certaines techniques, comme la construction en brique de terre crue. L'argumentation utilisée par Fathy pour démontrer que cette technique est appropriée aux constructions rurales en Haute-Égypte, dont les plus anciennes ont près de 4 000 ans⁴, est caractéristique des travaux sur les technologies appropriées :

« Les techniciens veulent un matériau fort à l'excès. La brique de terre peut résister à une pression de 15 kg au cm², or elle n'est pas exposée à plus de 2 kg de pression au cm² dans les bâtiments ruraux. Pourquoi donc ajouter quoi que ce soit afin qu'elle supporte 60 kg au cm² ? Puisqu'on n'a pas besoin de ça, pourquoi introduire une résistance au-delà de ce que l'on peut obtenir simplement et qui suffirait⁵ ? »

La mise au point de technologies appropriées ou de *low-tech* consiste à étendre le raisonnement de Fathy à d'autres techniques et objets techniques : le but n'est pas d'obtenir des performances maximales, mais de produire des performances suffisantes et appropriées à chaque problème dans chaque situation. Dans la mesure où l'ajout de chaînages en acier dans une construction

1 C. Carles, T. Ortiz, E. Dussert (dir.), *Rétrofutur. Une contre-histoire des innovations énergétiques*, Paris : Buchet Chastel, 2018, p. 6-13.

2 *Ibid.*, p. 77-78.

3 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 25. Traduction personnelle, citation originale : « to go back in time before the suspect item was invented and use only things constructed before that time. »

4 H. Fathy, « De l'implicite en architecture », p. 16 in : A. Ravéreau, M. Roche, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, op. cit.

5 *Ibid.*

en terre crue pour améliorer sa résistance « ne résout pas de problèmes mais en crée¹ », la conception de technologies appropriées doit s'efforcer de maintenir la cohérence d'une technique par rapport à la situation où elle doit être utilisée. Actuellement, le développement des techniques de construction traditionnelles en paille, en terre ou en pierre se heurte encore aux exigences de performance structurelle déjà dénoncées par Fathy il y a plus de cinquante ans². Cependant, l'intérêt actuel pour le *low-tech* et la conception bioclimatique en architecture pourrait faire évoluer ces exigences réglementaires et permettra peut-être de redécouvrir d'autres techniques anciennes et appropriées à notre époque.

Les perspectives technologiques que nous avons évoquées permettent d'aborder une autre thématique. Nous avons vu que l'approche bioclimatique a systématisé l'étude des gisements climatiques dès le milieu des années 1970 et a confirmé certaines évidences qui nous semblent indispensables à rappeler : il existe de profondes disparités climatiques entre les climats locaux et régionaux d'un même pays. Les gisements climatiques ne sont pas également distribués sur un territoire et certaines localités concentrent des points-clés climatiques. L'inégale distribution des gisements climatiques constitue une évidence à l'heure de la multiplication des convertisseurs d'énergies renouvelables (photovoltaïques, éoliennes...) et justifie qu'ils se concentrent là où ces gisements sont les plus abondants. Baer rappelle en 1975 que les « réponses aux problèmes énergétiques sont différentes selon les régions du pays³ », ce qui oblige à adapter les techniques aux « problèmes locaux spécifiques⁴ ». Cette évidence prend une autre signification si l'on considère que ces disparités climatiques peuvent tout à fait s'accroître dans le futur. Par exemple, le climat local des principales agglomérations françaises va évoluer très différemment sous l'action du réchauffement climatique global, et les agglomérations à proximité des côtes vont être considérablement moins affectées par l'augmentation de l'effet d'îlot de chaleur urbain que celles situées dans les zones semi-continrentales ou montagneuses, toutes choses égales par ailleurs⁵. L'inégal potentiel de

1 *Ibid.*

2 G. Perraudin, *Construire en pierre de taille aujourd'hui*, Dijon : Les Presses du réel, (coll. Architecture), 2013, p. 36.

3 S. Baer, *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, op. cit., p. 21. Traduction personnelle, citation originale : « The answers to energy problems are different for different parts of the country. »

4 *Ibid.*, p. 21. Traduction personnelle, citation originale : « working on products for specific local problems »

5 T. Gardes, R. Schoetter, J. Hidalgo *et. al.*, « Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities », [en ligne], *Science of the Total Environment*, vol. 737, octobre 2020, p. 14.

rafraîchissement naturel dans ces différentes agglomérations risque de s'accroître et cette évolution pourrait affecter d'autres gisements climatiques importants.

Le constat d'une répartition inhomogène des gisements climatiques, et d'une éventuelle accentuation de cette inhomogénéité sous l'action du changement climatique global, conteste la tendance qui consiste à uniformiser des solutions techniques sur un territoire considéré comme climatiquement homogène. Cette tendance à l'uniformisation des techniques par la négligence des différences climatiques régionales ou locales est remise en question dans d'autres domaines. Elle est par exemple critiquée en agriculture par les travaux en agroécologie qui contestent l'uniformisation des pratiques agricoles. Les agronomes Claude et Lydia Bourguignon parlent de la « vocation¹ » agricole des sols : ils insistent sur le fait qu'il existe des terrains nettement plus favorables à l'agriculture de certaines variétés et qu'en ce sens tous les lieux ne se valent pas². L'agroécologie, qu'ils nomment « agrologie³ », consiste à étudier la vocation des différents sols et à proposer des pratiques agricoles qui soient en accord avec les spécificités des sites cultivés (climat, topographie, géologie...). En ce sens, il existe une profonde analogie avec l'étude des gisements climatiques que nous avons évoquée : l'agroécologie est à l'agriculture ce que l'approche bioclimatique est à l'architecture. De la même manière que l'agroécologie examine la vocation des sols par référence à des besoins alimentaires, l'approche bioclimatique étudie la vocation des climats par référence à des besoins de confort⁴.

Le fait que des travaux de domaines différents convergent vers des résultats analogues, et montrent qu'il est nécessaire de reprendre en compte les disparités climatiques et territoriales afin de mieux adapter nos choix techniques nous semble très important. En plus de s'appuyer sur la vocation des sols, l'agroécologie oriente les pratiques agricoles vers la mise en place d'un climax, qui désigne en écologie « le stade évolutif ultime d'équilibre entre le climat, le sol et les espèces qui y vivent⁵ ». Elle postule qu'il existe un mode de culture optimal pour chaque sol et chaque climat local⁶. On entrevoit ici une autre analogie entre l'agroécologie et l'approche

1 C. Bourguignon, L. Bourguignon, *Manifeste pour une agriculture durable*, Arles : Actes Sud, 2017, p. 53.

2 L. Bourguignon, C. Bourguignon, *Le Sol, la terre et les champs. Pour retrouver une agriculture saine*, [1ère éd. 1989], Paris : Sang de la Terre, 2015, p. 190.

3 *Ibid.*, p. 12-13.

4 Le principal problème consiste à fixer la nature de ces besoins. Voir : P. Bihouix, « Remettre en cause les besoins », *L'âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, *op. cit.*, p. 114-125.

5 F. Bucaille, *Revitaliser les sols. Diagnostic, fertilisation, protection*, Paris : Dunod, 2020, p. 85 ;

6 C. Bourguignon, L. Bourguignon, *Le Sol, la terre et les champs. Pour retrouver une agriculture saine*, *op. cit.*, p. 99-101.

bioclimatique. Comme nous l'avons vu, l'approche bioclimatique postule qu'il existe des choix techniques optimums adaptés à chaque climat local en fonction des gisements climatiques disponibles et qu'il existe une forme de connaturalité entre le milieu naturel et certaines techniques. Sur la base de travaux en écologie scientifique et en microclimatologie, ces deux disciplines considèrent qu'il existe des choix techniques optimums pour chaque climat local et que le concepteur doit s'efforcer de réduire l'écart entre les choix qu'il effectue et cet état optimal qui peut être objectivement analysé. En ce sens, un choix technique inapproprié, qu'il soit agricole ou architectural, s'écarte de cet état optimal. L'agroécologie et l'approche bioclimatique peuvent être considérées comme deux approches analogues qui étudient la vocation des milieux naturels par référence à des besoins humains.

On peut légitimement se demander s'il existe des régions dépourvues de gisements climatiques. Selon l'approche bioclimatique, il existe effectivement des zones où les possibilités de chauffage ou de rafraîchissement grâce aux techniques solaires passives sont faibles. Mais cette inégalité peut par exemple être compensée par une géologie plus favorable : de nombreuses régions en France bénéficiant d'un gisement solaire faible (Paris, Metz...) possèdent d'importantes ressources géothermiques pour le chauffage des constructions¹. Cependant, l'étude de l'inégal accès aux gisements climatiques de chauffage ou de rafraîchissement au sein d'un même pays ou d'une même région peut constituer un problème « d'équité bioclimatique² », selon l'expression de Robert Célaire³. L'étude de l'équité bioclimatique vise à analyser les disparités climatiques nationales et régionales afin de les compenser par la mobilisation d'autres ressources. Elle peut s'appliquer à l'échelle d'un même quartier, voire d'une même construction. Par exemple, dans un bâtiment mal isolé, la surconsommation pour le chauffage d'un logement situé au dernier étage peut dépasser 50 % par rapport à la moyenne des autres logements, toutes choses égales par ailleurs⁴. L'équité bioclimatique voudrait que les dépenses engendrées par la morphologie défavorable des logements sous toiture soient compensées d'une manière ou d'une autre, ou qu'elles soient mieux anticipées lors de la conception.

1 P. De Wever, H. Martin, *L'Énergie de la Terre*, Les Ulis : EDP Sciences, (coll. Terre à portée de main), 2017, p. 73.

2 C. Gaillard, « Le climat est-il une ressource ? Perspectives historiques à partir de la conception bioclimatique en architecture », *op. cit.*, p. 7-10.

3 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

4 J.-P. Traisnel, P. Merlin, *Énergie, environnement et urbanisme durable*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1996, p. 96.

La prise en compte de l'équité bioclimatique au sein d'une même construction peut constituer un enjeu de santé publique : pendant la canicule de 2003, on a remarqué que la surmortalité dans les maisons de retraite en France avait été plus importante pour les résidents ayant une chambre aux étages ou sous les toits souvent mal isolés, qui étaient considérablement plus exposées au rayonnement solaire direct que celles situées aux étages inférieurs¹. Au sein d'un même bâtiment, les effets d'une vague de chaleur peuvent être vécus très différemment en fonction de l'orientation du logement, de son exposition, de sa hauteur, de son aménagement intérieur et de la vulnérabilité des personnes qui l'habitent. L'étude de l'équité bioclimatique des constructions vise à anticiper et à compenser les inégalités de confort thermique produites à l'intérieur d'un même bâtiment, en privilégiant le recours à des techniques passives² (protections solaires, traitement des surfaces...). Il s'agit d'un enjeu crucial pour affronter les vagues de chaleur et les canicules à venir, qui dépasse la simple rénovation énergétique des logements.

Tous ces développements témoignent de l'actualité de l'approche bioclimatique et des concepts qu'elle a contribué à diffuser. Cependant, nous n'avons pas pu aborder dans notre travail les évolutions les plus récentes de la conception bioclimatique en architecture qui resteraient à étudier. Une évolution majeure est l'introduction progressive de l'analyse du cycle de vie (ACV), qui permet d'évaluer l'impact environnemental global d'un bâtiment au cours de l'ensemble de son cycle de vie³, de l'extraction des ressources et des matières premières nécessaires à sa construction jusqu'à leur traitement final sous forme de déchets (incinération, enfouissement, recyclage...). À partir d'un inventaire des émissions et des extractions, cette méthode permet entre autres d'estimer quantitativement l'impact climatique indirect d'un choix technique, selon les émissions de gaz à effet de serre qu'il induit sur l'ensemble de son cycle de vie (en équivalent CO₂ par unité de surface ou de volume⁴). Certains architectes et ingénieurs que nous avons évoqués étaient attentifs à l'impact énergétique et environnemental des matériaux qu'ils utilisaient, mais ils n'étaient pas en mesure de quantifier l'impact indirect de

1 G. Perrin, *Rafraîchissement urbain et confort d'été. Lutter contre les canicules*, op. cit., p. 96.

2 Entretien avec Robert Célaire, le 18/07/2020 à Lambesc.

3 O. Jolliet, M. Saadé, P. Crettaz, S. Shaked, *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, [1ère éd. 2005, 2e éd. rev. et augm. 2010], Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, (coll. Développement durable), 2010, p. 7-11.

4 P. Rizzotti (dir.), *L'Empreinte d'un habitat. Construire léger et décarboné*, Paris : Pavillon de l'Arsenal, 2021, 63 p.

leurs choix techniques, qui est aujourd'hui facilité grâce à la mise au point de bases de données de plus en plus complètes. L'introduction de l'analyse du cycle de vie pour la conception architecturale constitue une évolution majeure qui complète la conception bioclimatique : elle montre qu'une construction ne modifie pas seulement le microclimat du site où elle est construite, mais participe plus ou moins fortement au forçage radiatif global sur l'ensemble de son cycle de vie. Alors que la conception bioclimatique permet de résoudre des problèmes architecturaux et techniques par référence à des facteurs ou des éléments climatiques directs, l'analyse du cycle de vie permet de concevoir par référence à d'autres facteurs climatiques dont l'influence n'est qu'indirecte.

Une étude épistémologique des connaissances et des techniques mobilisées par l'analyse du cycle de vie depuis la mise au point de cette méthode dans les années 1980¹ reste à faire. Elle devrait s'intéresser à l'émergence de cette notion de cycle de vie appliquée aux objets inertes, qui apparaît déjà dans les travaux en écologie du début du XX^e siècle qui analysent le cycle des éléments chimiques et biogéochimiques², qui seront systématisés dans les années 1960 par les frères Odum³. L'analyse du cycle de vie reprend vraisemblablement des notions, des concepts et des méthodes empruntés à l'écologie scientifique. Elle repose également sur des techniques de quantification des émissions de gaz à effet de serre issus de la chimie qui ont dû être progressivement affinées et qui pourraient être étudiées selon les méthodes de l'épistémologie historique. La compréhension de ces techniques nous paraît cruciale, car elles sont au cœur de la quantification en équivalent CO₂, qui est devenue une nouvelle « unité de mesure⁴ » aujourd'hui quotidiennement utilisée pour la promotion de nombreux produits et dont l'emploi risque d'être encore généralisé à l'avenir. La quantification en équivalent CO₂ et l'analyse du cycle de vie possèdent d'importantes implications politiques et économiques qu'il faudrait étudier en détail, puisqu'elles justifient des mesures de compensation écologique souvent obscures⁵, voire infondées scientifiquement⁶.

1 O. Jolliet, M. Saadé, P. Crettaz, S. Shaked, *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, op. cit., p. 4.

2 J.-P. Deléage, *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*, op. cit., p. 210-215.

3 E. P. Odum, *Écologie. Un lien entre les sciences naturelles et les sciences humaines*, Montréal : HRW, trad. de l'américain par R. Bergeron, 1976, 91-122.

4 B. Bensaude-Vincent, S. Loeve, *Carbone. Ses vies, ses œuvres*, Paris : Seuil, (coll. Science ouverte), 2018, p. 207.

5 B. Dauguet, *Mesures contre nature. Mythes et rouages de la compensation écologique*, Caen : Grévis, (coll. Enquêtes politiques), 2021, 300 p. « d »

6 B. Bensaude-Vincent, S. Loeve, *Carbone. Ses vies, ses œuvres*, op. cit., p. 213-219.

Mais pour être complète, une étude épistémologique de l'analyse du cycle de vie devrait aussi analyser l'imaginaire initialement associé à cette notion. Comme l'approche bioclimatique, on peut faire l'hypothèse que l'analyse du cycle de vie mobilisait à son origine tout un symbolisme quasiment religieux associé aux cycles : les chercheurs de l'Université du Minnesota qui étudiaient le bouclage des cycles biogéochimiques au début des années 1970 à travers le recyclage de l'eau et des déchets avaient nommé leur centre de recherche « Ouroboros¹ », en référence au symbole mythique du serpent qui se mord la queue. Les chimistes qui travaillaient sur ces sujets dans l'État du Massachusetts à la même période se présentaient comme de « nouveaux alchimistes² ». Les expérimentations qu'ils menaient sur le cycle de vie des déchets en aquaculture au sein du New Alchemy Institute qu'ils avaient créé ont été internationalement diffusées dans les années 1970³. La recherche du recyclage grâce à une meilleure compréhension du cycle de vie des éléments mobilisait des références mythiques. On peut supposer que ces références apparaissent indirectement dans la mise au point de l'analyse du cycle de vie.

Toutes ces idées ne sont que des hypothèses et demanderaient à être approfondies. Comme pour la conception bioclimatique, nous pensons que de nombreuses méthodes de conception jugées analytiques et souvent associées à l'ingénierie recèlent des significations qui dépassent leur stricte utilité. Au terme de cette étude, nous espérons avoir pu démontrer l'actualité de l'approche bioclimatique et des concepts qu'elle a contribué à diffuser. Ils nous paraissent susceptibles d'aider à appréhender plus sereinement le changement climatique global qui est en cours, qui opère une redistribution rapide des gisements climatiques et suppose que l'on anticipe les technologies appropriées qui nous permettront de les exploiter. Nombre d'entre elles existent ou ont existé sous d'autres latitudes, et ne demandent qu'à être reprises et améliorées. Pour un scénario d'émission probable, certains modèles anticipent qu'à l'horizon 2050 le climat local des principales villes du monde se sera déplacé d'environ 1 000 km en direction des pôles⁴ : le climat de Londres sera analogue à celui de Barcelone aujourd'hui,

1 R. Merrill, T. Gage (éds.), *Energy Primer: Solar, Water, Wind, and Biofuels*, [1ère éd. 1974, 2e éd. rev. et augm. 1978], New York : Dell Publishing, 1978, p. 96.

2 J. Todd, « The New Alchemists », p. 149-165 in : J. Baldwin, S. Brand (éds.), *Soft-Tech*, *op. cit.*

3 R. Chareyre, *La Maison autonome*, *op. cit.*, p. 170-171.

4 J.-F. Bastin, E. Clark, T. Elliott, *et. al.* « Understanding climate change from a global analysis of city analogues », [en ligne], *PLoS ONE*, 14(7), 2019, p. 1.

tandis que Madrid aura le climat actuel de Marrakech¹. Si les climats se déplacent, pourquoi les techniques jadis appropriées à ces climats ne les suivraient-elles pas ? En montrant comment les vocations des climats ont été comprises par le passé, nous espérons que ce travail contribue à comprendre et à anticiper leurs vocations futures.

1 L'architecte Philippe Rahm parle de « glissement climatique » pour décrire ce phénomène, voir : P. Rahm, « Glissement climatique : quel avenir pour les villes face aux canicules ? » [en ligne], *in* : *AOC*, 10 sept. 2020, [consulté le 02/01/2022], disponible à l'adresse : <<https://aoc.media/opinion/2020/09/09/glissement-climatique-quel-avenir-pour-les-villes-face-aux-canicules/>>

BIBLIOGRAPHIE

Sources d'archives :

Archives personnelles de Michel Gerber – Treilles :

- Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société (éd.), *Énergies nouvelles et développement régional. Compte-rendu intégral du colloque, Castres 12-18 juin 1978*, Paris : Applications de Recherches sur l'Énergie et la Société, 1980, 111 p.
- Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, *Les Échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement. Compte-rendu du colloque, Lyon 6-8 avril 1976*, s. l. : Association Française pour l'Étude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, 1980, n. p.
- BALCOMB, D., ANDERSON, B. *Passive Solar Design Hanbook (Draft)*, Washington : US Department of Energy, avril 1979, n. p.
- BELLANGER, M., LE PAPE, G. *Microclimat et maisons solaires*, Montréal : Université de Montréal, n. d., 116 p.
- BILGEN, E., CAMOUS, R., TROMBE, F. *Chauffage solaire et climatisation solaire des bâtiments*, Montréal : École Polytechnique/Université de Montréal, 1977, n. p.
- Commission des Communautés européennes (éd.) *Architecture solaire. Solar architecture. Compte-rendu de la Conférence Internationale tenue à Cannes, France, du 13 au 16 décembre 1982*, Paris : Technique et documentation-Lavoisier/American Solar Energy Society, 1982, 620 p.
- *Actualités-Documents. Service d'information et de diffusion*, « Énergies nouvelles : l'énergie solaire », n° 110, mars 1976, 57 p.
- KELLER, H. M. (éd.) *Passive Solar Heating and Cooling Conference and Workshop Proceedings. May 18-19 1976, University of New-Mexico, Albuquerque, New Mexico*, Los Alamos : Los Alamos Scientific Laboratory, 1976, 355 p.
- LAVIGNE, P. *Énergie, climat, confort thermohygrométrique, soleil et architecture*, 2 vol., Thèse de doctorat en architecture, Unité Pédagogique d'Architecture de Grenoble, 187 + 257 p. Dir. inconnu.
- LEBENS, R. M., BIRCH, H. J. *An Investigation of Passive Solar Heating and Cooling Work in Europe*, s. l., 1979, 74 p.
- *Les Techniques de captation, d'échange et de régulation des apports solaires dans l'habitat, Collioure, 8 et 9 mai 1980*, Paris : Plan Construction, 1980, n. p.
- LÖHNERT, G. *Solararchitektur in Frankreich. Exkursionsbericht 1983*, Berlin : Technische Universität, 1983, 67 p.
- LUDEWIG, G., KRUSENBAUM, H. *Solararchitektur in Frankreich. Exkursionsbericht 1982*, Berlin : Technische Universität, 1982, 201 p.
- NICOLAS, F. VAYE, M. *Recherches sur les enveloppes bioclimatiques*, Paris : Plan Construction, mars 1977, 110 p.
- ORTEGA, A., RYBCZYNSKI, W., AYAD, S. *et. al. The Ecol Operation. Ecology + Building + Common Sense*, Montréal : McGill University, 1972, 100 p.
- ROBERT, J. F., CAMOUS, R., SCHNEIDER, F. *Constructions solaires passives européennes*, Paris : CNRS/COMES/PIRDES, 1979, n. p.
- *Solar Use Now - A Resource for People: Extended Abstracts. 1975 International Solar Energy Congress and Exposition July 28-August 1, 1975, University of California, Los Angeles, California, USA*, Washington : Energy Research & Development Administration, 1975, 540 p.

- United Nations Educational and Scientific Organization, North East London Polytechnic (éds.), *International Conference & Exhibition on Solar Building Technology. Provisional Conference Proceedings, London, July 25-29, 1977 at The Royal Institute of British Architects*, 2 vol., Paris/Londres : UNESCO/NELP, 1977, n. p.
- YANDA, W. F. *Solar Sustenance Project. Phase II, Final Report*, Albuquerque : New Mexico Energy Institute, 1977, 29 p.

Archives personnelles de Georges Wursteisen – Cabestany :

- BAZAN, P., WURSTEISEN, G. *L'Architecture solaire passive aux U.S.A., Californie et Nouveau Mexique*, s.l., 1979, n. p.
- BOWEN, A., CLARK, E., LABS, K. (eds.), *Proceedings of the International Passive and Hybrid Cooling Conference, Miami 1981*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1981, 1052 p.
- GANDEMER, J., GUYOT, A. *La Protection contre le vent. Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques*. Paris : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, juin 1981, 132 p.
- New Alchemy Institute, *Journal of The New Alchemists, Special Report: The Village as Solar Energy*, n° 7, Brattleboro : The Stephen Greene Press, 1981, 176 p.
- SMITH, T., PORTER BUTLER, L. *The Energy Producing House*, Tahoe City : auto-édition, 1978, 52 p.
- *Southwest Bulletin New Mexico Solar Energy Association*, vol. 3, n°2, décembre 1978, 15 p.
- Total Environmental Action (éd.), *Solar Energy Home Design in Four Climates*, Harrisville : Total Environmental Action, 1975, 197 p.

Archives personnelles de Jean Bouillot – Poiseul-La-Ville-Et-Laperrière :

- AULICIEMS, A., SZOKOLAY, S. V. *Thermal Comfort. Design Tools and Techniques. PLEA Notes n°3*, Brisbane : PLEA/University of Queensland, 1997, 63 p.
- COOK, J. « Shifted latitudes and other last Olgyay concepts », p. 149-154, in : SZOKOLAY, S. V. (éd.), *Sustaining the future: Energy-Ecology-Architecture. Proceedings of the PLEA '99 conference, Brisbane, September 22-24*, Vol. 1, Brisbane : PLEA, 1999.
- MANSY, K., « Back to Olgyay, basic forms of houses revisited », p. 975-978, in : PEREIRA, F. O., RÜTHER, R., SOUZA, R. V. et. al. *PLEA 2001: Renewable Energy for a Sustainable Development of the Built Environment. Proceedings of the PLEA 2001 Conference. 7 to 9th November 2001 – Florianópolis – Brazil*, Vol. 2, s. l. : PLEA, 2001.
- WATSON, D. « Who was the first solar architect? », p. 213-215, in : MALDONADO, E., YANNAS, S. (éds.), *Environmentally Friendly Cities. Proceedings of Passive and Low Energy Architecture, 1998, Lisbon, Portugal, June 1998*, Londres : James & James, 1998.

Archives personnelles de Frédéric Nicolas – Apt :

- *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « Sun Power », n°15, mai 1976, 7 p.
- *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « Énergie solaire et architecture », n°22, mars 1977, 8 p.
- *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « Architecture et technique solaire : vers la réconciliation. Les Recherches américaines », n°25, juin 1977, n. p.
- *Supplément au Bulletin d'Information Inter-Établissements*, « À l'heure solaire », n°46, 1980, n. p.

Archives personnelles de Roger Dabat (Archives départementales des Bouches-du-Rhône) – Marseille :

FOND 89J230

- Atelier 9, Groupe A.B.C., CSTB, *La Plage du Prado, conception et aménagement en fonction du vent*, Marseille : Secrétariat à l'expansion de la ville de Marseille, 1975, n. p.
- CASALONGA, P. *Plan de développement énergétique de Tavira*, Dossier d'avant-projet, octobre 1979, n. p.
- CASALONGA, P., LORENZI, P.-H., LUCCIONI, X. *Architecture solaire en Corse. Données et réflexions*, Sèvres : Société d'Éditions Claude, 1979, 64 p.
- GANDEMER, J., GUYOT, A. *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Guide méthodologique et conseils pratiques*. Paris : Ministère de l'Équipement/Ministère de la Qualité de vie, décembre 1976, 130 p.

Archives personnelles de Daniel Overbey – Indiannapolis (U.S.A.) :

- HAY, H. R. « 100 % Natural Thermal Control », p. 532-545 in : *Passive and Low Energy Ecotechniques. The Third International PLEA Conference, Mexico City, Mexico, 6-11 August 1984*, s. l. : PLEA, 1984.
- MARLATT, W. P., MURRAY, K. A., SQUIER, S. E. *Roof Pond Systems*, Canoga Park : Energy Technology Engineering Center, 1984, n. p.

Archives personnelles de Michel Raoust – Paris :

- *Concours 5000 Maisons Solaires – Annexes*, Paris : Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, 1979, 63 p.
- CLAUX, P., PESSO, A., RAOUST, M. *Votre maison solaire Aubea. Guide d'utilisation*, s.l.n.d., 16 p.

Archives personnelles de Françoise Monchoux – Toulouse :

- *Project Monitor*, n°7, juin 1987, 8 p.
- *Project Monitor*, n°30, octobre 1988, 8 p.

Archives personnelles de Robert Célaire – Lambesc :

- CÉLAIRE, R., DIAZ-PEDREGAL, P., IZARD, J-L. *Méthode B-Sol. Calcul du coefficient volumique des besoins de chauffage des logements*, s.l., 1985, n. p.

Archives personnelles de David Roditi – Perpignan :

- RODITI, D. *Autobiographie*, s. l. n. d., n. p.

Archives du Groupe A.B.C. (École d'architecture de Marseille-Luminy) – Marseille :

- AIA Research Corporation (éd.) *A Survey of Passive Solar Buildings*, Washington : U.S. Department of Housing and Urban Development/U.S. Department of Energy, 1978, 173 p.
- ALLEN, R. (éd.) *Proceedings of the Solar Heating and Cooling for Building Workshop, Washington, D. C., March 21-23, 1973. Part 1 : Technical Sessions*, Washington : National Science Foundation, 1973, 187 p.
- ARZOUMANIAN, V., BARDOU, P. *Analyse critique de l'intégration de l'énergie solaire à l'architecture*, Thèse 3^e cycle Architecture, Unité Pédagogique d'Architecture de Marseille-Luminy, juillet 1978, 203 p. Dir. IZARD, J.-L.
- CHINIARA, P., IZARD, J.-L., LONG, J.-P., *Étude d'une maison solaire*, École d'Architecture Marseille-Luminy/Groupe A.B.C., mai 1971, 52 p.
- « Climatic Summary of Ohio », *Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, septembre 1949, p. 18-36.
- FROMMES, B. (dir.). *Connaissances fondamentales de climatologie en urbanisme et en architecture*. Luxembourg : FIHUAT, 1980, 122 p.
- Groupement des Ateliers Méditerranéens d'Urbanisme, *Caractère méditerranéen. Étude des caractéristiques générales d'un urbanisme méditerranéen en Provence : Conclusions*, Marseille : auto-édition, décembre 1969, 19 p.
- Groupe A.B.C. « Conception d'une architecture et d'un urbanisme adaptés au milieu méditerranéen », *Options méditerranéennes*, n°13, juin 1972, p. 94-102.
- HAYES, J., SNYDER, R. (éds.), *Passive Solar 1980 : Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, October 19-26, 1980, Amherst, Massachusetts*, 2 vol., Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1981, 1409 p.
- IZARD, J.-L. *Le Gisement solaire et le projet d'architecture*, s.l.n.d, 369 p.
- MILLER, H., RIORDAN, M., RICHARDS, D. (éds.), *Passive Solar Takes Off: Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference: January 11-13, 1979, San Jose, California*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1979, 962 p.
- *Architecture climatique. Actes du colloque. Collioure 16, 17 et 18 mai 1979*, Paris : Plan construction, 1979, 300 p.
- PROWLER, D., DUNCAN, I., BENNETT, B. (éds.), *Passive Solar State of the Art: Proceedings of the 2nd National Passive Solar Conference, March 16-18, 1978, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania*, 3 vol., Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1978, 949 p.
- QUINTRAND, P., DABAT, R. *Note sur la création d'un laboratoire de recherche et d'expérimentation pour l'habitat humain en milieu méditerranéen*, photocopié, Marseille, mars 1969, 10 p.
- SIPLE, P. A. « American Climates », *Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, septembre 1949, p. 17-18.

Archives du L.A.B. (École d'architecture de Toulouse) – Toulouse :

- ALEXANDROFF, G., ALEXANDROFF, J.-M. *Intégration des énergies naturelles à l'habitat*, 2 tomes, rapport pour le Plan Construction, Ministère de l'Équipement, 1978, 194 + 171 p.
- Centre National de la Recherche Scientifique (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, Montlouis, 23-28 juin 1958*, [1ère éd. 1961], Paris : Centre National de la Recherche Scientifique, 1976, 738 p.
- École d'Architecture de Toulouse, COMES (éds.), *2^e Colloque Habitants de Maisons Solaires. Toulouse, 19-20 juin*, s. l., 1982, n. d.
- FRANTA, G. E., OLSON, K. R. (éds.) *Solar Architecture. Proceedings of the Aspen Energy Forum 1977, May 27, 28 and 29, 1977, Aspen, Colorado*, Ann Arbor : Ann Arbor Science, 1978, 331 p.
- GERBER, M., FAURE, M., TJOYAS, M., GERBER, M. *Architecture régionale et architecture solaire*, rapport pour le Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, Direction de la construction, 1979, 52 p.
- PÉNICAUD, H. *Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments*, Paris : Plan Construction/R.A.U.C., 1978, n. p.
- SOUM, J., CABANNES, B., CHÂTELET, A. *Étude du comportement thermique d'été d'un bâtiment avec serre accolée*, Toulouse : Laboratoire d'Architecture Bioclimatique, novembre 1985, 9 p.

Archives des Nations Unies [en ligne] <<https://digitallibrary.un.org/>> :

- United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 4, Solar Energy : I, New York : United Nations, 1964, 665 p. Archive E_CONF.35_5, <<https://digitallibrary.un.org/record/3824017?ln=fr>> [consulté le 10/06/2020]
- United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 5, Solar Energy : II, New York : United Nations, 1964, 423 p. Archive E_CONF.35_6, <<https://digitallibrary.un.org/record/3824018?ln=fr>> [consulté le 10/06/2020]
- United Nations (éd.) *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, vol. 6, Solar Energy : III, New York : United Nations, 1964, 454 p. Archive E_CONF.35_7, <<https://digitallibrary.un.org/record/3833582?ln=fr>> [consulté le 10/06/2020]

Archives de l'UNESCO/UNESDOC [en ligne] <<https://unesdoc.unesco.org/>> :

- *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973, « The Sun and Life », Paris : UNESCO, 1973. Archive n° 006933 – UNESCO.SUB.NS.81 / B1-B46* <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000006933?posInSet=4&queryId=5e223c9a-83cf-40c2-963b-bfce10ede3fa>> [consulté le 03/12/2019]

- *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973, Paris : UNESCO, 1973. Archive n° 130007 – UNESCO.SUB.NS.81 / E101-E146,* <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130007?posInSet=3&queryId=5e223c9a-83cf-40c2-963b-bfce10ede3fa>> [consulté le 03/12/2019]

- *Proceedings of the International Congress on the Sun in the Service of Mankind, UNESCO House, Paris, 2-6 juillet 1973, Paris : UNESCO, 1973. Archive n° 130008 – UNESCO.SUB.NS.81 / EH51-EH100,* <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130008?posInSet=2&queryId=5e223c9a-83cf-40c2-963b-bfce10ede3fa>> [consulté le 03/12/2019]

Sources imprimées :

- ABBRUSSESE, M. G. *Climate and Architecture: Selected References*. Washington : Housing and Home Finance Agency, mars 1951, 20 p.
- ACHARD, P., GICQUEL, R. (éds.) *European Passive Solar Handbook. Basic Principles and Concepts for Passive Solar Architecture*, Bruxelles : Directorate-General XII for Science, Research and Development, Solar Energy Division, 1986, n. p.
- Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie (éd.) *Constructions solaires passives. 50 réalisations françaises*, Boulogne : Apogée, 1982, 111 p.
- ALEXANDER, C. et al. *A Pattern Language: Towns, Building, Construction*, New York : Oxford University Press, 1977, 1171 p.
- ALEXANDROFF, G., ALEXANDROFF, J.-M. *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Paris : Berger-Levrault, (coll. Architectures), 1982, 378 p.
- ANDERSON, B., RIORDAN, M. *The Solar Home Book: Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville : Cheshire Books, 1976, 296 p.
- ARCHIERI, J.-F., LEVASSEUR, J.-P. (éds.) *Prouvé. Cours du CNAM 1957-1970 : Essai de reconstitution du cours à partir des archives Jean Prouvé*, Bruxelles : Mardaga, 1990, 310 p.
- « Architecture climatique », *Techniques & Architecture*, n° 354, juin-juillet 1984, 160 p.
- ARONIN, J. E. *Climate & Architecture*, New York : Reinhold Publishing Corporation, (coll. Progressive Architecture Book), 1953, 304 p.
- ARONIN, J. E. *Climate and Architecture: with Special Reference to Montreal and Surroundings*, Thèse, Université McGill, Montréal, 1951, 528 p.
- Association pour l'Étude de l'Énergie Solaire de Veynes, *L'Architecture Solaire*, Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble, 1978, 117 p.
- « At the Rally », *Architectural Design*, vol. XLVI, 11/1976, p. 644-695.
- ATKINSON, W. *The Orientation of Buildings, Or Planning for Sunlight*, New York : John Wiley & Sons, 1912, 139 p.
- AUBERT, G., BOULAIN, J. *La Pédologie*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1967, 126 p.
- AUBERT DE LA RÛE, E. *L'Homme et le vent*, Paris : Gallimard, (coll. Géographie humaine), 1940, 219 p.
- AUDIBERT, P., ROUARD, D. *Les Énergies du soleil*, Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), 1978, 315 p.
- AURIAULT, J.-P., POGU, E., DORÉ, C. (dir.) *Construire avec le climat*, Paris : Ministère de l'environnement et du cadre de vie, 1979, n. p.
- AYOUB, R. « Contrôle thermique naturel des locaux dans les tropiques et les régions tempérées et ensoleillées », *Techniques & Architecture*, 20^{ème} série, n°2, février 1960, p. 68-140.
- BAER, S. « Cooling with night air », *Sunpaper*, 9:1, janvier 1984, p. 3-5.
- BAER, S. *Sunspots. Collected Facts and Solar Fiction*, Albuquerque : Zomeworks Corp., 1975, 115 p.
- BALCOMB, J. D. (éd.) *Passive Solar Buildings*, Cambridge/Londres : The MIT Press, 1992, 534 p.
- BALCOMB, J. D., HEDSTROM, J. C., MCFARLAND, R. D. « Simulation Analysis of Passive Solar Heated Buildings – Preliminary Results », *Solar Energy*, vol. 19, n°3, 1977, p. 277-282.
- BALDWIN, S., BRAND, S. (éds.), *Soft-Tech*, Sausalito/Londres : The CoEvolution Quaterly/Penguin Books Ltd, 1978, 175 p.
- BARDOU, P., ARZOUMANIAN, V. *Archi de soleil*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, 120 p.

- BARDOU, P., ARZOUMANIAN, V. *Archi de terre*, Roquevaire : Parenthèses, 1978, 103 p.
- BARDOU, P., ARZOUMANIAN, V. *Arquitecturas de adobe*, Barcelone : Gustavo Gili, (coll. Tecnología y Arquitectura), trad. du français par Marta Tusquets Trías de Bes, 1979, 165 p.
- BARDOU, P., ARZOUMANIAN, V. *Sol y arquitectura*, Barcelone : Gustavo Gili, (coll. Tecnología y Arquitectura), trad. du français par Marta Tusquets Trías de Bes, 1980, 171 p.
- BLISS JR., R. W. « Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers », *Solar Energy*, vol. 5, n°3, juillet-septembre 1961, p. 103-120.
- BOWEN, A., VAGNER, A. (éds.) *Passive and Low Energy Alternatives I. Proceedings of the First International PLEA Conference. Bermuda September 13-15, 1982*, Oxford : Pergamon Press, 1982, 456 p.
- BRAND, S. (éd.), *The Last Whole Earth Catalog. Access to tools*, New York : Random House, 1971, 447 p.
- BRAND, S. (éd.), *Whole Earth Catalog. Access to tools*, s.l. : auto-édition, 1968, n. p.
- Building Research Advisory Board (éd.), *Research Conference Report n°5: Housing and Building in Hot-Humid and Hot-Dry Climates, November 18 and 19, 1952*, Washington : National Academy of Sciences, 1953, 177 p.
- BUTTI, K., PERLIN, J. *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1980, 289 p.
- CAMIA, F.-M. *Traité de thermocinétique impulsionnelle*, Paris : Dunod, 1967, 282 p.
- Canadian Hunger Foundation/Brace Research Institute, *A Handbook on Appropriate Technology*, Ottawa : Canadian Hunger Foundation/Brace Research Institute, avril 1979, n. p.
- *Le Catalogue des Ressources. Volume 1 : Nourriture, vêtement, transports, habitat*, Paris : Parallèles, 1975, 248 p.
- CARDONNEL, C. *Solaire actif et passif. Conception, bilan thermique, habitat*, Paris : Les Éditions parisiennes chaud froid plomberie, 1983, 237 p.
- CAUDILL, W. W., ROWLETT, J. M., SCOTT, W. E. *et al.* « Architecture in the Wind Tunnel », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 94(5), New York : Time, mai 1951, p. 170-178.
- CARONE, I. « Qual a localidade mais sálubre do Rio », *Arquitetura e Urbanismo*, mai-juin 1936, p. 60-64.
- Centre de Création Industrielle/Centre Georges Pompidou, *Des Architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire*, Paris : CCI/Centre Georges Pompidou, 1981, 192 p.
- Centre de Création Industrielle/Centre Georges Pompidou, *Énergies libres !*, Paris : CCI/Centre Georges Pompidou, 1976, 47 p.
- COOK, J. *Cool Houses for Desert Suburbs. Optimizing Heating & Cooling for Arizona's Builders*, [1ère éd. 1979], Phoenix : Arizona Solar Energy Commission, 1984, 126 p.
- CROWTHER, R. L., KARIUS, P., ATKINSON, L., FREY, D., J., *Sun/Earth: How to Use Solar and Climatic Energies*, New York : Charles Scribners's Sons, 1977, 232 p.
- LE CORBUSIER, JEANNERET P. *Œuvres complètes 1910-1929*, vol. 1, Erlenbach/Zurich : Les Éditions d'Architecture, 1948, 215 p.
- LE CORBUSIER, *Œuvres complètes 1952-1957*, vol. 6, Erlenbach/Zurich : Les Éditions d'Architecture, 1957, 221 p.
- CHALINE, C., DUBOIS-MAURY, J. *Énergie et urbanisme*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1983, 126 p.
- LE CHAPPELLIER, P. (dir) « Énergie solaire et habitat », *L'Affranchi*, n°59, 1977, 126 p.
- CHAREYRE, R. *La Maison autonome*, Paris : Alternative et Parallèles, 1978, 220 p.
- CHAREYRE, R. *La Maison autonome n°2*, Paris : Alternative et Parallèles, (coll. AnArchitecture), 1980, 185 p.

- CLARK, W. *Energy for Survival: The Alternative to Extinction*, New York : Anchor Press/Doubleday, 1974, 652 p.
- COINTERAUX, F. *École d'architecture rurale, ou Leçons par lesquelles on apprendra soi-même à bâtir solidement les maisons de plusieurs étages avec la terre seule, ou autres matériaux les plus communs et du plus vil prix*, Paris : auto-édition, mars 1790, 53 p.
- COINTERAUX, F. *Traité sur la construction des manufactures, et des maisons de campagne : ouvrage utile aux fabricants, & à tous ceux qui veulent élever des fabriques ou manufactures, ainsi qu'aux propriétaires, fermiers, hommes d'affaires, architectes, & entrepreneurs*, Paris : auto-édition, août 1791, 133 p.
- CROISSET, M. *L'Hygrothermique dans le bâtiment. Confort thermique d'hiver, d'été, condensations*, Paris : Eyrolles, 1968, 227 p.
- D'HALLUIN, M. « Actinométrie et applications de la chaleur solaire », *Le Génie civil*, tome CXIX, n°3-4, janvier 1942, p. 25-29.
- DANIELS, F. *Direct Use of the Sun's Energy*, New Haven/Londres : Yale University Press, 1964, 374 p.
- DARD, P. *Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expérience et d'innovation thermique dans l'habitat*, Paris : Plan Construction, 1986, 175 p.
- DEFFONTAINES, P. *L'Homme et sa maison*, Paris : Gallimard, (coll. Géographie humaine), 1972, 254 p.
- DOLLFUS, J. *Les Aspects de l'architecture populaire dans le monde*, Paris : Albert Morancé, 1954, 134 p.
- DREYFUS, J. *Le Confort dans l'habitat en pays tropical. La Protection des constructions contre la chaleur. Problèmes de ventilation*, Paris : Eyrolles, 1960, 353 p.
- DRUMMOND, A. J. « Meeting report - 1968 SES Annual General Meeting Palo Alto, California, U.S.A. 20-23 October, 1968 », *Solar Energy*, vol. 12, n° 3, 1969, p. 399-403.
- DRYSDALE, J. W. *Climate and House Design; Physiological Considerations*, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1948, 15 p.
- DRYSDALE, J. W. *Climate and House Design; Physiological Study*, n°2, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1950, 21 p.
- DRYSDALE, J. W. *Designing Houses for Australian Climates*, Bulletin n°6, [1ère éd. 1952], Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1959, 58 p.
- DRYSDALE, J. W. *Natural Ventilation, Ceiling Height and Room Size: Notes Regarding Minimum Provision in Dwellings with Respect to Australian Conditions*, Sydney : Commonwealth Experimental Building Station, 1947, 28 p.
- « Du Bon usage des énergies », *Techniques & Architecture*, n° 315, juin-juillet 1977, 112 p.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. *Solar Energy Thermal Processes*, New York : John Wiley & Sons, (coll. Wiley-Interscience), 1974, 386 p.
- DUHOT E. *Les Climats et l'organisme humain*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1945, 127 p.
- DUNN, P. D. *Appropriate technology: technology with a human face*, New York : Schocken Books, 1979, 220 p.
- FABRY, C. *Propagation de la chaleur*, [1ère éd. 1942], Paris : Armand Colin, (coll. Armand Colin), 1961, 221 p.
- « Façades – Dossier "maisons solaires" », *Techniques & Architecture*, n° 300, septembre-octobre 1974, 132 p.

- FATHY, H. *Construire avec le peuple. Histoire d'un village d'Egypte : Gournah*, [1ère éd. 1970], Paris : Sindbad - La Bibliothèque arabe (coll. Hommes et sociétés), trad. de l'anglais par Y. KORNEL, 1985 310 p.
- FATHY, H. *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, Chicago/Londres : University of Chicago Press, 1986, 172 p.
- FISHER, A. « Passive Solar – A Controlled Experiment in Home Heating », *Popular Science*, vol. 212, n° 4, avril 1978, p. 76-79.
- FITCH, J. M. *American Building: The Forces that shape it*, Cambridge : The Riverside Press, 1947, 382 p.
- FITCH, J. M. « Climate Control on the Potomac », *House Beautiful*, « Climate Control », vol. 93, n° 4, avril 1951, p. 129-145.
- FITCH, J. M. « How You Can Use *House Beautiful's* Climate Control Project », *House Beautiful*, « Climate Control », vol. 91, n° 10, octobre 1949, p. 142-143.
- FOURIER, J. *Théorie analytique de la chaleur*, [1ère éd. 1822], Cambridge : Cambridge University Press, (coll. Library Collection), 2009, 676 p.
- FRANTA, G. (éd.) *Proceedings of the 4th National Passive Solar Conference, Oct. 3-4-5, 1979, Kansas City, Missouri*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1980, 772 p.
- FRY, E. M., DREW, J. *Tropical Architecture in the Dry and Humid Zones*, [1ère éd. 1964] Huntington Robert E. Krieger Publishing Company, 1982, 249 p.
- FRY, E. M., DREW, J. *Tropical Architecture in the Humid Zone*. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1956, 320 p.
- GEIGER, R. *Das Klima der bodennahen Luftschicht*, Braunschweig : F. Vieweg & Sohn, 1927, 246 p.
- GEIGER, R. « Microclimatologie », in : *La Météorologie. Revue de météorologie et de physique du globe*. tome X, Paris : Société météorologique de France, 1934, p. 86-96.
- GEIGER, R. « Microclimatology », in : MALONE T. F. (éd.). *Compendium of Meteorology*, Boston : American Meteorological Society, 1951, p. 993-1003.
- GEIGER, R. *The Climate Near the Ground*. Cambridge : Harvard University Press, trad. de l'allemand par M. N. STEWART et al., 1950, 482 p.
- GEIGER, R., ARON, R. H., TODHUNTER, P. *The Climate Near the Ground*. [7ème édition], Lanham : Rowman & Littlefield, 2009, 642 p.
- DE GENNETÉ, L. *Purification de l'air croupissant dans les hôpitaux, les prisons, et les vaisseaux de mer*, Nancy : Hyacinthe Leclerc, 1767, 113 p.
- GIVONI, B. « Basic Study of Ventilation Problems in Hot Country in Housing in Hot Country », *Research Report to Ford Foundation*, Haïfa : Building Research Station, 1962, n. p.
- GIVONI, B. *Climate Considerations in Building and Urban Design*, New York : John Wiley & Sons, 1998, 441 p.
- GIVONI, B. « Indoor temperature reduction by passive cooling systems », *Solar Energy*, vol. 85, n° 8, août 2011, p. 1692-1726.
- GIVONI, B. *L'Homme, l'architecture et le climat*, [1ère éd. en anglais 1969, 2e éd. rev. et corr. 1976], Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par J.-L. IZARD, 1978, 460 p.
- GIVONI, B. *Man, Climate and Architecture*, Amsterdam : Elsevier, (coll. Elsevier Architectural Sciences Series), 1969, 377 p.
- GIVONI, B. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1994, 272 p.

- GRILLO, P.-J., *Form, Function & Design*, [1ère éd. *What is design ?*, 1960], New York : Dover Publication Inc., 1975, 238 p.
- GRISOLLET, H., GUILMET, B., ARLÉRY, R. *Climatologie. Méthodes et pratiques*, Paris : Gauthier-Villars, (coll. Monographies de météorologie), 1962, 401 p.
- GRONDZIK, W. T., KWOK, A. G., STEIN, B. *et. al. Mechanical and Electrical Equipment for Buildings*, 11e éd. [1ère éd. 1953], Hoboken : John Wiley & Sons, 2010, 1766 p.
- « Guide pratique de la maison solaire », *Le Sauvage*, n° 52, avril 1978, 116 p.
- « Guide pratique de la maison solaire », *Le Sauvage*, n° 66, juin 1979, 132 p.
- HALLAIRE, M., PERRIN DE BRICHAMBAUT, C., GOILLOT, C. (éds.) *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, Paris : Institut National de la Recherche Agronomique, 1970, 543 p.
- HAMBIDGE, G. (éd.). *Climate and Man. Yearbook of Agriculture 1941*, Washington : United States Department of Agriculture, 1941, 1248 p.
- HAY, H. R. « New Roofs for Hot Dry Regions », *Ekistics*, « Housing and Urbanizing World », vol. 31, n°183, février 1971, p. 158-164
- HAY, H. R., YELLOTT, J. I. « International Aspects of Air Conditioning with Movable Insulation », *Solar Energy*, vol. 12, 1969, p. 427-438.
- HAY, H. R., YELLOTT, J. I. « A Naturally Air-Conditioned Building », [1ère éd. 1970], p. 481-492 in : SØRENSEN, B. (éd.) *Renewable Energy. Volume I: Renewable Energy Origins and Flows*, New York : Earthscan, 2011.
- HAYES, J., KOLAR W. A. (éds.) *Proceedings of the 6th National Passive Solar Conference, September 8-12, 1981, Portland, Oregon*, Newark : Publication Office of the American Section of the International Solar Energy Society, 1982, 893 p.
- *Heating, Ventilating and Air Conditioning Guide*, vol. 27, New York : American Society of Heating and Ventilating Engineers, 1949, 1384 p.
- HESCHONG, L. *Architecture et volupté thermique*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. de l'anglais par H. GUILLAUD, 1981, 93 p.
- HESCHONG, L. *Thermal Delight in Architecture*, Cambridge/Londres : The MIT Press, 1979, 78 p.
- HOPKINS, A. D. « Periodical Events and Natural Law as Guide to Agricultural Research and Practice », *Monthly Weather Review. Supplement n°9*, Washington : U.S. Department of Agriculture, Weather Bureau, 1918, 42 p.
- HOPKINS, A. D. « The Bioclimatic Law », *Journal of the Washington Academy of Sciences*, vol. X, Washington : Washington Academy of Science, 1920, p. 34-40.
- HURAUX, C. *Les Isolants*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1968, 124 p.
- HURPY, I., NICOLAS, F. *Effets de serres. Conception et construction des serres bioclimatiques*, Paris/Aix-en-Provence : Pyc/Édisud, 1981, 206 p.
- IZARD, J.-L., GUYOT, A. *Archi bio*, Roquevaire : Parenthèses, 1979, 131 p.
- IZARD, J.-L., GUYOT, A. *Archi bio, Architettura bioclimatica*, Milan : CLUP, trad. du français par P. COPPA et B. MERELLO, 1982, 176 p.
- IZARD, J.-L., GUYOT, A. *Arquitectura bioclimática*, Barcelone : Gustavo Gili, (coll. Tecnología y Arquitectura), trad. du français par Marta Tusquets Trías de Bes, 1980, 192 p.
- IZARD, J.-L., MILLET, J.-R. *Architectures d'été. Construire pour le confort d'été*, Aix-en-Provence : Édisud, 1993, 141 p.
- KAHN, L. *Habitats. Constructions traditionnelles et marginales*, Paris : Alternative et Parallèles, trad. et adaptation de l'anglais par P. GAC, 1979, 222 p.

- KNOWLES, R. L. *Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth*, [1ère éd. 1974], Cambridge : The MIT Press, 1977, 198 p.
- KOENIGSBERGER, O., INGERSOLL, T. G., MAYHEW, A., SZOKOLAY, S. V. *Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design*, Londres : Longman, 1974, 320 p.
- KONYA, A. *Design Primer for Hot Climates*, Londres : The Architectural Press, 1980, 131 p.
- KREITH, F. *Transmission de la chaleur et thermodynamique*, Paris : Masson, trad. et adaptation de l'anglais par K. BADR-EL-DINE, 1967, 654 p.
- KUT, D., HARE, G. *Des capteurs solaires pour votre maison*, Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par M.-F. AVELINE, 1981, 127 p.
- « La Maison écologique », *Le Sauvage*, n° 34, octobre 1976, 130 p.
- LANDSBERG, H. E., JACOBS, W. C., « Applied climatology », in : MALONE T. F. (éd.). *Compendium of Meteorology*, Boston : American Meteorological Society, 1951, p. 976-992.
- LANDSBERG, H. E. « Climate as a Natural Resource », *The Scientific Monthly*, vol. 63, n°4, oct. 1946, p. 293-298.
- LANDSBERG, H. E. « Comfortable living depends on microclimate », *Weatherwise*, 3:1, février 1950, p. 7-10.
- LANDSBERG, H. E. « Microclimatology: facts for architects, realtors, and city planners on climatic conditions at the breathing line », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 86(3), New York : Time, mars 1947, p. 114-119.
- LANDSBERG, H. E. « Solar Radiation at the Earth's Surface », *Solar Energy*, 5(3), 1961, p. 95-98.
- LAURENT, J.-P., RUBAUD, M., N'DONG, D. « La durabilité des protections sur terre stabilisée: l'expérience des "murets Dreyfus" », *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, n°2022, livraison 262, sept. 1985, 14 p.
- « Le Soleil », *Techniques & Architecture*, n° 7-8, juillet-août 1943, 52 p.
- LEBENS, R. *Habitat solaire passif. Méthodes de conception et de calcul avec programmes de simulation pour calculatrices*, Paris : Le Moniteur, trad. de l'anglais par M. PARIZEL, 1983, 244 p.
- LEBENS, R. (éd.), *Passive Solar Architecture in Europe. The Results of the 'First European Passive Solar Competition – 1980'*, Londres/New York : The Architectural Press/John Wiley & Sons, 1981, 218 p.
- LEBENS, R. *Passive Solar Heating Design*, Londres : Applied Science Publishers, 1980, 234 p.
- LEE, R. « The "greenhouse" effect », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 12 (3), 1973, p. 556-557.
- LEROUX, R. « La Climatologie de l'habitation », *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Centre d'études supérieures, Circulaires. ser. B, no. 7*, Paris : Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1946, p. 96-107.
- « Les 4 éléments », *Techniques & Architecture*, n° 325, juin-juillet 1979, 136 p.
- LOUBES, J.-P. *Archi troglo*, Roquevaire : Parenthèses, 1984, 124 p.
- LOUP, J. « Rudolf Geiger - The Climate near the Ground. », *Revue de géographie alpine*, tome 53, n°4, 1965, p. 701-702.
- MACKEY, C. O., WRIGHT JR., L. T. « Summer Comfort Factors as Influenced by Thermal Properties of Bulding Materials », New York : John B. Pierce Foundation, (coll. Educational Series), 1943, 27 p.
- MARKHAM, S. F. *Climate and the Energy of Nations*, Londres : Oxford University Press, 1942, 144 p.
- MARKHAM, S. F. *Climate and the Energy of Nations*, [3ème éd.], New York : Oxford University Press, 1947, 240 p.

- MAURAIN, Ch. *La Météorologie et ses applications*. Paris : Flammarion, (coll. Bibliothèque de Philosophie Scientifique), 1950, 255 p.
- MAZRIA, E. *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. BAZAN, 1981, 339 p.
- MAZRIA, E. *Le Guide de la maison passive*, [1ère éd. 1981, sous le titre *Le Guide de l'énergie solaire passive*] Marseille : Parenthèses, trad. et adaptation de l'anglais par P. BAZAN, 2005, 339 p.
- MAZRIA, E. *The Passive Solar Energy Book: A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design*, Emmaus : Rodale Press, 1979, 435 p.
- MÉNARD, J.-P. *Maisons solaires. Premiers bilans*, Paris : Le Moniteur, 1980, 207 p.
- MERRILL, R., GAGE, T. (éds.) *Energy Primer: Solar, Water, Wind, and Biofuels*, [1ère éd. 1974, 2e éd. rev. et augm. 1978], New York : Dell Publishing, 1978, 256 p.
- MICMACKER, C. *Manuel de construction rurale et alternative*, Montargis : Écologie/Conditions Surienne, 1977, 105 p.
- MIDDLETON, W. E. K., MILLAR, F. G. « Temperature Profiles in Toronto », *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, vol. 30, septembre 1936, p. 265.
- Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie/COMES-Plan Construction, *Projets pour 1000 Maisons Solaires*, Paris : Le Moniteur, 1981, 191 p.
- MISSENARD, A. *La Chaleur animale*, [1ère éd. 1946], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1969, 128 p.
- MISSENARD, A. *L'Homme et le climat*, Paris : Plon, 1937, 270 p.
- MISSENARD, A., CADIERGUES, R. *Le Chauffage, la ventilation, le conditionnement d'air*, 2e éd. [1ère éd. 1953], Paris : Eyrolles, (coll. Traité du bâtiment), 1956, 256 p.
- MOHOLY-NAGY, S. *Native Genius in Anonymous Architecture*, New York : Horizon Press, 1957, 223 p.
- NICOLAS, F., TRAISNEL, J.-P., VAYE M. *La Face cachée du soleil. Énergie solaire et architecture*. Paris : Bricolo-Lézardeur, 1974, 73 p.
- OLGAY, A., OLGAY, V. « Environment and Building Shape », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 101(2), New York : Time, août 1954, p. 105-108.
- OLGAY, A., OLGAY, V. *Solar Control & Shading Devices*, Princeton : Princeton University Press, 1957, 201 p.
- OLGAY, A., OLGAY, V. « The Theory of Sol-Air Orientation », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 100(3), New York : Time, mars 1954, p. 133-137.
- OLGAY, V. *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton : Princeton University Press, 1963, 190 p.
- OLGAY, V. « The Temperate House », *The Architectural Forum, The Magazine of Building*, 94(3), New York : Time, mars 1951, p. 179-194.
- PÉCLET, E. *Traité de la chaleur considérée dans ses applications, Tome III*, [4ème éd.], Paris : G. Masson, 1878, 618 p.
- PÉDELABORDE, P. *Introduction à l'étude scientifique du climat*, [1ère éd. 1955], Paris : Société d'Édition d'Enseignement Supérieur, 1983, 353 p.
- PÉGUY, Ch.-P. *Précis de climatologie*. Paris : Masson & Cie, 1961, 347 p.
- PERRIN DE BRICHAMBAUT, Ch. « Météorologie et énergie : l'évaluation du "gisement" solaire », *La Météorologie*, VIe série, n°5, juin 1976, p. 129-158.
- PERRIN DE BRICHAMBAUT, Ch. *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Méthodes actinométriques*, Paris : Gauthier-Villars, (coll. Monographies de météorologie), 1963, 300 p.

- PERRIN DE BRICHAMBAUT, Ch., VAUGE, C. *Le Gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique*, Paris : Lavoisier, (coll. Technique et documentation), 1982, 222 p.
- PERROT, M. *La Houille d'or, ou l'énergie solaire*, Paris : Fayard, (coll. Bilan de la science), 1963, 158 p.
- PEYTURAUX, R. *L'Énergie solaire*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1968, 127 p.
- DE PIERREFEU, F., LE CORBUSIER, *La Maison des hommes*, Paris : Plon, 1942, 209 p.
- PLEIJEL, G. *The Computation of Natural Radiation in Architecture and Town Planning*, Stockholm : Statens nämnd för byggnadsforskning, 1954, 155 p.
- PRICE, T. « Low-technology solar homes that work with nature », *Popular Science*, vol. 209, n° 6, décembre 1976, p. 95-98.
- « Quelle architecture solaire ? », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n° 192, septembre 1977, 73 p.
- RADAU, P. *Actinométrie*, Paris : Gauthier-Villars, 1877, 107 p.
- RAPOPORT, A. *Pour une anthropologie de la maison*, [1ère éd. 1972], Paris : Dunod, (coll. Aspects de l'urbanisme), trad. de l'anglais par A. M. MEISTERSHEIM et M. SCHLUMBERGER, 1977, 207 p.
- RAVÉREAU, A., ROCHE, M. *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Paris : Sindbad, (coll. Hommes et sociétés), 1981, 282 p.
- « Regional Climate Analyses and Design Data. *The House Beautiful* Climate Control Project: X. Boston Area », *Supplement to Bulletin of the American Institute of Architects*, Washington : American Institute of Architects, mars 1951, 16 p.
- ROBERT, J. F., CAMOUS, R., SCHNEIDER, F. *Survey of European Passive Solar Buildings*, Washington : US Department of Energy, trad. du français par WOOD J., 1982, 220 p.
- RODITI, D. *Le Catalogue des outils solaires*, Paris : Alternative et Parallèles, 1980, 121 p.
- ROUBINET, M. *La Climatisation*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1970, 128 p.
- RUDOFISKY, B. *Architecture sans architectes*, Paris : Chêne, trad. de l'anglais par D. LEBOURG, 1980, n. p.
- RYBCZYNSKI, W. *Paper Heroes. Un regard sur la technologie appropriée*, Roquevaire : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. de l'américain par H. GUILLAUD et W. RYBCZYNSKI, 1983, 158 p.
- SAYIGH, A. A. M. (éd.) *Solar Energy Application in Buildings*, New York : Academic Press, 1979, 444 p.
- SCHUMACHER, E. F. *Small is Beautiful. A Study of Economics as If People Mattered*, Londres : Blond & Briggs, 1973, 288 p.
- SENÉ, M. *Archi-libre, ou la transgression dans l'art de bâtir*, Paris : Le Moniteur (coll. Construire autrement), 1981, 214 p.
- SÉSOLIS, B., CABANAT, M. *Chauffage de l'habitat par l'énergie solaire : expérimentations sur les maisons CNRS d'Odeillo (Pyrénées Orientales)*, Thèse de 3^{ème} cycle Géophysique spatiale option environnement, Université Paris-Diderot, juin 1976, 253 p. Dir. inconnu.
- SHURCLIFF, W. A. *New Inventions in Low-Cost Solar Heating: 100 Daring Schemes Tried and Untried*, Andover : Brick House Publishing Company, 1979, 293 p.
- SHURCLIFF, W. A. *Solar Heated Building: A Brief Survey*, [11ème éd.], Cambridge : auto-édition, novembre 1975, 172 p.
- SHURCLIFF, W. A. *Solar Heated Buildings of North America: 120 Outstanding Examples*, New Hampshire : Brick House Publishing Co., 1978, 295 p.
- SIPLE, P. A. « 15,750,000 Americans live in this Climate », *House Beautiful*, vol. 91, n°11, novembre 1949, p. 202-203, 320-321.

- SIPLE, P. A. « Climatic Considerations of Solar Energy for Space Heating », p. 14-16 in : HAMILTON, R. W. (éd.), *Space Heating with Solar Energy: Proceedings of a Course-Symposium held at the Massachusetts Institute of Technology, August 21-26, 1950*, Cambridge : MIT/Bemis Foundation, 1954.
- SIPLE, P. A. « Climatic Criteria for Building Construction », *Proceedings of the Research Correlation Conference on Weather and the Building Industry*, Washington : National Academy of Sciences, 1950, p. 5-22, 14.
- SIPLE, P. A. « How many Climates do we have in the U.S.? », *House Beautiful*, « Climate Control », vol. 91, n° 10, octobre 1949, p. 136-137.
- *Solar 2: Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, Rome, 21-31 August, 1961: Solar Energy, Wind Power, and Geothermal Energy*, Seattle : Cloudburst Press, 1978, 315 p.
- SKURKA, N., NAAR, J. *Design for a Limited Planet. Living with Natural Energy*, New York : Ballantine Books, 1976, 215 p.
- Société Française des Thermiciens, *Représentations analogiques et homologiques dans les techniques de la chaleur*, Paris : Dunod, 1965, 228 p.
- « Solaire : passif ou actif ? », *L'Architecture d'Aujourd'hui*, n° 209, juin 1980, 98 p.
- « Solar Energy in Housing », *Architectural Design*, vol. XLIII, 10/1973, p. 615-680.
- SORRE, M. « La Notion de micro-climat », *Bulletin de l'Association de géographes français*, n°301-302, 38^e année, novembre-décembre 1961, p. 162-169.
- STEIN, R. G. *Architecture and Energy: Conserving Energy Through Rational Design*, [1^{ère} éd. 1977], New York : Anchor Books, 1978, 322 p.
- SUTTON, G. E. « Roof Spray for Reduction in Transmitted Solar Radiation », *ASHVE Journal, Section, Heat, Piping and Air Conditioning*, septembre 1950, p. 131-137.
- TABOR, H. « Selective radiation. I. Wavelength discrimination. II. Wavefront discrimination », *Bulletin of the Research Council of Israel*, 5A, (2), janvier 1956, p. 119-134.
- The Center for Maximum Potential Building Systems, *An Appropriate Technology Working Atlas for the State of Texas*, Austin : C.M.P.B.S., 1978, n. p.
- Total Environmental Action, Los Alamos Scientific Laboratory (éds.) *Passive Solar Design Handbook*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1984, 750 p.
- TUAN, Y.-F., EVERARD, C., E. *The Climate of New Mexico*, [1^{ère} éd. 1969], Santa Fe : State Planning Office, 1973, 197 p.
- TRICAUD, J.-F. *Atlas énergétique du rayonnement solaire en France*, Paris : PYC, 1978, 278 p.
- TRICAUD, J.-F. *Contribution à l'estimation des ressources énergétiques solaires. Ébauche d'un atlas du rayonnement pour la France*, Thèse de doctorat en Sciences, Université Paris-Diderot, avril 1976, 180 p. Dir. inconnu.
- TROMBE, F. « L'énergie solaire, houille d'or de l'avenir », *L'Astronomie*, vol. 64, 1950, p. 413-421.
- TROMBE, F. *Traité de spéléologie*, Paris : Payot, (coll. Bibliothèque scientifique), 1952, 376 p.
- TROMP, S. W. (éd.) *Biometeorology: Proceedings of The Second International Bioclimatological Congress held at The Royal Society of Medicine, London, 4-10 Sept. 1960*, Oxford : Pergamon Press, (coll. Symposium Publications Division), 1962, 687 p.
- VALE, B., VALE, R. *La Maison aux énergies douces*, Paris : Le Moniteur, (coll. Les Guides de la maison), trad. de l'anglais par M.-F. AVELINE, 1979, 251 p.
- VAN DRESSER, P. *Homegrown Sundwellings*, [1^{ère} éd. 1977], Santa Fe : The Lightning Tree, 1979, 133 p.

- VIERS, G. *Eléments de climatologie*, [1ère éd. 1968], Paris : Fernand Nathan, (coll. Fac), 1971, 224 p.
- VON FRISCH, K. *Architecture animale*, Paris : Albin Michel, trad. de l'allemand par P. KESSLER, 1975, 345 p.
- VON UELI, S. « Interview mit Dr. Raymond Ayoub », *Bauen+Wohnen*, « Energie und Raumklima – Ansatzpunkte für eine neue Architektur », 7/8, août 1977, p. 251-253.
- WATSON, D., *Solar House: Your Place in the Sun*, Charlotte : Garden Way, 1977, 281 p.
- WATSON, D., LABS, K. *Climatic Building Design. Energy-Efficient Building Principles and Practice*, New York : McGraw Hill Higher Education, 1983, 288 p.
- *Weather and the Building Industry: A Research Correlation Conference on Climatological Research and its Impact on Building Design, Construction, Materials and Equipment*, Washington : Building Research Advisory Board, Division of Engineering and Industrial Research, National Research Council, 1950, 158 p.
- WENDELL, E. (éd.), *Meteorological Monograph. Recent Study in Bioclimatology: a group*, vol. 2, n°8, Boston : American Meteorological Society , octobre 1954, 121 p.
- WRIGHT, D. *Natural Solar Architecture: A Passive primer*, New York : Van Nostrand Reinhold Inc., 1978, 256 p.
- WRIGHT, D. *Soleil, Nature, Architecture*, Roquevaire : Parenthèses, trad. et adaptation de l'anglais par P. BAZAN, 1979, 248 p.
- WRIGHT, D. *Manuel d'architecture naturelle*. [1ère éd. 1979, sous le titre *Soleil, Nature, Architecture*], Marseille : Parenthèses, (coll. Habitat/Ressources), trad. et adaptation de l'anglais par P. BAZAN, 2004, 248 p.
- WRIGHT, D., ANDREJKO, D. A. *Passive Solar Architecture, Logic & Beauty: 35 Outstanding Houses Across the United States*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1982, 255 p.
- WRIGHT, H. « How to Put a Harness on the Sun », *House Beautiful*, « Climate Control », vol. 91, n° 10, octobre 1949, p. 158-161.
- WRIGHT, H. N. *Solar Radiation as Related to Summer Air-Conditioning and Winter Heating in Residences*, New York: John B. Pierce Foundation, 1936, n. p.
- YANDA, B, FISHER, R. *Une Serre solaire pour chauffer votre maison et pour jardiner toute l'année*, Paris : Eyrolles, trad. de l'américain par R. CÉLAIRE, 1981, 148 p.
- YANDA, B, FISHER, R. *The Food and Heat Producing Solar Greenhouse: Design, Construction, Operation*, Santa Fe : John Muir, 1976, 161 p.
- YANNAS, S., BOWEN, A. (éds.) *Passive and Low Energy Architecture. Proceedings of the Second International PLEA Conference. Crete, Greece 28 June-1 July 1983*, Oxford : Pergamon Press, 1983, 853 p.
- YELLOTT, J. I. « Calculation of Solar Heat Gain Through Single Glass », *Solar Energy*, vol. 5, n°4, octobre-décembre 1963, p. 167-175.
- YELLOTT, J. I. « How Materials React to Solar Energy », *Architectural Record*, mai 1966, p. 196-198.

Sources secondaires et références :

- ANDERSON, W. « Decolonizing the Foundation of Tropical Architecture », [en ligne], *ABE Journal*, n°18, 2021, n. p.
- BACHELARD, G. *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, [1ère éd. 1951], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque de Philosophie Contemporaine), 1965, 223 p.
- BACHELARD, G. *L'Engagement rationaliste*, Paris : PUF, (coll. Bibliothèque de philosophie contemporaine), 1972, 190 p.
- BACHELARD, G. *La Formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, [1ère éd. 1938], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque des textes philosophiques), 1980, 256 p.
- BACHELARD, G. *Le Pluralisme cohérent de la chimie moderne*, [1ère éd. 1932], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque de Philosophie Contemporaine), 1973, 235 p.
- BACHELARD, G. *Le Rationalisme appliqué*, [1ère éd. 1949], Paris : PUF, (coll. Quadrige), 1994, 215 p.
- BACHELARD, G. *Épistémologie. Textes choisis*, Paris : PUF, (coll. Sup « Les grands textes »), 1971, 216 p.
- BACHELARD, G. *Essai sur la connaissance approchée*. Paris : Vrin, 1927, 310 p.
- BACHELARD, G. *Étude sur l'évolution d'un problème de physique : la propagation thermique dans les solides*, [1ère éd. 1927], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque des textes philosophiques), 2016, 182 p.
- BAER, F., CANFIELD, N. L., MITCHELL, J. M. (dir.). *Climate in Human Perspective: A Tribute to Helmut E. Landsberg*, Dordrecht : Springer Science+Business Media, 1991, 146 p.
- BANERJEE, T. « U.S. Planning Expeditions to Postcolonial India: From Ideology to Innovation in Technical Assistance », [en ligne], *Journal of the American Planning Association*, 75:2, 2009, p. 193-208.
- BANHAM, R. *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Orléans : HYX, (coll. Restitutions), trad. de l'anglais par A. CAZÉ, 2011, 333 p.
- BANHAM, R. *The Architecture of the Well-Tempered Environment*, [1ère éd. en anglais 1969, 2e éd. rev. et augm. 1984], Chicago : University of Chicago Press, 1984, 320 p.
- BASTIN, J.-F., CLARK, E., ELLIOTT, T. et al. « Understanding climate change from a global analysis of city analogues », [en ligne], *PLoS ONE*, 14(7), 2019, 13 p.
- BARBER, D. A. *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, New York : Oxford University Press, 2016, 336 p.
- BARBER, D. A. *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, Princeton : Princeton University Press, 2020, 336 p.
- BARLES, S. *La Ville délétère. Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain XVII^e-XIX^e siècle*, Paris : Champs Vallon, (coll. Milieux), 1999, 370 p.
- BATAILLE, G. *La Part maudite*, [1ère éd. 1949], Paris : Éditions de Minuit (coll. Critique), 1967, 280 p.
- BEHRMAN, D. *Solar Energy. The Awakening Science*, [1ère éd. 1976, 2e éd. rev. et augm. 1979], Londres : Routledge & Kegan Paul, 1979, 379 p.
- BEN-ASHER GITLER, I., GEVA, A. (éds.) *Israel as a Modern Architectural Experimental Lab*, Bristol/Chicago : Intellect Books, 407 p.
- BENSAUDE-VINCENT, B., LOEVE, S. *Carbone. Ses vies, ses œuvres*, Paris : Seuil, (coll. Science ouverte), 2018, 341 p.

- BENSOUSSAN, D. *La Modulation. Principes et modes*, Paris : Dunod, (coll. Modules Teccart), 106 p.
- BERTRAND, G. « Pour une histoire écologique de la France rurale », p. 37-105 in : DUBY, G., WALLON, A. (dir.) *Histoire de la France rurale, Tome 1*, Paris : Seuil, 1975.
- BIHOUIX, P. *L'âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, Paris : Seuil, (coll. Anthropocène), 2014, 330 p.
- BIHOUIX, P., DE GUILLEBON, B. *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, Les Ulis : EDP Sciences, 2010, 299 p.
- BORASI, G., ZARDINI, M. (dir.) *Désolé, plus d'essence. L'innovation architecturale et la crise pétrolière de 1973*, Mantoue/Montréal : Corraini/Centre Canadien d'Architecture, 2007, 236 p.
- BORNAREL, A., GAUZIN-MÜLLER, D. « Confort d'été passif. Quelques solutions éprouvées », *EK*, n° 38, avril-mai 2014, p. 54-57.
- BOUET, P. « A Silent Graph. Tracing the Algerian Past of French Solar Experiments », [en ligne], *ABE Journal*, n°18, 2021, 10 p.
- BOUET, P. « Deux maisons solaires sans histoire », *Plan Libre 181*, [en ligne], « Prendre le soleil », mars 2021, p. 12-15.
- BOURGUIGNON, C. BOURGUIGNON, L. *Le Sol, la terre et les champs. Pour retrouver une agriculture saine*, [1ère éd. 1989], Paris : Sang de la Terre, 2015, 245 p.
- BOURGUIGNON, L., BOURGUIGNON, C. *Manifeste pour une agriculture durable*, Arles : Actes Sud, 2017, 70 p.
- BLAUVELT, A. (dir.) *Hippie Modernism: The Struggle for Utopia*, Minneapolis : Walker Art Center, 2015, 448 p.
- BUCAILLE, F. *Revitaliser les sols. Diagnostic, fertilisation, protection*, Paris : Dunod, 2020, 215 p.
- BURROWS, M. T., SCHOEMAN, D. S., BUCKLEY, L. B. et al. « The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems », [en ligne], *Science*, vol. 334, novembre 2011, p. 652-655.
- CABASSUD, N. (dir.) *Guide RE 2020. Éco-construire pour le confort de tous*, Bron : Cerema, 2020, 70 p.
- CANGUILHEM, G. *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, [1ère éd. 1968, 2e éd. rev. et augm. 1994], Paris : Vrin, (coll. Problèmes & controverses), 2002, 430 p.
- CANGUILHEM, G. *La Connaissance de la vie*, [1ère éd. 1952, 2e éd. rev. et corr. 1965], Paris : Vrin, (coll. Bibliothèque des textes philosophiques), 2009, 253 p.
- CANGUILHEM, G. *Le Normal et le pathologique*, [1ère éd. 1966], Paris : PUF, (coll. Quadrige), 2013, 290 p.
- CARLES, C., ORTIZ, T., DUSSERT, E. (dir.) *Rétrofutur. Une contre-histoire des innovations énergétiques*, Paris : Buchet Chastel, 2018, 207 p.
- CHAMBADAL, P. *Évolution et applications du concept d'entropie*, Paris : Dunod, 1963, 220 p.
- CHANG, J.-H. *A Genealogy of Tropical Architecture. Colonial Networks, Nature and Technoscience*, Londres/New York : Routledge, 2016, 289 p.
- CHANG, J. H. « Thermal Comfort and Climatic Design in the Tropics: an Historical Critique », *The Journal of Architecture*, vol. 21, n°8, Londres : Royal Institute of British Architects (RIBA), 2016, p. 1171-1202.
- CHAUVIN-MICHEL, M. *Architectures solaires et politiques énergétiques en France de 1973 à 1985*, 2 tomes, Thèse NR Histoire de l'art, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, juin 2012, 882 p. Dir. MASSU C.
- COUFFIGNAL, L. *Les Notions de base*, Paris : Gauthier-Villars, (coll. Information et cybernétique), 1958, 60 p.

- COWAN, H. J. *An Historical Outline of Architectural Science*, Amsterdam : Elsevier, (coll. Architectural Science Series), 1966, 175 p.
- DAGOGNET, F. *Écriture et iconographie*, Paris : Vrin, (coll. Problèmes & controverses), 1973, 168 p.
- DAGOGNET, F. *Rematéraliser. Matières et matérialismes*, [2ème éd.], Paris : Vrin, (coll. Problèmes & controverses), 1989, 265 p.
- DARDEL, É. *L'Homme et la terre. Nature de la réalité géographique*, [1ère éd. 1952], Paris : Comité des Travaux historiques et scientifiques, 1990, 199 p.
- DAUGUET, B. *Mesures contre nature. Mythes et rouages de la compensation écologique*, Caen : Grévis, (coll. Enquêtes politiques), 2021, 300 p.
- DAVID, R., *L'Électronique*, [1ère éd. 1964], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1973, 126 p.
- DEFORGE, Y. *Technologie et génétique de l'objet industriel*, Paris : Maloine, (coll. Université de Compiègne), 1985, 196 p.
- DELÉAGE, J. P. *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*, Paris : La Découverte, 1991, 330 p.
- DEMANGEOT, J., *Les Milieux « naturels » du globe*, [1ère éd. 1984], Paris : Armand Colin, 2002, 364 p.
- DEMISSIE, F. (éd.) *Colonial Architecture and Urbanism in Africa. Intertwined and Contested Histories*, [1ère éd. 2012] Londres/New York : Routledge, 2017, 438 p.
- DENZER, A. *The Solar House: Pioneering Sustainable Design*, New York : Rizzoli, 2013, 256 p.
- DEZOTEUX, J., PETIT-JEAN, R. *Les Transistors*, [1ère éd. 1964], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1970, 128 p.
- DORIZE, L. *Le Climat, objet de curiosité et de polémiques*, Paris : Ellipses, (coll. L'Esprit des sciences), 2005, 128 p.
- DREYFUS, J. *La Société du confort, quel enjeu, quelles illusions ?* Paris : L'Harmattan, 1990, 162 p.
- DUCASSÉ, P. *Histoire des techniques*, [1ère éd. 1945], Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1961, 136 p.
- ELSAID, A.M., MOHAMED, H.A., ABDELAZIZ, G.B., AHMED, M.S. « A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic », [en ligne], *Process safety and environmental protection: transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, vol. 155, 2021, p. 230-261.
- ESCOURROU, G. *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*, Paris : Masson, (coll. Géographie), 1981, 182 p.
- ESCOURROU, G. *Le Climat de la France*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1982, 125 p.
- ESCOURROU, G. *Le Climat et la ville*, Paris : Nathan, (coll. Géographie d'aujourd'hui), 1991, 190 p.
- FEBVRE, L. *La Terre et l'évolution humaine. Introduction géographique à l'histoire*, [1ère éd. 1922], Paris : Albin Michel, (coll. L'Évolution de l'humanité), 1970, 444 p.
- DE FÉLICE, P. *L'Histoire de la climatologie*, Paris : L'Harmattan, (coll. Biologie, Écologie, Agronomie), 2006, 138 p.
- FERNANDEZ, P. *De l'architecture bioclimatique au développement urbain durable*, H.D.R., Architecture, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007, 86 p. Dir. SIMONIN, O.
- FERNÁNDEZ-GALIANO, L. *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge/Londres : The MIT Press, (coll. Writing Architecture), trad. de l'espagnol par G. CARIÑO, 2000, 325 p.
- FRAMPTON, K. « Vers un régionalisme critique : pour une architecture de résistance », trad. de l'anglais par L. DOUSSON, p. 11-39 in : DOUSSON, L., VIALA, L. *Art, architecture, recherche*.

Regards croisés sur les processus de création, Montpellier : L'Espérou, (coll. Carnets de la recherche), 2016.

- LE GARS, S., BOISTEL, G. (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, Paris : Hermann, (coll. InterSciences), 2015, 250 p.

- GAILLARD, C. « L'approche énergétique de l'architecture vernaculaire : genèse et développement », [en ligne], *Socio-anthropologie*, n°42, 2020, p. 67-80.

- GAILLARD, C. « De la loi bioclimatique à la conception bioclimatique en architecture », *La Météorologie. Revue de l'atmosphère et du climat*, n°113, mai 2021, p. 41-46.

- GAILLARD, C. « Le climat est-il une ressource ? Perspectives historiques à partir de la conception bioclimatique en architecture », [en ligne], *Les Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère*, n°11, 2021, 16 p.

- GAILLARD, C. « Persistance et renouvellement des mentalités techniques : le cas de l'opposition entre les techniques solaires actives et passives en architecture », *Cahiers François Viète*, vol. III, n°12, (à paraître).

- GARDES, T., SCHOETTER, R., HIDALGO, J. *et al.* « Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities », [en ligne], *Science of the Total Environment*, vol. 737, octobre 2020, 18 p.

- GAUZIN-MÜLLER, D. *L'Architecture écologique*, Paris : Le Moniteur, 2001, 286 p.

- GILLE, B. (dir.), *Histoire des techniques*, Paris : Gallimard, (coll. Encyclopédie de la Pléiade), 1978, 1652 p.

- GUCHET, X., *Le Sens de l'évolution technique*, Paris : Léo Scheer, (coll. Non & Non), 2005, 384 p.

- GUEZ, A., SUBRÉMON, H. (dir.) *Saisons des villes*, Paris : Donner lieu, 2013, 224 p.

- GRAS, A. *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique*, Paris : Fayard, 2003, 310 p.

- GRAS, A. *Le Choix du feu. Aux origines de la crise climatique*, Paris : Fayard, 2007, 281 p.

- GUILBAUD, G.-T. *La Cybernétique*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1954, 135 p.

- GUYOT, G. *Climatologie de l'environnement*, [2ème éd.], Paris : Dunod, (coll. Sciences Sup), 2013, 544 p.

- HARZALLAH, A., SIRET, D., MONIN, E., BOUYER, J. « Controverses autour de l'axe héliothermique: l'apport de la simulation physique à l'analyse des théories urbaines », [en ligne], in : THOMINE-BERRADA, A., BERGDOL, B. (dir.) *Repenser les limites: l'architecture à travers l'espace, le temps et les disciplines*, Paris : INHA, 2005, 11 p.

- HEIDEGGER, M. *Essais et conférences*, [1ère éd. 1958], Paris : Gallimard, (coll. Tel), 1980, 349 p.

- JACKSON, J. B. *À la découverte du paysage vernaculaire*, Arles/Versailles : Actes Sud/ENSP, trad. de l'anglais par X. CARRÈRE, 2003, 278 p.

- JACKSON, I., HOLLAND, J. *The Architecture of Edwin Maxwell Fry and Jane Drew: Twentieth Century Architecture, Pioneer Modernism and the Tropics*, Farnham (Surrey) : Ashgate, (coll. Studies in Architecture), 2014, 381 p.

- JARRIGE, F., VRIGNON, A. *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris : La Découverte, 2020, 397 p.

- JOBÉ, J. (dir.), *Le Grand livre du soleil*, Lausanne/Paris : Edita/Denoël, 1973, 314 p.

- JOLLIET, O., SAADE, M., CRETIAZ, P., SHAKED, S., *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, [1ère éd. 2005, 2e éd. rev. et augm. 2010], Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, (coll. Développement durable), 2010, 302 p.

- JOURDA, F. H. *Petit manuel de la conception durable*, Paris : Archibooks et Sautereau, 2011, n. p.

- JOUSSE, M. *L'Anthropologie du geste*, [1ère éd. 1974], Paris : Gallimard, (coll. Tel), 2008, 1008 p.
- KAISER, D., MCCRAY, W. P. (éds.) *Groovy Science: Knowledge, Innovation, and American Counterculture*, Chicago/Londres : University of Chicago Press, 2016, 426 p.
- KALLIPOLITI, L. *The Architecture of Closed Worlds, or, What is the Power of Shit?*, Zurich : Lars Müller Publishers/Storefront for Art and Architecture, 2018, 298 p.
- KATZ, E., LAMMEL, A., GOLOUBINOFF (éds.) *Entre ciel et terre. Climat et sociétés*, Paris : Ibis Press/IRD, 2002, 509 p.
- LABEYRIE, J. *L'Homme et le climat*, [1ère éd. 1985, 2e éd. rev. et augm. 1993], Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), 1993, 342 p.
- LAFITTE, J. *Réflexions sur la science des machines*, [1ère éd. 1932], Paris : Vrin, 1972, 136 p.
- LAMARRE, D., PAGNEY, P. *Climats et sociétés*, Paris : Armand Colin, (coll. U Géographie), 1999, 272 p.
- LAMOULINE, R. *Du thermomètre à la température*, Paris : Ellipses, (coll. L'Esprit des sciences), 2005, 125 p.
- LAURENT, F. *Le Froid*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1972, 124 p.
- LE ROY LADURIE, E. *Histoire du climat depuis l'an mil*, Paris : Flammarion, (coll. Nouvelle bibliothèque scientifique), 1967, 376 p.
- LEFÈVRE, P. *Ressources de l'architecture pour la ville durable*, Rennes : Apogée, 2012, 128 p.
- LEROI-GOURHAN, A. *Évolution et techniques. L'Homme et la matière*, [1ère éd. 1943], Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1971, 348 p.
- LEROI-GOURHAN, A. *Évolution et techniques. Milieu et technique*, [1ère éd. 1945], Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1973, 475 p.
- LEROI-GOURHAN, A. *Le Geste et la parole, Tome II. La Mémoire et les rythmes*, Paris : Albin Michel, (coll. Sciences d'aujourd'hui), 1965, 285 p.
- LEVY-BRUHL, L. *La Mentalité primitive*, Paris : Félix Alcan, (coll. Travaux de l'année sociologique), 1925, 537 p.
- LIÉBARD, A., DE HERDE, A. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Paris : Le Moniteur, 2006, 798 p.
- LOARIE, S., DUFFY, P., HAMILTON, H. et al. « The velocity of climate change », [en ligne], *Nature*, vol. 462, décembre 2009, p. 1052–1055.
- LOPEZ, F. *Le Rêve d'une déconnexion : De la maison autonome à la cité auto-énergétique*, Paris : La Villette, 2014, 317 p.
- LU, J., GU, J., LI, K. et al. « COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020 », [en ligne], *Emerging Infectious Diseases*, 26 (7), 2020, p. 1628-1631.
- MANIAQUE, C. *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, Marseille : Parenthèses, 2014, 241 p.
- MARCONIS, R. *Introduction à la géographie*, Paris : Armand Colin/Masson, 1996, 221 p.
- MAROT, S., « Hearthbreaking. Sur l'évacuation du foyer de l'architecture », *Marnes, documents d'architecture*, vol. 4, 2016, p. 415-467.
- MAUMY, C. *Usonia ou le mythe de la ville-nature américaine*, Paris : La Villette, (coll. Penser l'espace), 2008, 239 p.
- MAUNOURY, J.-L. *La Genèse des innovations. La Création technique dans l'activité de la firme*, Paris : PUF, (coll. Bibliothèque d'économie contemporaine), 1968, 434 p.
- MCDONALD, M., DAYER, C. (éds.) *Activism in Architecture: Bright Dreams of Passive Solar Energy Design*, Londres : Routledge, (coll. Routledge Research in Architecture), 2018, 178 p.

- MOE, K. *Insulating Modernism. Isolated and Non-isolated Thermodynamics in Architecture*, Basel : Birkhäuser, 2014, 320 p.
- MUCCHIELLI, A. *Les Motivations*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1981, 127 p.
- MUMFORD, L. *La Cité à travers l'histoire*, Paris : Seuil, trad. de l'américain par Guy DURAND et Gérard DURAND, 1961, 777 p.
- NEBEKER, F. *Calculating the Weather: Meteorology in the 20th Century*, San Diego : Academic Press, (coll. International Geophysics Series), 1995, 255 p.
- NIETZSCHE, F. *Considérations inactuelles 1 et 2. Unzeitgemässe Betrachtungen*, Paris : Aubier, (coll. Bilingue des classiques étrangers), trad. de l'allemand par G. BIANQUIS, 1964, 392 p.
- NIETZSCHE, F. *Ainsi parlait Zarathoustra. Also sprach Zarathustra*, Paris : Aubier/Montaigne, (coll. Bilingue des classiques étrangers), trad. de l'allemand par G. BIANQUIS, 1946, 638 p.
- ODUM, E. P. *Écologie. Un lien entre les sciences naturelles et les sciences humaines*, Montréal : HRW, trad. de l'américain par R. BERGERON, 1976, 254 p.
- OLGAY, V. et al. *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, [1ère éd. 1963] Princeton : Princeton University Press, 2015, 190 p.
- PACQUEMENT, A., CINQUALBRE, O. (éd.), *Jean Prouvé. La Maison tropicale*, Paris : Centre Pompidou, 2009, 160 p.
- PARISON, S. *Urban Materials and Evaporative Cooling for Heat Mitigation in Cities*, Thèse NR Physique, Université de Paris, Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain, 2020, 214 p. Dir. ROYON L.
- PÉREZ, J.-P., LAGOUTE, C., FOURNIOLS, J.-Y., BOUHOURS, S. *Électronique. Fondements et applications*, [2ème éd.], Paris : Dunod, 2016, 868 p.
- PERLIN, J. *Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*, Novato : New World Library, 2013, 548 p.
- PERRAUDIN, G. *Construire en pierre de taille aujourd'hui*, Dijon : Les Presses du réel, (coll. Architecture), 2013, 64 p.
- PERRIN, G. *Rafraîchissement urbain et confort d'été. Lutter contre les canicules*, Paris : Dunod, 2020, 167 p.
- PEUPORTIER, B. *Éco-conception des bâtiments. Bâtir en préservant l'environnement*, Paris : Presses de l'École des Mines, (coll. Sciences de la terre et de l'environnement), 2003, 276 p.
- PEUPORTIER, B. (dir.) *Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments*, Paris : Presses de l'École des Mines, (coll. Développement durable), 2013, 238 p.
- PINCHEMEL, P., PINCHEMEL, G. *La Face de la terre*, Paris : Armand Colin, 1988, 519 p.
- PRIGOGINE, I., STENGERS, I. *La Nouvelle alliance. Métamorphose de la science*, [1ère éd. 1979], Paris : Gallimard, (coll. Folio Essais), 1986, 439 p.
- RAHM, P. *Histoire naturelle de l'architecture. Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments*, Paris : Pavillon de l'Arsenal, 2020, 303 p.
- RAVÉREAU, A. *Du local à l'universel*, Paris : Éditions du Linteau, 2007, 153 p.
- REQUENA-RUIZ, I. « Building Artificial Climates. Thermal control and comfort in Modern Architecture (1930-1960) », [en ligne], *Ambiances*, 2, « Ambiance et histoire de l'architecture : l'expérience et l'imaginaire sensibles de l'environnement construit », 2016, 20 p.
- RIZZOTTI, P. (dir.), *L'Empreinte d'un habitat. Construire léger et décarboné*, Paris : Pavillon de l'Arsenal, 2021, 63 p.
- RODITI, D. *Ventilation et lumière naturelles*, Paris : Eyrolles, 2011, 164 p.
- ROSS ASHBY, W. *Introduction à la cybernétique*, Paris : Dunod, trad. de l'anglais par M. PILLON, 1958, 354 p.

- ROUXEL, F., ROBERT, B., ÉCREMENT, B., LE COUÉDIC, D. « Jacques Dreyfus (1920-2004) », *Urbanisme*, n°338, sept.-oct. 2004, p. 10.
- SANDORI, P. *Petite logique des forces. Constructions et machines*, Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), trad. de l'anglais par A. LAVERNE, 1983, 233 p.
- SAWIN, M. (éd.), *James Marston Fitch: Selected Writings on Architecture, Preservation and the Build Environment*, New York/Londres : W.W. Norton & Company, 2006, 312 p.
- SCHLANGER, J. *Les Métaphores de l'organisme*, [1ère éd. 1971], Paris : L'Harmattan, (coll. Histoire des Sciences Humaines), 1995, 262 p.
- SIMONDON, G. *Communication et information. Cours et conférences*, Chatou : La Transparence, (coll. Philosophie), 2010, 411 p.
- SIMONDON, G. *Du Mode d'existence des objets techniques*, [1ère éd. 1958], Paris : Aubier, (coll. L'Invention philosophique), 1989, 333 p.
- SIMONDON, G. *Imagination et invention (1965-1966)*, [1ère éd. 2008], Paris : PUF, 2014, 206 p.
- SIMONDON, G. *La Résolution des problèmes*, Paris : PUF, 2018, 351 p.
- SIMONDON, G. *L'Individuation à la lumière des notions de forme et d'information*. Grenoble : Jérôme Millon, (coll. Krisis), 2005, 571 p.
- SIMONDON, G. *L'Invention dans les techniques. Cours et conférences*, Paris : Seuil, (coll. Traces écrites), 2005, 347 p.
- SIMONDON, G. *Sur la philosophie (1950-1980)*, Paris : PUF, 2016, 465 p.
- SIMONDON, G. *Sur la technique (1953-1983)*, Paris : PUF, 2014, 460 p.
- SIRET, D. « Généalogie du brise-soleil dans l'œuvre de Le Corbusier », [en ligne], *Cahiers thématiques*, École nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille, 2004, p. 169-181.
- SIRET, D. *L'architecture au soleil. De l'hygiénisme à la ville durable*, H.D.R., Architecture, Université de Nantes, 2010, 142 p. Dir. PÉNEAU, J. P.
- SIRET, D. « L'illusion du brise-soleil par Le Corbusier », [en ligne], *Colloque langages scientifiques et pensée critique : modélisation, environnement, décision publique*, Cerisy, juin 2002, n. p.
- SIRET, D. « Les enveloppes solaires de Ralph Knowles, ou les ambivalences d'un modèle de régulation des formes urbaines », [en ligne], *Lieux Communs - Les Cahiers du LAUA*, 2011, p. 195-206.
- SIRET, D. « Rayonnement solaire et environnement urbain : de l'héliotropisme au désenchantement, histoire et enjeux d'une relation complexe », [en ligne], *Développement durable et territoires*, vol. 4, n°2 « Santé et environnement », juillet 2013, 15 p.
- SIRET, D., HARZALLAH, A., « Architecture et contrôle de l'ensoleillement », [en ligne], *Congrès IBPSA France*, Saint-Pierre de la Réunion, novembre 2006, 8 p.
- DE SOLAGES, B. *Dialogue sur l'analogie*, Paris : Aubier, 1946, 168 p.
- SORRE, M. *L'Homme sur la terre*, Paris : Hachette, 1961, 365 p.
- SORRE, M. *Les Fondements biologiques de la géographie humaine. Essai d'une écologie de l'homme*. Paris : Armand Colin, 1943, 440 p.
- SORRE, M. *Les Fondements de la géographie humaine : Les Fondements techniques*, 2 tomes, [1ère éd. 1948, 1950], Paris : Armand Colin, 1954, 1031 p.
- SORRE, M. *Les Fondements de la géographie humaine : L'Habitat. Conclusion générale*, Paris : Armand Colin, 1952, 499 p.
- SOUVIRON, J. « The construction of efficiency: Glazing insulation in France and Belgium since 1945 » in : MASCARENHAS-MATEUS, J., PAULA PIRES, A. (eds.), *History of Construction Cultures*, Londres : CRC Press, 2021, p. 321-328.

- SUBRÉMON, H. *Habiter avec l'énergie. Pour une anthropologie sensible de la consommation d'énergie*, Thèse NR de Sociologie, Université Paris 10, 2009, 419 p. Dir. BONNIN P.
- TEITELBAUM, E., CHEN, K. W., AVIV, D. *et. al.* « Membrane-assisted radiant cooling for expanding thermal comfort zones globally without air conditioning », [en ligne], *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, n° 35, septembre 2020, 8 p.
- TRAISNEL, J.-P. *Le Métal et le verre dans l'architecture en France. Du mur à la façade légère*, Thèse NR Urbanisme, Université Paris 8 – Saint-Denis, Institut Français d'Urbanisme, 1997, 471 p. Dir. GUILLERME A.
- TRAISNEL, J.-P., MERLIN, P. *Énergie, environnement et urbanisme durable*, Paris : PUF, (coll. Que sais-je ?), 1996, 127 p.
- TRICART, J. « Singapour. Quelques problèmes d'une ville-état », *Annales de Géographie*, tome 104, n° 584, 1995, p. 402-412.
- VERNADSKY, W. *La Biosphère*, [1ère éd. 1929], Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), 2002, 281 p.
- VERNOTTE, P. « La chaleur se propage-t-elle ? », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, tome 248, 1959, p. 75-77.
- VIDAL DE LA BLACHE, P. « La Géographie humaine. Ses rapports avec la géographie de la vie », *Revue de synthèse historique*, tome VII-2, n°20, octobre 1903, p. 219-240.
- VOGT, A. M. *Le Corbusier, le bon sauvage : vers une archéologie de la modernité*, Gollion : Infolio, (coll. Archigraphy), trad. de l'allemand par L. BIÉTRY, 2003, 304 p.
- VON BERTALANFFY, L. *Théorie générale des systèmes*, [1ère éd. 1973], Paris : Dunod, (coll. Idem), trad. de l'anglais par J. B. CHABROL, 2012, 328 p.
- VON UEXKÜLL, J. *Mondes animaux et monde humain. La théorie de la signification*, [1ère éd. 1965], Paris : Pocket, (coll. Agora), trad. de l'allemand par P. MULLER, 2004, 188 p.
- VRIGNON, A. « Vers une société solaire ? Réflexions et expérimentations autour d'une transition énergétique potentielle dans les années 1968 » in : MATHIS, C.-F., MASSARD-GUILBAUD, G. (dir.), *Sous le soleil. Systèmes et transitions énergétiques du Moyen-Âge à nos jours*, Paris : Éditions de la Sorbonne, (coll. Homme et Société), 2019, p. 343- 353.
- WATSON, D. « Bioclimatic Design Research » in : BOËR, K. W. (éd.), *Advances in Solar Energy. An Annual Review of Research and Development*, vol. 5, New York : Plenum Press, 1989, p. 402-438.
- WATSON, D. *Le Livre des maisons solaires*, Montréal : L'Étincelle, trad. de l'américain par R. CAMOUS, 1979, 264 p.
- DE WEVER, P., MARTIN, H. *L'Énergie de la Terre*, Les Ulis : EDP Sciences, (coll. Terre à portée de main), 2017, 112 p.
- WIENER, N. *Cybernétique et société. L'Usage humain des êtres humains*, Paris : Seuil, (coll. Points Sciences), trad. de l'anglais par P.-Y. MISTOULON et R. LE ROUX, 2014, 220 p.
- WIENER, N. *La Cybernétique. Information et régulation dans le vivant et la machine*, Paris : Seuil, (coll. Sources du savoir), trad. de l'anglais par R. LE ROUX *et. al.*, 2014, 369 p.
- WILSON, C. *The Myth of Santa Fe: Creating a Modern Regional Tradition*, Albuquerque : University of New Mexico, 1997, 420 p.
- YANNAS, S., ERELL, E., MOLINA, J. L. *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*, Londres : James & James, 2005, 176 p.
- YOSHINO, M. M. *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*, Tokyo : University of Tokyo Press, 1975, 549 p.
- ZÈVI, B. *Dialectes architecturaux*, Paris : Éditions du Linteau, trad. de l'italien par M. GUÉNEAU, 2016, 149 p.

Sitographie :

- *A Machine for Climate: The House Beautiful/AIA Climate Control Project*, [consulté le 11/11/2020], disponible à l'adresse : <http://web.mit.edu/nature/archive/student_projects/2007/rsr/>
- BAER, S. « Some Passive Solar Buildings with a Focus on Projects in New Mexico », *Presentation for the Albuquerque Chapter of the AIA, January 15, 2009*, [consulté le 10/12/2020], disponible à l'adresse : <<http://www.zomeworks.com/other-articles/>>
- BONTEMS, V. « Au-delà de Simondon (1). Le progrès des lignées techniques », [en ligne], in : *Implications Philosophiques*, 22 nov. 2016, [consulté le 02/09/2021], disponible à l'adresse : <<http://www.implications-philosophiques.org/le-progres-des-lignees-techniques/>>
- « Pergolas bioclimatiques, des lames orientables pour un confort accru », *Le Moniteur*, 21 sept. 2016, [consulté le 02/02/2022], disponible à l'adresse : <<https://www.lemoniteur.fr/article/pergolas-bioclimatiques-des-lames-orientables-pour-un-confort-accru.1312359>>
- RAHM, P. « Glissement climatique : quel avenir pour les villes face aux canicules ? » [en ligne], in : *AOC*, 10 sept. 2020, [consulté le 02/01/2022], disponible à l'adresse : <<https://aoc.media/opinion/2020/09/09/glissement-climatique-quel-avenir-pour-les-villes-face-aux-canicules/>>
- « Un PLU bioclimatique pour Paris », *C.A.U.E. de Paris*, 2021, [consulté le 02/02/2022], disponible à l'adresse : <<https://www.caue75.fr/un-plu-bioclimatique-pour-paris>>

LISTE DES ENTRETIENS

- AMOUROUX Dominique, critique d'architecture, le 06/03/2021 (à distance).
- BORNAREL Alain, ingénieur, le 08/06/2020 (à distance).
- BANYULS Bernard, architecte, le 19/06/2019 et le 23/10/2019 à Perpignan.
- BARDOU Patrick, architecte et éditeur, le 09/10/2019 et le 15/07/2020 à Marseille.
- BOUILLOT Jean, architecte, le 30/07/2019 à Poiseul-la-Ville-et-Laperrière.
- CÉLAIRE Robert, ingénieur, le 17/07/2020 et le 18/07/2020 à Lambesc.
- CLAUX Patrick, architecte, le 10/03/2020 à La Rochelle.
- COLZANI Joseph, architecte, le 20/06/2019 à Lavalette.
- CORDIER Jean-Pierre, architecte, le 22/05/2019 à Toulouse.
- DESCOMBE Samuel, architecte, le 17/10/2019 à Treilles.
- FERNANDEZ Pierre, architecte, le 29/01/2020 à Toulouse.
- GANDEMER Jacques, ingénieur, le 09/11/2020 (à distance).
- GERBER Mariette, nutritionniste, le 17/10/2019 à Treilles.
- HOLTZ Michael J., architecte, le 22 et 23/04/2020 (à distance).
- IZARD Jean-Louis, architecte, le 07/10/2019 à Marseille et le 17/03/2020 (à distance).
- KELBAUGH Douglas, architecte, le 23/04/2020 (à distance).
- LAURIOL Jean-Luc, architecte, le 06/02/2021 (à distance).
- LAIGNELOT Robert « Bob », architecte, le 28/01/2020 à Ventenac-Cabardès.
- LAVIGNE Marie-Françoise, retraitée, le 24/04/2019 à Die.
- LIÉBARD Alain, architecte, le 13/03/2020 à Paris.
- LOUBES Jean-Paul, architecte, le 01/03/2021 (à distance).
- MASSON Valéry, météorologue, le 12/10/2020 (à distance).
- MONMEYRANT Françoise, monteuse, le 23/05/2019 à Toulouse.
- NICOLAS Frédéric, architecte, le 09/07/2019 à Apt.
- PERRIN Guillaume, ingénieur, le 15/09/2020 (à distance).
- PEUPORTIER Bruno, ingénieur, le 01/07/2020 (à distance).
- RAOUST Michel, ingénieur, le 21/02/2020 à Paris.
- ROBERT Jean-François, ingénieur, le 23/04/2020 (à distance).
- RODITI David, architecte, le 23/10/2019 à Perpignan.
- SÉSOLIS Bernard, ingénieur, le 12/03/2020 à Paris.
- SOUCHE Claude, architecte, le 19/06/2019 à Perpignan.
- TJOYAS Mimi, architecte, le 18/06/2019 et le 23/10/2019 à Perpignan.
- TRAISNEL Jean-Pierre, architecte, le 13/06/2019 et le 24/06/2019 à Paris.
- TRICAUD Jean-François, ingénieur, le 18/10/2019 à Odeillo-Font-Romeu.
- VAYE Marc, architecte, le 03/02/2020 à Paris.
- WRIGHT David, architecte, le 15, 16 et 17/01/2020 et le 30/09/2021 (à distance).
- WURSTEISEN Georges, architecte, le 18/06/2019 et le 15/10/2019 à Cabestany.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Échange de chaleur à midi pour une journée d'été.....	40
Figure 2 : Reproduction du diagramme de Geiger en 1963.....	41
Figure 3 : Traduction en français du diagramme de Geiger.....	41
Figure 4 : Représentation schématique de la distribution des températures en fonction des pentes....	43
Figure 5 : Profil de température à Toronto, d'après W. E. Knowles Middleton et F. Graham Millar.....	50
Figure 6 : Influence des pistes et de l'enherbement sur les couches d'air proches du sol d'un aérodrome, d'après W. Knochenhauer.....	60
Figure 7 : Carte climatique de la zone de New Jersey publiée dans le numéro de novembre 1949 de House Beautiful, d'après P. E. Siple.....	81
Figure 8 : Analyse thermique de la zone de Boston, publiée dans le numéro de mars 1951 du Bulletin de l'American Institute of Architects.....	83
Figure 9 : Analyse du rayonnement solaire et du vent de la zone de Boston, publiée dans le numéro de mars 1951 du Bulletin de l'American Institute of Architects.....	84
Figure 10 : Analyse de l'humidité et des précipitations de la zone de Boston, publiée dans le numéro de mars 1951 du Bulletin de l'American Institute of Architects.....	84
Figure 11 : Tests en soufflerie pour déterminer les caractéristiques aérodynamiques des maisons modernes, d'après W. W. Caudill, J. M. Rowlett, W. E. Scott, et al.....	101
Figure 12 : Distribution des températures dans une toiture terrasse en hourdis creux de 19 cm à 11 h, 13 h et 19 h et visualisation de la transmission d'une onde de chaleur.....	115
Figure 13 : Diagramme psychrométrique publié par l'ASHRAE en 1932.....	118
Figure 14 : Apports solaires pour différentes orientations et en toiture en été, en hiver (solstices) et aux équinoxes.....	126
Figure 15 : Schéma représentant la réduction de la variation des températures (1) par la microclimatologie (2), le contrôle climatique par le bâtiment (3) et en dernier recours le chauffage et le rafraîchissement mécanique (4).....	128
Figure 16 : Photographies des ombres portées par des arbres plantés à l'est et à l'ouest d'une construction pour différentes heures de la journée.....	130
Figure 17 : Diagramme bioclimatique d'Olgyay.....	142
Figures 18 à 21 : Données météorologiques horaires pour la zone de New York (fig. 18) repérées sur un diagramme bioclimatique d'Olgyay et reliées pour chaque mois pour la zone de Minneapolis (fig. 19), de Phoenix (fig. 20) et de Miami (fig. 21).....	143
Figures 22 et 23 : Flux de chaleur transmis à l'intérieur d'une « maison orthodoxe » un 21 janvier (fig. 22) et un 21 juin (fig. 23) pour différentes orientations.....	149
Figure 24 : Comparaison du comportement thermique d'une « maison orthodoxe » (gauche) et d'une « maison équilibrée » (droite) en hiver (haut) et en été (bas) dans le climat de New York. Les apports	

<i>et les déperditions thermiques pour chaque façade sont représentés en fonction du temps par une courbe vers l'intérieur (apports) ou vers l'extérieur (déperditions).....</i>	<i>151</i>
Figure 25 : <i>Maquette d'une « maison équilibrée » conçue suivant la méthode d'Olgyay pour le climat de Miami.....</i>	<i>152</i>
Figure 26 : <i>Caractéristiques souhaitables de déphasage thermique pour chaque façade et la toiture dans les climats de Minneapolis, New York, Phoenix et Miami.....</i>	<i>157</i>
Figure 27 : <i>Valeurs relatives de l'inertie et de l'isolation thermique en fonction des climats.....</i>	<i>158</i>
Figure 28 : <i>Morphologie optimale des bâtiments dans différentes régions en fonction des apports et des déperditions thermiques.....</i>	<i>163</i>
Figure 29 : <i>Effets de différents brise-vent sur la vitesse relative de l'air.....</i>	<i>180</i>
Figure 30 : <i>Facteurs d'absorption, d'émission et de réflexion au rayonnement visible et infrarouge de différents matériaux.....</i>	<i>195</i>
Figure 31 : <i>Traduction du diagramme de Yellott en français et classification des matériaux.....</i>	<i>196</i>
Figure 32 : <i>Courbes d'iso-intensité superposées à un diagramme solaire pour un plan incliné à 75°.....</i>	<i>216</i>
Figure 33 : <i>Diagramme solaire en coordonnées orthogonales.....</i>	<i>217</i>
Figure 34 : <i>Diagramme solaire en projection orthographique.....</i>	<i>217</i>
Figure 35 : <i>Différentes morphologies de protections solaires.....</i>	<i>220</i>
Figure 36 : <i>Masques d'ombres pour différents types de protections solaires.....</i>	<i>221</i>
Figure 37 : <i>Beadwall installé dans une serre.....</i>	<i>224</i>
Figure 38 : <i>Fonctionnement du Skylid.....</i>	<i>226</i>
Figure 39 : <i>Skylid installé dans la maison de S. Baer.....</i>	<i>227</i>
Figure 40 : <i>Coupe schématique de l'annexe de l'école secondaire de Saint-Georges à Wallasey.....</i>	<i>237</i>
Figure 41 : <i>Principe de claire-voie de la Suncatcher House.....</i>	<i>242</i>
Figure 42 : <i>Suncatcher House de J. Hammond et J. Plumb.....</i>	<i>243</i>
Figures 43 : <i>Maison Sunscoop de D. Wright à Santa Fe. Le muret en allège cache huit fûts de 200 litres remplis d'eau.....</i>	<i>247</i>
Figure 44 : <i>Intérieur de la maison Sunscoop. Le muret en allège qui sert de banquette cache huit fûts de 200 litres remplis d'eau.....</i>	<i>247</i>
Figure 45 : <i>Colonne d'eau de 5 m³ dans la maison des Perdrigals de Michel Gerber.....</i>	<i>249</i>
Figure 46 : <i>« Radiateurs solaires » de M. Gerber en partie supérieure de la serre d'une maison à Ginestas.....</i>	<i>249</i>
Figure 47 : <i>Capteur inventé par E. S. Morse et breveté en 1881.....</i>	<i>254</i>
Figure 48 : <i>Schéma du capteur de F. Trombe.....</i>	<i>256</i>

Figure 49 : Schéma du « mur-rideau chauffant » du four solaire d'Odeillo-Font-Romeu.....	256
Figure 50 : Maison de G. Wursteisen à Cabestany.....	259
Figure 51 : Coupe schématique de la maison de G. Wursteisen avec le capteur à air en fonctionnement d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).....	260
Figure 52 : Prototype conçu par F. Trombe de maison équipée d'un mur capteur fabriqué à partir de radiateurs peints en noir.....	263
Figure 53 : Coupe du mur Trombe.....	263
Figure 54 : Maison à mur Trombe de 1967.....	264
Figure 55 : « Maisons des ingénieurs » de 1974 équipées de murs Trombe-Michel.....	267
Figure 56 : Drumwall dans la maison de S. Baer à Corrales.....	270
Figure 57 : Face intérieure du Drumwall dans la maison de S. Baer à Corrales.....	271
Figure 58 : Détail du système Drumwall intégré en allège dans la façade sud des bureaux du monastère bénédictin de Pecos.....	271
Figure 59 : Coupe du Drumwall dans la maison de S. Baer à Corrales.....	274
Figure 60 : Construction en Vendée équipée d'un mur Trombe et de panneaux isolants et réflecteurs empruntés au système Drumwall.....	274
Figure 61 : Murs thermiques (en blanc) dans une construction conçue par M. Gerber.....	277
Figure 62 : Coupe de la première maison solaire du MIT et du réservoir d'eau chaude de 65 000 litres.....	281
Figure 63 : Publicité pour le capteur à air conçu par G. O. G. Löf.....	283
Figure 64 : Capteur à air fabriqué à partir de vitres récupérées pour le chauffage d'un dôme à Drop City.....	285
Figure 65 : Principe de thermosiphon du système à boucle d'air fermée et stockage de pierre.....	286
Figure 66 : Maison de P. Davis à Corrales conçue par S. Baer et équipée d'un système à thermosiphon.....	286
Figure 67 : Coupe de la maison de P. Davis à Corrales.....	287
Figure 68 : Maison aux Adrets conçue par P. Lavigne et équipée d'un système à thermosiphon.....	289
Figure 69 : Coupe de la maison conçue par P. Lavigne, similaire à celle de P. Davis.....	289
Figure 70 : Exemples de capteurs à air.....	291
Figure 71 : Maison de D. et S. Balcomb à Santa Fe.....	293
Figure 72 : Coupe de la maison de D. et S. Balcomb.....	293
Figure 73 : Axonométrie de la maison de D. et S. Balcomb, d'après le numéro de décembre 1976 de Popular Science.....	294
Figure 74 : Angle nord-ouest de la maison conçue par B. Laignelot à Montlaur.....	295

Figure 75 : Coupe de la maison conçue par B. Laignelot à Montlaur.....	296
Figure 76 : Schéma des principales lignées techniques des techniques solaires passives de chauffage.....	298
Figure 77 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur dirigé par des stores vénitiens faite au Texas Engineering Experiment Station.....	304
Figure 78 : Dispositif à lames orientables pour la ventilation.....	304
Figure 79 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur en fonction de l'aménagement faite au Texas Engineering Experiment Station.....	309
Figure 80 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur pour des ouvertures de même taille faite au Texas Engineering Experiment Station.....	310
Figure 81 : Étude en soufflerie du flux d'air intérieur pour des ouvertures d'entrée plus petites que des ouvertures de sortie faite au Texas Engineering Experiment Station.....	310
Figure 82 : Vitesses relatives de l'air à l'intérieur d'un local ventilé transversalement en fonction de son orientation par rapport au vent, d'après Givoni.....	313
Figure 83 : Vitesses relatives de l'air à l'intérieur d'un local mono-orienté en fonction de son orientation par rapport au vent et de l'ajout de saillies verticales.....	313
Figure 84 : « Toits parasols » de l'hôpital français de Suez conçu par Ayoub.....	314
Figure 85 : Coupe schématique de la cheminée solaire intégrée dans la maison de J. Davis à Hutchinson (Kansas).....	318
Figure 86 : Coupe du principe d'occultation formant une cheminée solaire utilisée pour la ventilation estivale de la maison Sundown conçue par D. Wright.....	319
Figures 87 et 88 : Serre et extracteurs statiques de l'atelier conçu par M. Gerber et P. Pous et principe de ventilation par effet de cheminée.....	320
Figure 89 : Murs à glace et fosse de stockage de la glace à Kerman (Iran).....	324
Figure 90 : Prototype conçu par F. Trombe de maison refroidie par une surface sélective froide formée d'une peinture à l'oxyde de zinc.....	326
Figure 91 : Construction refroidie par rayonnement de grande longueur d'onde située au Texas et conçue par le Center for Maximum Potential Building Systems d'après les recherches de Givoni.....	329
Figure 92 : Principe du climatiseur saharien intégré à un moucharabieh.....	331
Figure 93 : Prototype d'habitation conçu pour tester le système Skytherm à l'Université de Phoenix.....	339
Figure 94 : Toiture de la maison d'Atascadero équipée du système Skytherm.....	342
Figure 95 : Intérieur de la maison d'Atascadero. On remarque que le plafond blanc est formé de tôles métalliques nervurées pour favoriser les échanges thermiques.....	343
Figure 96 : Coupe détaillée du système Skytherm de la maison d'Atascadero.....	345
Figure 97 : Panneaux isolants du système Skytherm en position repliée (haut) et dépliée (bas).....	345

Figure 98 : Schéma des principales lignées techniques des techniques solaires passives de rafraîchissement.....	351
Figure 99 : Illustration du principe du thermosiphon et de la convection naturelle dans le manuel de D. Wright.....	384
Figure 100 : Illustration de la relation entre l'intensité énergétique reçue par une surface et l'angle d'incidence dans le manuel d'E. Mazria.....	390
Figure 101 : Illustration des phénomènes de conduction et de convection naturelle le long des surfaces dans le manuel d'E. Mazria.....	390
Figure 102 : Croquis du système Skytherm réalisé par M. Gerber lors d'une présentation d'H. Hay en 1975.....	399
Figure 103 : Exemple d'utilisation d'un diagramme solaire pour le tracé des masques permanents sur un site.....	413
Figure 104 : Exemple de croquis de conception de D. Wright.....	416
Figure 105 : Exemple de croquis de conception d'A. Adams.....	417
Figure 106 : Réflecteur d'une maison conçue par M. Gerber à Ginestas.....	434
Figure 107 : Maison bioclimatique conçue par J.-P. Cordier et située à Gaillac.....	435
Figure 108 : Intérieur de la maison conçue par J.-P. Cordier. On remarque le plafond formé de briques creuses éclatées au marteau.....	435
Figure 109 : Maison de l'Estradelle conçue par M. Gerber. On remarque que la maison est particulièrement bien abritée par des plantations brise-vent.....	440
Figure 110 : Ensemble des quatre habitations du Sundwellings Program conçues par P. Van Dresser à Ghost Ranch.....	443
Figure 111 : Principe de ventilation des maisons du Sundwellings Program.....	444
Figure 112 : Coupe détaillée de la maison équipée d'une serre du Sundwellings Program. On remarque que l'isolation thermique a été soignée.....	444
Figure 113 : « Réseau thermique » utilisé par le LASL pour la modélisation de la maison équipée d'une serre.....	447
Figure 114 : Maisons individuelles du lotissement des Pradettes conçues par Cordier.....	449
Figure 115 : Maison de D. Kelbaugh à New Jersey.....	455
Figure 116 : Coupe du mur Trombe sur deux niveaux de la maison de D. Kelbaugh.....	456
Figure 117 : Exemple de description détaillée du microclimat et du climat local d'une construction dans l'inventaire des Constructions solaires passives européennes.....	459
Figure 118 : Serre de la maison des Perdrigals conçue par M. Gerber particulièrement inconfortable en été.....	472
Figure 119 : Serre de l'atelier conçu par M. Gerber et P. Pous sujette à des surchauffes malgré les possibilités de ventilation.....	474

Figure 120 : Espace-tampon qui peut être intégralement ventilé sur deux niveaux conçu par M. Gerber et P. Pous pour une rénovation.....	474
Figure 121 : Serre d'une maison conçue par J.-P. Cordier peinte au blanc d'Espagne par l'habitante afin de limiter la pénétration du rayonnement solaire estival et limiter les surchauffes.....	476
Figure 122 : Carte de la morphologie optimale des serres en fonction des climats régionaux en France.....	477
Figure 123 : Serre d'une maison à Nice orientée au sud-est et au sud-ouest et thermiquement très inconfortable en été.....	479
Figure 124 : Maison de la famille Monchoux conçue par J.-P. Cordier.....	481
Figure 125 : Coupe et détail du système de stockage thermique de la maison de la famille Monchoux.....	481
Figure 126 : Intérieur de la serre d'une maison conçue par J.-P. Cordier dont le sol a été recouvert de tapis par l'habitante.....	484
Figure 127 : HLM des « Basses Fouassières » conçus par J.-R. Mazaud et C. Parant, assistés par M. Cabanat et B. Sésolis. On remarque que les stores blancs sont baissés et occultent les murs Trombe en journée.....	495
Figure 128 : Système de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment de la Cour constitutionnelle fédérale à Karlsruhe en Allemagne, conçu par R. Ayoub sur le principe de la « climatisation cybernétique ».....	513
Figure 129 : Exemple de modélisation du LASL d'un système à gain direct par un réseau thermique. On remarque des analogies graphiques avec les symboles utilisés en électronique.....	519
Figure 130 : Réseau thermique utilisé pour la modélisation du système Skytherm par P. Niles.....	524
Figure 131 : Synthèse des échanges thermiques en mégacalorie (Mcal) de la maison d'Atascadero pour une journée d'hiver, d'après la modélisation de P. Niles.....	527
Figure 132 : Schéma de la modulation d'une onde thermique grâce à l'inertie, selon l'approche de F.-M. Camia.....	537
Figure 133 : Empilement des cellules reliées par des échelles caractéristique des villages des Indiens Pueblos.....	549
Figure 134 : Village de Taos Pueblo, exemple de l'architecture des Indiens Pueblos.....	550
Figure 135 : Exemple d'héliodon utilisé par R. Knowles pour l'étude de l'architecture Pueblo.....	559
Figure 136 : Hutte traditionnelle des zones tropicales humides africaines dont le confort thermique est vanté par R. Ayoub.....	564
Figure 137 : Mise en correspondance des cases des Mousgoum au Cameroun avec un moteur à explosion hérissé d'ailettes de refroidissement par R. Stein.....	565

Figure 138 : Photographie et coupe d'un mur d'acrotère de la région du M'Zab en Algérie.....	567
Figure 139 : Déflecteur protégeant des vents dominants une ouverture à l'ouest de la maison des Perdrigals conçue par M. Gerber.....	579
Figure 140 : Carte du potentiel d'utilisation de l'énergie solaire aux États-Unis selon une « faisabilité maximum » (jaune), une « faisabilité d'ingénierie » (rouge) et une « faisabilité minimum » (bleu) d'après P. Siple.....	597
Figure 141 : Évaluation du gisement solaire de la France métropolitaine en 1976 : carte de l'énergie solaire reçue chaque jour en moyenne en janvier et en juillet (en Wh/m ²).....	599
Figure 142 : Potentiel d'utilisation du mur Trombe pour le chauffage et la ventilation dans l'État du Texas (en foncé, carte de gauche) et emplacement des bâtiments existants utilisant cette technique (carte de droite).....	611
Figure 143 : Potentiel d'utilisation du système Skytherm pour le chauffage et le rafraîchissement dans l'État du Texas (en foncé, carte de gauche) et emplacement des bâtiments utilisant cette technique (carte de droite).....	611
Figure 144 : Potentiel de rafraîchissement par évaporation dans l'État de l'Arizona en fonction des besoins relatifs de chauffage et de rafraîchissement liés à la latitude et à l'altitude.....	614
Figure 145 : Illustration d'un kachina (esprit de la mythologie des Hopis) qui regarde le soleil depuis le toit d'Acoma Pueblo présentée dans le manuel de B. Anderson et M. Riordan.....	625
Figure 146 : Maison solaire de Junius et Louise Eddy dans l'État de Rhode Island.....	628

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	3
REMERCIEMENTS.....	5
RÉSUMÉ/ABSTRACT.....	7
AVANT-PROPOS.....	9
 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	 13
 I. LA NAISSANCE DE LA MICROCLIMATOLOGIE ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION À PARTIR DU CLIMAT.....	 29
 I.1. Comprendre les microclimats par la microclimatologie.....	 30
I.1.1. Rudolf Geiger et le climat près du sol	
I.1.1.1. Une climatologie à proximité du sol.....	31
I.1.1.2. La définition de l'ordre de grandeur des microclimats.....	34
I.1.1.3. L'importance des surfaces et des échanges radiatifs qu'elles occasionnent.....	36
I.1.2. Microclimats aménagés et rôle de la climatologie appliquée	
I.1.2.1. L'étude des microclimats aménagés et l'héritage de Geiger.....	45
I.1.2.2. Helmut Landsberg et la microclimatologie de l'aménagement.....	47
I.1.2.3. Landsberg et l'application de la climatologie à la conception architecturale et urbaine.....	53
I.1.2.4. Le problème des données relatives aux microclimats.....	55
I.1.3. La notion de microclimat et sa signification	
I.1.3.1. Les échelles du climat.....	58
I.1.3.2. La signification biologique et technique de la notion de microclimat.....	63
I.1.3.3. L'intérêt pour l'action des surfaces sur le microclimat.....	68
 I.2. Concevoir à partir du climat : synthèses des connaissances et premières tentatives.....	 71
I.2.1. L'émergence du « contrôle climatique »	
I.2.1.1. James Marston Fitch : de la météorologie à l'architecture.....	72
I.2.1.2. Le <i>House Beautiful Climate Control Project</i>	75

I.2.1.3. L'étude des microclimats et la traduction des données climatiques selon le <i>Climate Control Project</i>	78
I.2.1.4. Le manque d'une méthode de conception à partir du climat.....	85
I.2.2. Jeffrey E. Aronin et l'idée d'une « airchitecture »	
I.2.2.1. De l'architecture à « l'airchitecture ».....	89
I.2.2.2. Interpréter la microclimatologie du point de vue de l'architecture.....	95
I.2.2.3. L'importance des mouvements de l'air et de la ventilation.....	98
I.2.3. La construction en milieu tropical : influences des recherches locales sur la protection climatique	
I.2.3.1. Concevoir à partir du climat en milieu tropical.....	103
I.2.3.2. Des problèmes de conception propres aux climats tropicaux.....	110
I.2.3.3. L'importance de la physiologie pour la détermination de la zone de confort.....	117
I.3. Concevoir avec le climat selon Victor et Aladár Olgyay.....	122
I.3.1. De la « maison tempérée » à une méthode « universelle »	
I.3.1.1. Le défi théorique de tempérer une maison sans équipements mécaniques.....	123
I.3.1.2. La recherche d'une méthode de conception.....	131
I.3.1.3. La publication de <i>Design with Climate</i> en 1963.....	135
I.3.2. La conception bioclimatique comme méthode	
I.3.2.1. Une méthode de conception essentiellement analytique.....	137
I.3.2.2. Les diagrammes bioclimatiques, un outil parmi d'autres.....	140
I.3.2.3. La démonstration d'une « planification héliothermique ».....	146
I.3.3. La généralité de « l'approche bioclimatique » imaginée par Olgyay	
I.3.3.1. Comprendre les phénomènes thermiques pour concevoir avec le climat.....	154
I.3.3.2. Une attention renouvelée aux phénomènes microclimatiques.....	158
I.3.3.3. La diffusion de <i>Design with Climate</i>	163
Conclusion de la première partie.....	165
 II. LA FONCTION CLIMATIQUE DES ÉLÉMENTS ET LE DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES SOLAIRES PASSIVES.....	 169
II.1. Protection, régulation thermique et choix matériels.....	173
II.1.1. Microclimat et contrôle climatique aux abords de la construction	
II.1.1.1. Modifier le microclimat par la végétation et le traitement du sol.....	174
II.1.1.2. Le contrôle climatique du vent et l'usage des brise-vent.....	178

II.1.1.3. Le contrôle climatique par l'orientation de la construction.....	181
II.1.1.4. Le contrôle climatique par la morphologie de la construction.....	186
II.1.2. Le contrôle climatique par les surfaces et les matériaux	
II.1.2.1. L'action de l'enveloppe construite et l'importance accordée aux phénomènes thermiques.....	189
II.1.2.2. La connaissance des effets thermiques : le cas de la température des surfaces.....	192
II.1.2.3. De la surface à l'épaisseur : la prise en compte des phénomènes thermiques en régime périodique ou variable.....	200
II.1.3. La fonction des ouvertures et leur protection	
II.1.3.1. Comprendre et contrôler « l'effet de serre ».....	209
II.1.3.2. La reprise des méthodes numériques, graphiques et analogiques pour étudier les ouvertures et de leur protection.....	213
II.1.3.3. Le « contrôle solaire » et la synthèse des recherches sur les protections solaires.....	218
II.1.3.4. Les recherches expérimentales sur l'isolation mobile des ouvertures.....	223
II.2. Les techniques solaires passives de chauffage et leurs évolutions.....	232
II.2.1. Les systèmes de captage direct	
II.2.1.1. Une utilisation intuitive de l'effet de serre.....	233
II.2.1.2. Améliorer la compréhension des systèmes à gain direct.....	237
II.2.1.3. La serre, une pièce dédiée au captage direct.....	243
II.2.1.4. Maximiser le rôle de l'inertie thermique dans les systèmes de captage direct.....	246
II.2.2. Les systèmes de captage indirect	
II.2.2.1. Les recherches sur les systèmes de captage indirect à faible inertie.....	251
II.2.2.2. Un système de captage indirect à forte inertie : le cas du mur Trombe et de ses évolutions.....	260
II.2.2.3. Le système <i>Drumwall</i> de Baer, une lignée technique indépendante.....	269
II.2.2.4. L'importance des recherches de Balcomb au Los Alamos Scientific Laboratory pour l'évolution des techniques de captage indirect.....	275
II.2.3. Les systèmes de captage isolé	
II.2.3.1. Améliorer les performances des systèmes de captage direct et indirect.....	278
II.2.3.2. Stocker l'énergie solaire par convection naturelle : le cas des systèmes à air en boucle fermée.....	281
II.2.3.3. Stocker l'énergie solaire grâce à la convection forcée.....	291

II.3. Les techniques passives de rafraîchissement et leurs évolutions.....	299
II.3.1. Rafraîchissement et refroidissement par ventilation naturelle	
II.3.1.1 La ventilation naturelle, une notion équivoque.....	301
II.3.1.2. Ventilation naturelle et problèmes d'orientation : l'apport de Givoni.....	306
II.3.1.3. Le développement des connaissances sur « l'effet de cheminée ».....	315
II.3.2. L'utilisation du rayonnement de grande longueur d'onde et de l'évaporation de l'eau	
II.3.2.1. Comprendre et exploiter le rayonnement dans l'infrarouge lointain pour le rafraîchissement.....	321
II.3.2.2. Les recherches sur le rafraîchissement par l'évaporation de l'eau.....	329
II.3.3. L'isolation mobile pour la climatisation des habitations : le cas du système <i>Skytherm</i>	
II.3.3.1. La mise au point du système <i>Skytherm</i> , au croisement de plusieurs lignées techniques.....	335
II.3.3.2. Tests et premières mises à l'épreuve du système <i>Skytherm</i>	337
II.3.3.3. La maison d'Atascadero et les évolutions du système <i>Skytherm</i>	341
Conclusion de la deuxième partie.....	352

III. LA DIFFUSION ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE EN ARCHITECTURE À PARTIR DE 1973.....355

III.1. Développement et diffusion de la conception bioclimatique à partir de 1973.....	357
III.1.1. La conception bioclimatique au prisme des préoccupations énergétiques	
III.1.1.1. Concevoir rationnellement pour économiser l'énergie dans les bâtiments.....	359
III.1.1.2. Les effets du premier choc pétrolier et la diffusion des préoccupations énergétiques et environnementales.....	361
III.1.1.3. La publication de <i>La Face cachée du soleil</i> en France.....	367
III.1.1.4. Popularité et désintérêt progressif pour la conception bioclimatique.....	370
III.1.2. Promouvoir et diffuser la conception bioclimatique par les manuels	
III.1.2.1. Le problème de la diffusion des connaissances relatives à la conception bioclimatique et l'impact négatif des motivations environnementales.....	375
III.1.2.2. Synthétiser et transmettre des connaissances scientifiques et techniques.....	377
III.1.2.3. Communiquer une méthode de conception appropriable.....	382
III.1.3. La constitution et la diffusion des connaissances sur les techniques solaires passives grâce aux conférences	

III.1.3.1. Promouvoir et diffuser les techniques solaires passives éprouvées.....	392
III.1.3.2. Débattre des performances des techniques solaires passives : le cas des réunions de l'ISES.....	396
III.1.3.3. Les <i>Passive Solar Conferences</i> et la constitution d'un champ de recherche sur les techniques solaires passives.....	400
III.1.3.4. Les <i>Passive Solar Conferences</i> et la diffusion de la conception bioclimatique en France.....	404
III.2. Concevoir et construire suivant la conception bioclimatique.....	409
III.2.1. La démarche bioclimatique et le problème de l'intégration des techniques solaires passives	
III.2.1.1 Une démarche qualitative et déductive.....	410
III.2.1.2. L'importance du confort d'hiver et le choix des techniques solaires passives.....	414
III.2.1.3. Le problème de l'intégration des techniques solaires passives.....	417
III.2.1.4. Schématiser pour manipuler mentalement les techniques solaires passives.....	420
III.2.2. Dimensionner et quantifier suivant la démarche bioclimatique	
III.2.2.1. Déterminer quantitativement un effet qualitatif.....	422
III.2.2.2. Le problème du dimensionnement des techniques solaires passives et de l'approximation des méthodes de calcul.....	424
III.2.2.3. L'évolution réglementaire et l'incitation à la quantification.....	429
III.2.2.4. Anticiper dans le détail le comportement thermique d'une construction bioclimatique.....	431
III.2.3. L'approche expérimentale des réalisations bioclimatiques et solaires passives	
III.2.3.1. L'instrumentation des constructions bioclimatiques et solaires passives....	436
III.2.3.2. L'exemple de la maison <i>L'Estradelle</i> dans les Corbières.....	439
III.2.3.3. L'exemple du <i>Sundwellings Program</i> au Nouveau-Mexique.....	442
III.2.3.4. Développements et limites de l'instrumentation des constructions bioclimatiques.....	448
III.3 Problèmes et limites des réalisations bioclimatiques.....	452
III.3.1. La diffusion des techniques solaires passives et le problème de l'abstraction du climat	
III.3.1.1. Le paradoxe de la diffusion des techniques solaires passives.....	453
III.3.1.2. Le problème des inventaires des maisons bioclimatiques et solaires passives.....	457

III.3.1.3. La singularité des climats de montagne d'Odeillo-Font-Romeu et du Nouveau-Mexique.....	461
III.3.1.4. Santa Fe : un climat exceptionnel et un contexte culturel propice au développement des techniques solaires passives.....	464
III.3.2. Le problème de la reproductibilité d'une technique solaire passive : le cas de la serre	
III.3.2.1. La serre : une technique solaire passive adaptée à tous les climats ?.....	468
III.3.2.2. L'inconfort thermique : un facteur d'évolution des serres et de leur dimensionnement.....	471
III.3.2.3. Le problème de l'habitabilité des serres.....	477
III.3.3. Habiter et comprendre une maison bioclimatique	
III.3.3.1. Le problème du confort.....	485
III.3.3.2. Choisir d'habiter une construction bioclimatique et l'habiter en conséquence.....	487
III.3.3.3. Habiter et comprendre une construction bioclimatique sans être spécialiste.....	491
III.3.3.4. La recherche d'une médiation des phénomènes thermiques auprès des habitants.....	494
Conclusion de la troisième partie.....	497

IV : PORTÉE PHILOSOPHIQUE DE LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE.....499

IV.1. La mentalité thermique et ses analogies.....	501
IV.1.1. La mentalité thermique de l'ensemble à l'élément	
IV.1.1.1. Schématiser globalement les phénomènes thermiques.....	503
IV.1.1.2. L'antinomie du terme « passif ».....	506
IV.1.1.3. Cybernétique et mentalité thermique.....	508
IV.1.1.4. Les techniques solaires passives et leurs analogies.....	514
IV.1.2. Les analogies électroniques et la modélisation thermique	
IV.1.2.1. L'homologie entre les phénomènes thermiques et électriques.....	516
IV.1.2.2. Les « réseaux thermiques » et les analogies électroniques.....	518
IV.1.2.3. Le cas de la modélisation thermique du système <i>Skytherm</i>	522
IV.1.2.4. Modéliser les « chemins thermiques ».....	525
IV.1.3. La signification des analogies électroniques pour la mentalité thermique	
IV.1.3.1. Le fonctionnement électronique comme image de la perfection technique.....	529
IV.1.3.2. L'ambiguïté de la notion d'amplification.....	533

IV.1.3.3. L'intuition de la modulation climatique.....	535
IV.2. Concevoir et construire dans la continuité de l'architecture vernaculaire.....	541
IV.2.1. L'adaptation climatique de l'architecture vernaculaire	
IV.2.1.1. L'épisode moderne et l'oubli du climat.....	543
IV.2.1.2. L'architecture vernaculaire comme expression d'un climat.....	545
IV.2.1.3. Le problème du déterminisme climatique.....	553
IV.2.2. L'hypothèse de la fonction climatique et l'analyse des constructions vernaculaires	
IV.2.2.1. L'hypothèse de la fonction climatique.....	557
IV.2.2.2. Une compréhension renouvelée des constructions vernaculaires et de leurs performances.....	562
IV.2.2.3. Fonction climatique contre fonction culturelle : le cas du mur d'acrotère....	566
IV.2.2.4. Fonction climatique et actualité de l'architecture vernaculaire.....	569
IV.2.3. Prolonger l'architecture vernaculaire par la conception bioclimatique	
IV.2.3.1. L'idéal d'un néo-vernaculaire.....	572
IV.2.3.2. Étudier les constructions traditionnelles pour concevoir et pour construire : le cas des Corbières.....	576
IV.2.3.3. La volonté de prolonger l'architecture vernaculaire.....	580
IV.3. Penser la relation au climat suivant l'approche bioclimatique.....	585
IV.3.1. L'approche bioclimatique et l'intuition des possibilités climatiques	
IV.3.1.1. La géographie humaine et le problème du déterminisme.....	587
IV.3.1.2. Possibilités et impossibilités climatiques.....	591
IV.3.1.3. L'exemple d'une possibilité climatique identifiée : le cas du « gisement solaire ».....	595
IV.3.2. L'approche bioclimatique et les points-clefs climatiques	
IV.3.2.1. Milieu techno-géographique et points-clefs selon Simondon.....	602
IV.3.2.2. Cartographier les points-clefs climatiques et les techniques solaires passives aux États-Unis.....	609
IV.3.3. La dimension symbolique du bioclimatisme	
IV.3.3.1. Vivre à un point-clef climatique : le cas de Paul Davis et du climat local de Corrales au Nouveau-Mexique.....	615
IV.3.3.2. L'imaginaire associé à l'énergie solaire et au climat selon le bioclimatisme.....	622
Conclusion de la quatrième partie.....	629
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	631

BIBLIOGRAPHIE.....	645
Sources d'archives et imprimées.....	645
Sources secondaires et références.....	662
SITOGRAFIE.....	670
LISTE DES ENTRETIEN.....	671
LISTE DES FIGURES.....	673
TABLE DES MATIÈRE.....	681

