



HAL
open science

Le climat est-il une ressource ? Perspectives historiques à partir de la conception bioclimatique en architecture

Clément Gaillard

► To cite this version:

Clément Gaillard. Le climat est-il une ressource ? Perspectives historiques à partir de la conception bioclimatique en architecture. 2022. halshs-03608682

HAL Id: halshs-03608682

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-03608682>

Preprint submitted on 15 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le climat est-il une ressource ?

Clément Gaillard

Biographie : Clément Gaillard est Normalien, designer et enseignant en design. Il a été formé à l'École Normale Supérieure de Cachan et il est diplômé du DSAA Alternatives Urbaines. Après avoir passé l'agrégation en Design, il a étudié pendant deux années la philosophie à l'Université Paris 1 dont il est sorti diplômé d'un Master 2 en 2018. Actuellement en troisième année de doctorat en Aménagement à l'Institut de Géographie (Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne) sous la direction de Sabine Barles et Anne Lefebvre, il prépare une thèse sur la naissance et les développements de la conception bioclimatique en architecture. En 2019, il a publié avec Catherine Geel une anthologie en anglais qui regroupe les grands textes contemporains sur l'écologie (*Extended French Theory and the Design Field*, éd. T&P). Ses recherches sont accessibles à l'adresse suivante : www.clementgaillard.com

Résumé (fr) : Cet article vise à étudier sous quelles conditions le climat peut être considéré comme une ressource, du point de vue de l'architecture et de l'aménagement. Après avoir abordé les caractéristiques physiques des ressources climatiques, l'article vise à démontrer que le développement de la conception bioclimatique a permis une compréhension plus fine de ce qui caractérise le climat comme une ressource énergétique. À partir de cette analyse historique, l'étude du cas de l'utilisation de l'énergie solaire permet de comprendre les difficultés qui ont émergé lors de la recherche du captage de ce qui a été nommé le « gisement solaire ». Ces difficultés, ainsi que les problèmes d'équité dans l'accès à des apports climatiques favorables, traduisent le caractère ambivalent de la ressource climatique, qui nous paraît d'une grande actualité aujourd'hui à l'époque du changement climatique.

Mots-clés (fr) : climat, environnement, conception bioclimatique, énergie, analyse thermique

Résumé (en) : This article aims to study under which conditions the climate can be considered as a resource, from the point of view of architecture and planning. After discussing the physical characteristics of climate resources, the article aims to demonstrate that the development of bioclimatic approach has enabled a deeper understanding of what characterizes climate as an energy resource. From this historical analysis, the study of the case of the use of solar energy makes it possible to understand the difficulties which emerged in the search for the capture of what has been called the "solar deposit". These difficulties, as well as the problems of equity in access to favorable climate inputs, reflect the ambivalent nature of the climate resource, which seems very important to us today at the epoch of climate change.

Mots-clés (en) : climate, environment, bioclimatic approach, energy, thermal analysis

L'idée que le climat puisse être une ressource en architecture semble *a priori* étrange ou inhabituelle. Le climat, qui peut être défini comme la « succession des circonstances atmosphériques et météorologiques, propre à une région du globe »¹ semble plutôt désigner un ensemble de phénomènes physiques en interaction, dans lequel prend éventuellement place un aménagement ou une construction. L'ensoleillement, le vent, la température, ainsi que les précipitations ou l'humidité semblent être autant de paramètres qui définissent un climat, mais ne constitueraient en aucun cas une ressource utilisable. Pour les ingénieurs thermiciens du début du XX^{ème} siècle, le climat était même l'inverse d'une ressource dans la mesure où il était avant tout une source de déperditions thermiques pour un bâtiment, notamment à cause des vitrages qui transmettaient la chaleur vers l'extérieur dans les climats froids. À l'inverse, ces mêmes vitrages pouvaient être une source de surchauffe dans d'autres climats ou durant les périodes ensoleillées, obligeant à surdimensionner les équipements de conditionnement d'air². Le climat était alors considéré comme une source de dépenses à cause des déperditions thermiques mal contrôlées. Ce point de vue est encore partagé de nos jours par de nombreux acteurs de la construction.

Les recherches menées par les architectes modernes avaient cependant contribué à mettre en avant les ressources climatiques dans une perspective essentiellement hygiéniste : le soleil, le vent et l'air pur devaient être privilégiés afin de permettre le plein épanouissement de l'homme moderne. La conception de nombreux sanatoriums est issue de cette idée d'une « climatothérapie »³. Dans une perspective différente, et plus intéressante pour notre étude, un intérêt croissant pour les effets physiques du climat a émergé vers le milieu du XX^{ème} siècle, notamment aux États-Unis, et a conduit à affirmer l'intérêt des apports climatiques dans la perspective d'une utilisation plus rationnelle de l'énergie. En effet, il est apparu à certains architectes, ingénieurs mais aussi climatologues qu'une meilleure compréhension du climat permettrait d'intégrer les apports climatiques et donc de ne pas recourir systématiquement aux systèmes artificiels de conditionnement d'air. Ces travaux ont donné naissance à la conception bioclimatique aux États-Unis qui s'est développée dès le début des années 1970 en France. Cette prise de conscience théorique s'était également opérée au niveau pratique avec les recherches menées par différents chercheurs sur le captage et l'utilisation directe de l'énergie solaire. Ces recherches mettaient en évidence que l'ensoleillement pouvait assurer une grande partie des besoins énergétiques habituellement assurés par les énergies fossiles, notamment le chauffage des habitations et la production d'eau chaude domestique.

Le problème de l'utilisation de l'énergie solaire a cependant soulevé de nombreuses difficultés quant à la perspective d'utiliser les énergies issues du climat. Les phénomènes physiques

1 Patrick Bardou, Varoujan Arzoumanian, *Archi de soleil*, Marseille, Parenthèses, 1978, p. 109.

2 Marcel Roubinet, *La Climatization*, Paris, PUF (coll. Que sais-je ?), 1970, p. 118.

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

à l'origine des climats dispensent des ressources inégalement réparties dans le temps et l'espace. Le rayonnement solaire par exemple est plus ou moins transmis à la surface du globe à cause des variations globales et locales de l'atmosphère, il est une ressource peu concentrée et exploitable de manière intermittente. L'idée que le climat puisse être utilisé comme une ressource disponible se heurte donc à des contraintes météorologiques, c'est-à-dire propres aux phénomènes atmosphériques : les énergies du climat désigneraient un type de ressources particulières dont l'usage nécessite des moyens spécifiques. Contrairement à un gisement matériel qui peut être concentré et de bonne qualité, les ressources climatiques semblent immatérielles et difficilement exploitables en pratique. Les caractéristiques physiques des phénomènes climatiques plaideraient pour qu'on ne considère pas le climat comme une ressource à proprement parler.

Pourtant un examen rigoureux des travaux évoqués précédemment semble indiquer que le climat peut être envisagé comme une ressource à condition d'en préciser la nature et qu'il représente même *la ressource principale* d'un aménagement ou d'une construction. L'hypothèse de cet article est qu'un climat regroupe des qualités qui permettent de l'assimiler à une ressource énergétique. Le problème consiste à comprendre comment un aménagement ou une construction bénéficie d'un climat, ce problème étant au cœur de la conception bioclimatique qui constitue la base théorique de notre étude. Il sera ainsi nécessaire d'analyser précisément la compréhension du climat telle qu'elle a été formalisée par le développement de la conception bioclimatique qui nous semble d'une grande actualité aujourd'hui. Nous nous appuyerons sur des manuels et des archives qui traitent de cette démarche de conception, ainsi que sur des entretiens menés avec des acteurs de cette démarche⁴. À partir de ce travail historique, nous verrons que le climat peut être considéré comme une ressource à condition que cette notion de « ressource » soit complexifiée. Après avoir étudié le problème du captage de l'énergie solaire, nous essaierons de tirer les conséquences pratiques de la considération du climat comme une ressource énergétique.

1) L'approche bioclimatique, une compréhension énergétique du climat

Il existe déjà parmi le langage courant une classification qualitative et intuitive des climats : tel climat peut être considéré comme « favorable », tel autre est plutôt « défavorable » ou « rude » durant une certaine période de l'année. Mais considérer qu'un climat favorable puisse être une ressource nécessite d'approfondir et de clarifier cette intuition primitive. L'intérêt pour l'aménagement en fonction du climat a émergé peu avant le milieu du XX^{ème} siècle aux États-Unis sous l'impulsion de climatologues et d'architectes sensibles à la climatologie. Parmi ceux-ci, on

⁴ Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche doctoral portant sur la naissance de la conception bioclimatique, mené sous la direction de Sabine Barles et Anne Lefebvre à l'Université Paris 1.

trouve l'architecte et historien de l'architecture James Marston Fitch (1909-2000) auteur en 1947 d'un ouvrage célèbre intitulé *American Buildings: The Forces that Shape It*. Durant la Seconde Guerre mondiale, Fitch avait été engagé comme climatologue par l'US Air Force. Par son analyse de l'évolution des constructions américaines à partir du climat, Fitch avait attiré l'attention sur l'intérêt d'une meilleure compréhension des phénomènes climatiques en vue de leur utilisation dans l'habitat⁵. Ce potentiel d'utilisation des énergies du climat, notamment de l'énergie solaire et dans une moindre mesure de l'énergie éolienne, n'avait pas échappé aux prospecteurs et conseillers des grandes compagnies pétrolières américaines de l'époque.

Après la Seconde Guerre mondiale, les préoccupations relatives à la raréfaction des ressources fossiles étaient croissantes⁶. Eugene Ayres, alors assistant technique d'une grande compagnie d'exploration pétrolière, propose en 1948 dans un article intitulé « Major Sources of Energy » (*Sources majeures d'énergie*) d'envisager l'utilisation des ressources du climat dont il affirme qu'elles sont « renouvelables »⁷. Cette idée, aujourd'hui commune, est nouvelle à l'époque et l'article d'Eugene Ayres est considéré comme particulièrement novateur en 1948⁸. Dans cet article, il propose de distinguer les sources d'énergie « capitalisées », comme le pétrole, le gaz ou l'uranium et les sources d'énergies qui forment un « gain » (*income*) utilisable de manière continue. Dans cette dernière catégorie, on retrouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne ainsi que la géothermie. Cette distinction entre des énergies capitalisées et des gains énergétiques issus de sources renouvelables permet de comprendre en quel sens les énergies issues du climat forment une ressource bien différente des ressources capitalisées sous forme matérielle et directement utilisable. La caractéristique d'une ressource climatique est qu'elle est en théorie continuellement disponible, mais elle est peu concentrée à l'inverse de nombreuses autres ressources et notamment des ressources d'énergies fossiles. Pour donner un ordre de grandeur, on estime que 10 m³ d'air mû à 80 km/h faisant fonctionner une éolienne fournit autant d'énergie que trois millilitres (0,003 litre) de pétrole, le pétrole ayant la caractéristique d'être une ressource énergétique particulièrement concentrée⁹. En ce qui concerne l'énergie éolienne celle-ci n'est pas concentrée, elle est discontinue et reste sensible aux moindres reliefs ce qui rend difficile le captage des énergies éoliennes près du sol. Ces propriétés physiques des énergies issues du climat caractérisent ces ressources comme *diffuses*, à l'inverse des ressources matérielles qui seraient plus ou moins concentrées.

Les travaux évoqués précédemment sur l'aménagement et l'influence du climat ainsi que ceux menés sur les énergies renouvelables ont eu une influence déterminante sur l'émergence de la

5 James Marston Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, Cambridge, The Riverside Press, 1947, p. 289.

6 Daniel A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, New York, Oxford University Press, 2016, p. 75.

7 *Ibid.*, p. 84.

8 *Ibid.*

9 Jean-Marc Jancovici, « Éléments de base de base sur l'énergie au 21^e siècle », cours à donné à l'École des Mines de Paris, mai 2019, (en ligne).

conception bioclimatique en architecture. Parmi les acteurs à l'origine de cette méthode de conception, on trouve l'architecte Victor Olgyay qui a travaillé à adapter les connaissances de la climatologie à la conception architecturale : on lui doit la publication en 1963 d'un manuel intitulé *Design with Climate* qui est à l'origine de la conception bioclimatique. Victor Olgyay a formalisé les méthodes permettant d'intégrer les facteurs climatiques et les données météorologiques dans les processus de conception. Le premier article sur le sujet publié par Victor Olgyay en 1951 et intitulé « The Temperate house » (*La Maison tempérée*) porte sur la conception d'une habitation à partir de l'exposition solaire, le but étant de produire une ambiance intérieure confortable par des « moyens naturels »¹⁰. Olgyay tente de déterminer la morphologie de la future construction à partir d'outils géométriques permettant de modéliser la course du soleil. Il affirme que l'utilisation de l'énergie solaire a été négligée. À ce titre, il écrit : « tout ce rayonnement solaire non converti signifie une immense quantité d'énergie naturelle dont le concepteur doit se soucier. Son problème particulier est de construire un abri qui s'adaptera à la variation saisonnière, quotidienne et horaire de l'intensité du rayonnement solaire. »¹¹ Il apparaît dans cet extrait que l'énergie du climat non utilisée est *perdue*, comme si le concepteur qui ne prenait pas conscience de cette ressource climatique était contraint de la gaspiller inutilement.

Dans *Design with Climate*, son ouvrage majeur de 1963, Olgyay prolonge et complexifie cette intuition. Dans la continuité de son article de 1951, Victor Olgyay reproche l'emploi irréfléchi des systèmes de conditionnement d'air qui sont dispendieux en énergie. Il définit la démarche de conception de l'architecte en ces termes :

L'objectif de la conception thermique d'une structure est d'établir un environnement intérieur qui se rapproche le plus des conditions de confort dans un environnement climatique donné. En termes d'architecture, cela signifie que la planification et la structure d'un bâtiment doivent utiliser les possibilités naturelles pour améliorer les conditions sans l'aide d'appareils mécaniques.¹²

Le but du concepteur selon Victor Olgyay est de concevoir une construction « climatiquement équilibrée ». Il écrit à ce propos : « toute énergie thermique captée pendant les périodes de demande de chauffage (*underheated periods*) réduira les coûts de chauffage ; toute quantité de chaleur empêchée d'atteindre l'intérieur pendant les moments de surchauffe (*overheated times*) réduira les dépenses de refroidissement. »¹³ Le problème de la conception bioclimatique consiste à établir cet équilibre entre les périodes où les énergies incidentes du climat doivent être captées et celles où les

10 Victor Olgyay, « The Temperate House », *Architectural Forum: The Magazine of Building*, vol. 94, n° 3, New York, Time, 1951, p. 179, (Traduction personnelle).

11 *Ibid.*, p. 180-181, (Traduction personnelle).

12 Victor Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton, Princeton University Press, 1963, p. 126, (Traduction personnelle).

13 *Ibid.*, p. 126, (Traduction personnelle).

énergies doivent être défléchies et maintenues à l'extérieur. Pour ce faire, une construction ou un aménagement doit répondre à ces besoins apparemment contradictoires et continuellement variables. Selon Olgyay, le but est de maximiser les apports positifs et de minimiser les apports négatifs. Le climat serait donc à la fois ressource et anti-ressource : le soleil, durant certaines périodes de l'année dans les climats tempérés, et durant toute l'année dans les climats tropicaux ou arides, est *une ressource qu'il faut éviter de capter* afin de ne pas augmenter l'échauffement des parois. L'utilisation des énergies issues du climat est donc conditionnée par les périodes durant lesquelles celles-ci sont nécessaires et désirées : on retrouve ici le problème du décalage entre les besoins et la disponibilité des énergies dites naturelles ou renouvelables.

Tout un pan des recherches de Victor Olgyay a consisté à étudier les protections solaires et les stratégies permettant d'éviter de capter le rayonnement solaire direct et diffus. Ces recherches ont été menées avec son frère Aladár Olgyay et ont abouti à un ouvrage en 1957¹⁴. Mais il n'y a pas que le soleil qui soit une ressource climatique, le vent, mais aussi les écarts des températures ou la faible humidité relative sont des éléments climatiques qui forment une ressource potentiellement exploitable. L'exemple des murs à glace situés dans les déserts du Moyen-Orient est un moyen d'utiliser ces deux derniers phénomènes. Ces structures sont constituées de murs épais entourant une mince pellicule d'eau ouverte à l'air libre et permettent de produire de la glace pendant la nuit et ce, sans que la température ambiante ne descende en dessous de 0°C¹⁵. Ce phénomène s'explique par le fait que la température de la voûte céleste est bien inférieure à la température ambiante : dans les déserts et durant les nuits où l'humidité est très faible, la chaleur du sol et de l'eau est rayonnée vers la voûte céleste ce qui explique la possibilité de baisser la température de l'eau au point de la faire geler. Une humidité trop importante de l'air empêcherait le rayonnement thermique d'atteindre la voûte céleste et bloquerait ce phénomène. Cette caractéristique des climats désertiques où l'humidité ambiante est très faible a été exploitée par certains architectes, notamment l'architecte israélien Baruch Givoni qui utilise ce phénomène afin de produire un « rafraîchissement radiatif »¹⁶ (*radiant cooling*). Il explique ce principe en ces termes : « une surface ordinaire qui "voit" le ciel perd de la chaleur par émission de rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel, et peut être comprise comme un radiateur de chaleur. »¹⁷ Ce phénomène est la conséquence d'une ressource propre aux climats désertiques souvent intuitivement utilisée dans les constructions traditionnelles.

14 Victor Olgyay, Aladár Olgyay, *Solar Control and Shading Devices*, Princeton, Princeton University Press, 1957, 201 p.

15 David Wright, *Manuel d'architecture naturelle*, Marseille, Parenthèses, (coll. Habitat / Resso), (1^{re} éd. 1979), trad. de l'anglais par Pierre Bazan, p. 216.

16 Baruch Givoni, *Climate Considerations in Building and Urban Design*, New York, John Wiley & Sons, 1998, p. 191.

17 *Ibid.* (Traduction personnelle). Le « rayonnement de grande longueur d'onde » désigne le rayonnement thermique, tout corps chauffé émet continuellement ce type de rayonnement.

Il apparaît donc que le climat n'est pas une ressource dans l'absolu mais *relativement* à un besoin intermittent, variable et étroitement dépendant des conditions climatiques locales. La faible humidité ambiante des climats désertiques et secs est une ressource climatique dans la mesure où elle permet d'éliminer l'énergie thermique accumulée durant les journées ensoleillées et d'emmagasiner la fraîcheur nocturne dans la masse de matériaux. Elle a été intuitivement utilisée par les constructeurs de ces régions, l'architecture vernaculaire et traditionnelle ayant la particularité d'exploiter plus complètement les ressources climatiques¹⁸. L'approche bioclimatique s'inscrit largement dans la continuité de ces réalisations et vise à dériver l'ambiance intérieure du climat extérieur par des moyens à même d'utiliser les différentes ressources climatiques qui sont disponibles. Parmi ces ressources, l'utilisation du rayonnement solaire est celle qui a donné lieu aux recherches les plus poussées dans le domaine de l'architecture.

2) *Le Gisement solaire et le potentiel d'utilisation de l'énergie solaire*

On a souvent utilisé des expressions dérivées des énergies fossiles pour exprimer en termes de gisements l'utilisation des énergies renouvelables : l'hydroélectricité était ainsi nommée « la houille blanche », l'énergie marémotrice « la houille bleue » et l'énergie solaire « la houille d'or »¹⁹. Le but était sans doute d'assimiler une ressource renouvelable à un gisement capitalisé et disponible. Il existe différentes manières de convertir l'énergie solaire en énergie utile ou en travail. Pour le rayonnement solaire, sa conversion peut prendre la forme électrique (cellules photovoltaïques...) ou thermique. Si la conversion photovoltaïque permet de produire de l'électricité, une énergie directement utilisable, elle-même convertible et susceptible de produire un travail, ce système reste coûteux et nécessite un investissement important. L'utilisation la plus simple du rayonnement solaire reste sous forme thermique, cette chaleur étant un effet immédiat du rayonnement. Mais l'énergie sous forme thermique est un état dégradé, la chaleur pouvant être considérée comme une énergie de moins bonne qualité que les autres formes d'énergie (électrique...)²⁰. L'utilisation de l'énergie solaire sous forme thermique remonte à des temps immémoriaux : le séchage des aliments à l'air libre en est une application primitive. Il existe une multitude d'appareils et de dispositifs pour capter et utiliser l'énergie du rayonnement solaire sous forme thermique : le chauffe-eau solaire, les distillateurs d'eau de mer mais aussi la concentration

18 Georges Alexandroff, Jeanne-Marie Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Paris, Berger-Levrault, (coll. Architectures), 1982, p. 136.

19 Marcel Perrot, *La Houille d'or ou l'énergie solaire*, Paris, Fayard, 1963, (coll. Bilan de la science), 159 p.

20 Bernard Brunhes, *La Dégradation de l'énergie*, Paris, Flammarion, (coll. Champs), 1991, (1^{re} éd. 1909), p. 36-37.

optique par des lentilles sont autant de modes possibles d'exploitation. Certaines de ces techniques sont anciennes et ont été développées au XVIII^{ème} et au XIX^{ème} siècle²¹. L'utilisation la plus commune en architecture reste le système de la fenêtre bien orientée et associée à une pièce qui produit un effet de serre permettant de réchauffer une ambiance, bénéfique pendant les périodes de chauffage. À ce titre, il a existé une querelle assez vive entre les tenants de l'architecture solaire dite « passive », privilégiant des systèmes simples de captage de l'énergie solaire (fenêtre, serre, mur capteur...) ainsi que le mouvement naturel de l'air (convection libre, thermosiphon)²² et les tenants de l'architecture solaire dite « active » utilisant des capteurs (fluide, air...) et des systèmes faisant intervenir l'énergie électrique pour distribuer la chaleur²³.

Toutes ces utilisations possibles de l'énergie solaire ont alimenté l'intérêt pour l'estimation de cette forme d'énergie. Les recherches sur les gisements solaires existent depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle et se sont développées après la première crise de l'énergie de 1973. À la suite de la crise de l'énergie, il est apparu à de nombreux architectes que le climat pouvait être la source de calories « gratuites ». L'énergie solaire était vantée comme une ressource abondante et facilement utilisable par les architectes mais aussi par les bricoleurs sensibles aux problématiques d'économie d'énergie. De nombreux colloques internationaux importants sur le thème de l'énergie solaire, celui de Rome en 1961 et celui de Paris en 1973²⁴ avaient encouragé les recherches dans ce sens afin d'établir une stratégie d'utilisation de l'énergie solaire dans les pays développés et en développement. Dès la fin des années 1940, le climatologue Paul A. Siple étudiait les possibilités d'utiliser l'énergie solaire aux États-Unis et proposait une carte distinguant trois zones géographiques de « faisabilité maximum », de « faisabilité technique » et de « faisabilité minimum » pour l'utilisation de l'énergie solaire²⁵. Il mettait ainsi en évidence l'inégal potentiel d'utilisation de la ressource solaire.

En France, des météorologues importants comme Christian Perrin de Brichambaut (1928-1995), développaient des recherches analogues sur la mesure et l'estimation du rayonnement solaire en vue de son utilisation directe²⁶. Les recherches en France, qui commencent dès le milieu du XX^{ème} siècle, étaient concentrées sur les applications de l'énergie solaire et existaient alors dans différents laboratoires dans le sud de la France (Perpignan, Marseille...). Les recherches de Félix Trombe (1906-1985) à Mont-Louis puis à au four solaire d'Odeillo-Font-Romeu illustrent les

21 Ken Butti, John Perlin, *A Golden Thread. 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1980, p. 54-89.

22 Edward Mazria, *Le Guide de la maison solaire*, Marseille, Parenthèses, (1^{re} éd. 1981), trad. de l'anglais par Pierre Bazan, 2005, p. 29.

23 Clément Gaillard, « L'Opposition entre systèmes passifs et systèmes actifs : les antagonismes de deux conceptions de l'énergie solaire dans l'habitat », *Cahiers François Viète*, vol. III, n° 12, 2021, (à paraître).

24 Le colloque de 1973 qui s'est tenu à Paris sous le patronage de l'UNESCO et intitulé « Le Soleil au service de l'homme » a contribué à propager l'intérêt pour les recherches dans ce domaine.

25 Daniel A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, op. cit., p. 111.

26 Christian Perrin de Brichambaut, *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Méthode actinométrie*. Paris, Gauthier-Villars, (coll. Monographie de météorologie), 1963, 299 p.

avancées dans ce domaine²⁷. Alors qu'il était ingénieur au four solaire d'Odeillo, Jean-François Tricaud est chargé par Félix Trombe et le CNRS de réaliser un atlas complet des gisements solaires en France²⁸. Cet atlas est présenté en 1976 et publié en 1978 sous le titre *Atlas énergétique du rayonnement solaire en France*. L'ouvrage présente un ensemble de cartes intégrant les valeurs d'ensoleillement mensuels, il est la première grande synthèse sur le potentiel d'utilisation directe de l'énergie solaire en France en fonction de différents paramètres (période de l'année...). Cet atlas illustre les régions où le potentiel d'utilisation de l'énergie solaire est le plus favorable et met en évidence l'importance de l'inclinaison des surfaces de captage.

Ces travaux sur les gisements solaires vont également intéresser les architectes dans la mesure où l'orientation des constructions et des surfaces déterminent une certaine quantité d'énergie solaire captée par une construction. Les recherches principales à ce sujet ont été menées par le groupe A.B.C. (Ambiance Bio-Climatique), un laboratoire de recherche de l'école d'architecture de Marseille-Luminy créé au tout début des années 1970. Jean-Louis Izard, architecte membre du groupe A.B.C. publie au début des années 1980 un rapport intitulé *Le Gisement solaire et le projet d'architecture*. En plus des valeurs d'ensoleillement, il intègre des outils de géométries solaires développés précédemment par des ingénieurs pour l'étude des masques, des protections solaires et des saillies afin de modéliser précisément les apports solaires au niveau des ouvertures. Il écrit dans l'introduction :

La conception "bioclimatique" de l'architecture nécessite la prise en compte de la quantité d'énergie solaire que reçoit chaque surface de vitrage considéré comme "capteur". Cette quantité d'énergie dépend de facteurs extérieurs à l'architecture, tels que la latitude du lieu, le type de climat régnant sur le site et la forme de de l'environnement immédiat. Mais la quantité d'énergie réellement reçue sur les surfaces captrices dépend aussi de facteurs purement architecturaux tels que : l'orientation et l'inclinaison de ces surfaces et les formes des éléments architecturaux qui les entourent.²⁹

On retrouve dans ce passage les principes de la conception bioclimatique évoqués précédemment. L'importance donnée au captage est également tempérée par la nécessité de protection solaire qui est « appelée à jouer un rôle aussi important que le captage. »³⁰ Cette ambivalence du gisement solaire, qu'il est possible de capter mais dont il est également nécessaire de se prémunir, est propre à la compréhension bioclimatique qui s'efforce d'anticiper les échanges entre un bâtiment et son environnement. Le climat méditerranéen qui particulièrement ensoleillé et où ont été concentrées

27 Paul Bouet, « Le Mur Trombe », in François Jarrige (dir.), Alexis Vrignon (dir.), *Face à la puissance. Un histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte, 2020, p. 249-263.

28 Entretien avec Jean-François Tricaud, le 18/10/2019 à Odeillo.

29 Jean-Louis Izard, *Le Gisement solaire et le projet d'architecture*, Marseille, auto-édition, s. d., p. 3.

30 *Ibid.*

les recherches du groupe A.B.C. nécessite d'employer des protections solaires pendant une grande partie de l'année.

À la même période, Christian Perrin de Brichambaut publie une étude complétant celles évoquées précédemment et intitulée *Le Gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique*³¹. Ces études sur le gisement solaire mettent en évidence l'inégale distribution de l'énergie solaire sur le territoire. Le captage de l'énergie solaire est en effet grandement favorisé dans le sud de la France qui peut bénéficier d'une durée d'ensoleillement deux fois plus importante que certaines localités au nord du pays à altitude égale. La situation géographique des fours solaires de Mont-Louis et d'Odeillo-Font-Romeu dans les hauteurs des Pyrénées-Orientales est justifiée par l'ensoleillement exceptionnel de cette région, propre à un climat local. Le rayonnement solaire se partage entre rayonnement direct et diffus, les zones ayant les durées d'ensoleillement les plus faibles étant celles où l'ensoleillement est le plus diffusé à cause de la couverture nuageuse mais également de la pollution.

Pour de nombreux architectes, il est admis qu'une ouverture vitrée constitue le capteur le plus simple pour accumuler l'énergie solaire par effet de serre. Mais cette inégalité de répartition du gisement solaire a néanmoins alimenté des discussions sur la manière la plus appropriée de capter cette énergie. Il existe en effet différentes morphologies de capteurs solaires. L'ouvrage *Direct Use of the Sun's Energy* publié en 1964 par Farrington Daniels et régulièrement réédité depuis, présente la synthèse la plus complète des différentes méthodes d'utilisation directe de l'énergie solaire³². Cet ouvrage a eu un succès considérable aux USA et dans le monde. L'architecte Steve Baer écrit en 1968 dans le *Whole Earth Catalog* que l'ouvrage « a changé sa vie et sa manière de penser »³³. En France, Frédéric Nicolas, Marc Vaye et Jean-Pierre Traisnel, auteurs du best-seller *La Face Cachée du soleil* publié en 1974, souhaitent initialement traduire l'ouvrage de Farrington Daniels en français³⁴. Selon Daniels, il existe grossièrement deux types de capteurs pour l'énergie solaire : les capteurs plans et les capteurs à concentration. Ces deux types de capteurs possèdent chacun leurs avantages et leurs inconvénients et sont plus adaptés à un type d'ensoleillement particulier : les *capteurs plans* permettent de capter le rayonnement direct et diffus mais ne permettent de produire que des basses températures (entre 60 et 80°C) qui sont adaptées pour le chauffage ou la production d'eau chaude domestique. Les *capteurs à concentration* concentrent seulement le rayonnement direct et doivent être manipulés régulièrement pour suivre le soleil, mais ils permettent de produire des températures plus élevées (de 200 à 350°C pour des capteurs manipulables à la main). La

31 Christian Perrin de Brichambaut, Christian Vauge, *Le Gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique*, Paris, Lavoisier, (coll. Technique et documentation), 1982, 222 p.

32 Farrington Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, New Haven et Londres, Yale University Press, 1964, 374 p.

33 Stewart Brand (éd.), *Whole Earth Catalog. Access to tools*, 1968, auto-édition, n. p. (Traduction personnelle) Sur l'influence de ce « catalogue » sur la contre-culture on peut se reporter à l'ouvrage de Caroline Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, Marseille, Parenthèses, 2014, p. 139-147.

34 Entretien avec Jean-Pierre Traisnel, le 13/06/2019 à Paris.

plupart des ouvrages sur l'énergie solaire de l'époque pointent l'intérêt des capteurs plans qui nécessitent moins de manipulations, qui sont globalement plus robustes, plus faciles à fabriquer et surtout permettent de capter le rayonnement diffus. Un numéro spécial de la revue *L'Affranchi* décrit en ces termes les problèmes rencontrés par les capteurs à concentration :

L'inconvénient des concentrateurs est qu'ils exigent une énergie rayonnante directe et que le moindre nuage "écroule" leur rendement. Leur usage, en des lieux où le ciel n'a pas vraiment tendance à être impeccablement bleu, dépare le bon sens. Reste alors à se servir des collecteurs-plan, ou autre, apte à s'emparer du rayonnement diffus.³⁵

Dans cet extrait, on remarque que c'est la disponibilité de l'énergie solaire et sa qualité qui détermine le choix par défaut d'un capteur plan au détriment d'un système à concentration plus performant. Cependant, d'autres revues alternatives et très populaires comme *Le Sauvage* affirment que les capteurs plans n'ont qu'une performance médiocre et qu'il est plus judicieux d'avoir recours à des capteurs à concentration, permettant d'obtenir plus rapidement de l'eau chauffée³⁶.

Mis à part le captage, les auteurs s'accordent cependant sur la nécessité de stocker l'énergie solaire sous forme thermique, le plus souvent dans des cuves d'eau ou une masse de matériaux (terre, roche...). L'intermittence des énergies issues du climat impose de capter la ressource quand celle-ci est disponible, de la stocker pour l'utiliser quand elle sera nécessaire. Ce problème du décalage entre *les périodes où la ressource est disponible* et *les périodes où cette ressource est nécessaire* a historiquement favorisé les énergies fossiles qui sont disponibles et pilotables. De nombreuses maisons solaires ont ainsi été conçues dès le début du XX^{ème} siècle pour accumuler et stocker l'énergie solaire pour l'utiliser pendant plusieurs jours, les résultats étant le plus souvent décevants. Ce problème du stockage des énergies renouvelables n'est pas encore résolu à ce jour, cependant l'enjeu d'une prise en compte du climat comme ressource nous paraît digne d'intérêt pour l'époque contemporaine et susceptible de développements féconds dans le domaine de l'architecture et de l'aménagement. Ce sera l'objet de notre dernière partie.

3) Disparités géographiques et inégalités d'accès aux ressources climatiques

Dans le prolongement des travaux sur l'énergie solaire, il est vite apparu que certaines techniques de captage du rayonnement étaient proprement inutilisables dans certaines régions ne bénéficiant pas d'un ensoleillement suffisant. Les cartes d'ensoleillement moyen de la France et les

35 Pierre Le Chapellier, « Une Architecture solaire ? », *L'Affranchi*, « Énergie solaire et habitat. Utilisation domestique de l'énergie solaire », n°59, 1977, Paris, p. 37.

36 *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n°52, avril 1978, Paris, p. 18.

données météorologiques indiquant les relevés d'ensoleillement ont largement circulés durant les années 1970 et 1980, notamment pour les stations de Trappes et Carpentras qui bénéficiaient d'un relevé des insolation plus précis. La communication et l'utilisation de ces données dans les calculs thermiques devaient permettre au concepteur et notamment aux architectes et bureaux d'étude d'anticiper les performances des systèmes de captage et plus globalement la performance thermique de la future construction. Aujourd'hui, les logiciels de simulation thermique dynamique intègrent des données précises qui n'étaient pas disponibles à l'époque. En France, la réglementation thermique récente a pris en compte les inégalités dans la distribution des ressources climatiques sur le territoire. Dans la réglementation thermique 2012 (RT 2012), le coefficient B_{bio} introduit dans cette réglementation a pour objectif de déterminer les besoins énergétiques en fonction de différentes zones géographiques et de l'altitude où doit se situer la future construction³⁷. On intègre dans le calcul de ce coefficient B_{bio} un paramètre intitulé $M_{bgéo}$, qui sépare la France en huit grandes zones climatiques et détermine grossièrement les besoins de chauffage et de climatisation en fonction de la zone où se situe la construction³⁸. Le coefficient B_{bio} permet de ne pas exclure de la réglementation des projets dont la situation géographique ne serait pas favorable. On peut l'interpréter comme une traduction réglementaire de la prise en compte du caractère inhomogène de la répartition des ressources climatiques.

Nous avons signalé l'inégalité de répartition du gisement solaire sur le territoire francilien mais cette inégalité climatique peut être développée à la lumière des épisodes climatiques exceptionnels les plus récents. Nous avons évoqué dans la première partie le fait que le climat puisse être une « anti-ressource » c'est-à-dire que des effets climatiques recherchés soient *nuisibles* à cause de leur intensité à *une certaine période de l'année*. La caractéristique d'une anti-ressource serait qu'il s'agit initialement d'une ressource dont l'apport n'a pas été maîtrisé et qui occasionne l'utilisation de ressources supplémentaires (souvent d'origine fossile) pour en atténuer les effets. Le cas de l'utilisation de climatiseurs dans des périodes où la température extérieure n'est pas excessive traduit ce phénomène : initialement la protection estivale de la construction contre les apports solaires n'a pas été considérée et entraîne une ambiance intérieure inconfortable. Le rayonnement solaire est alors *une anti-ressource durant cette période* et nécessite l'emploi de ressources supplémentaires (climatisation, brassage d'air...). Les canicules, mais aussi les catastrophes climatiques comme les inondations sont une illustration particulièrement accentuée de ce phénomène par lequel les effets du climat deviennent nuisibles. Certes le problème des inondations est avant tout un problème d'urbanisme, d'artificialisation des sols et de prise en

37 Jean- Pierre Cordier (dir.), *Conception architecturale et RT 2012. Influence des facteurs énergétiques sur la forme des bâtiments*, Paris, Le Moniteur, 2013, p. 17-20.

38 Philippe Leblond, *L'Essentiel de la RT 2012. Obligations et mise en œuvre de la réglementation thermique*, Paris, Dunod, Le Moniteur, 2013, p. 88.

compte des bassins versant dans l'aménagement, mais la violence des épisodes climatiques est la cause principale de la montée rapide des eaux. Ces phénomènes sont amplifiés par les périodes de sécheresse qui empêchent toute infiltration des pluies qui ruissellent. À la lumière de ces phénomènes climatiques néfastes, il apparaît nécessaire de tempérer notre intuition selon laquelle le climat serait une ressource simple à appréhender.

Ces considérations nous amènent à l'idée que le climat n'est pas une ressource univoque. Si le climat est une ressource, il existe des disparités importantes d'accès à cette ressource sur le territoire, disparités qui risquent de s'accroître dans la perspective d'un changement climatique. L'ingénieur et thermicien Robert Célaire a développé la notion « d'équité bioclimatique »³⁹ pour traduire l'idée que les logements, même implantés sur une même parcelle et dans un même climat local, ne bénéficient pas de ressources climatiques équivalentes. Pour illustrer cette idée, prenons l'exemple théorique d'un immeuble des années 1970 implanté selon l'axe nord-sud et dont les façades principales sont respectivement orientées à l'ouest et à l'est, cette orientation étant la plus commune dans les grands ensembles. Chaque appartement au sein de cet immeuble bénéficie d'une orientation unique sans masques⁴⁰, soit à l'est, soit à l'ouest. Supposons que cet immeuble n'ait pas bénéficié d'une rénovation énergétique, qu'il est donc mal isolé, non climatisé et dépourvu de volets ou de protections solaires sur ses vitrages, qu'ils soient amovibles ou fixes. En été, durant une période de forte chaleur, les logements orientés à l'est subissent l'ensoleillement matinal souvent atténué, la température atteint probablement son maximum vers midi (moment où le logement est souvent inoccupé si les habitants travaillent) pour redescendre progressivement au cours de la journée et tout au long de la nuit. Pour les appartements orientés à l'ouest, le soleil frappe les vitrages dès le milieu de l'après-midi et ce jusqu'au coucher du soleil. La température atteint son maximum en toute fin de soirée, au moment le moins opportun puisqu'il s'agit de se reposer et de dormir. Toutes choses égales par ailleurs et dans un cas aussi simple, pour un même immeuble et pour des appartements situés à un même étage, les niveaux de confort sont très largement inégaux. Les appartements orientés à l'est peuvent rester confortables et contenir l'élévation de la température alors que ceux orientés à l'ouest peuvent devenir inconfortables durant une partie de la nuit. Pour les habitants des appartements situés sous la toiture, le ressenti pendant une période de forte chaleur en été est particulièrement désagréable dans la mesure où la toiture souvent foncée (étanchéité au bitume) capte l'essentiel du rayonnement solaire en été et ce, indépendamment de l'orientation. Pour donner un ordre de grandeur, le rayonnement solaire direct reçu par une surface horizontale à notre latitude est environ quatre fois plus important en été qu'en hiver. À l'inverse, les logements situés au rez-de-chaussée, bénéficiant de l'inertie thermique du sol ou de la fraîcheur des caves en sous-sol, peuvent rester confortables en été.

39 Entretien avec Robert Célaire, le 17/07/2020 à Lambesc.

40 Les masques désignent les éléments portant ombrage sur une façade.

L'idée « d'équité bioclimatique » formée par Robert Célaire nous paraît particulièrement féconde pour penser la disparité d'accès aux ressources climatiques évoquée précédemment. Nous avons écrit plus haut que le climat n'est pas une ressource dans l'absolu mais *relativement à un besoin intermittent*. Dans notre cas théorique et simplifié, il apparaît que dans un même immeuble on trouve des disparités importantes : la construction admet et accumule l'énergie thermique au moment où les besoins sont négatifs et nécessiteraient à l'inverse un rafraîchissement ou une protection solaire. Nous avons évoqué le cas des périodes de fortes chaleurs en été, ces épisodes étant probablement amenés à se généraliser avec le réchauffement climatique. Un raisonnement analogue pourrait être fait en hiver, en considérant les apports thermiques dans un immeuble ayant des appartements orientés soit au nord, soit au sud, bien que cette disposition soit plus rare. On trouve dans ce cas, un problème « d'équité bioclimatique » au niveau des disparités dans les besoins de chauffage. Ces problèmes d'équités résultent directement de l'aménagement et créent des disparités dans un même bâtiment et un même quartier. Il apparaît que c'est à l'architecte et plus généralement au concepteur de prendre en compte ce type de problème non seulement pour le présent mais dans la perspective d'un changement climatique futur.

4) Conclusion : l'aménagement et la maîtrise des ressources climatiques

Nous avons évoqué le rôle de la conception bioclimatique dans l'émergence d'une prise de conscience, encore intuitive auparavant, des apports du climat mais également de ses effets néfastes durant certaines périodes de l'année. Il est apparu que si les phénomènes climatiques sont une ressource c'est dans la mesure où ils permettent à un aménagement ou à une construction de capter une énergie quand celle-ci est nécessaire et à l'inverse de décharger de l'énergie vers l'extérieur quand celle-ci est en surplus et néfaste pour le confort intérieur (par ventilation naturelle par exemple). Il semble bien que le climat soit une ressource mais il importe de le comprendre comme un type de ressource particulier. Les caractéristiques des phénomènes climatiques, au moins dans les régions tempérées, sont leur variabilité importante dans le temps et leur faible concentration. Ce caractère diffus est à la fois un avantage et un inconvénient : dans le cas de l'énergie solaire, il rend le captage difficile mais permet de bénéficier de cet apport sur tout le territoire bien que ce gisement varie considérablement et dépende de facteurs météorologiques. L'importance de la ressource climatique a motivé certains architectes à parler d'un « droit au soleil »⁴¹ qui désigne la nécessité pour chaque habitant de bénéficier d'apports climatiques (notamment solaires) favorables. Ce

41 Entretien avec Bob Laignelot, le 28/01/2020 à Ventenac-Cabardès.

« droit au soleil », hérité de la législation romaine, était une proposition qui visait à contrer le problème de « l'équité bioclimatique » déjà évoqué.

Il importe de préciser que les choix des architectes, des urbanistes et des bureaux d'études sont particulièrement importants dans la perspective d'une utilisation réfléchie des ressources climatiques. Un choix comme celui de l'orientation ou de la protection solaire des vitrages à l'est et à l'ouest bouleverse radicalement le mode d'accès aux ressources climatiques et le contrôle des apports que nous avons évoqué dans la première partie. Il est nécessaire de comprendre le caractère ambivalent des ressources du climat : un apport favorable peut rapidement devenir défavorable et inversement. Il existe donc tout un arbitrage complexe entre différents choix techniques, la conception bioclimatique étant initialement motivée par la volonté de maximiser l'utilisation des énergies issues du climat. Comprendre le climat comme une ressource invite à ne pas considérer l'environnement proche et lointain comme un milieu neutre. L'environnement est continuellement le siège d'échanges d'énergie, la principale source d'énergie étant le soleil dont l'énergie se distribue à travers toutes les formes vivantes et minérales qui composent la biosphère⁴². Quoiqu'on puisse imaginer, une construction n'est jamais isolée de ces flux d'énergie dont le climat est la source la plus manifeste. Il importe que les concepteurs prennent conscience qu'ils ne manipulent « jamais des objets isolés, mais les termes de relations complexes et vivantes »⁴³, selon les mots des architectes Georges et Jeanne-Marie Alexandroff, figures importantes de la conception bioclimatique en France. Notre idée étant que, pour comprendre ces relations, il est nécessaire de voir que les ressources climatiques sont déjà là et existent *de fait*, l'important étant alors de ne pas les négliger et de les manipuler avec soin.

Bibliographie :

- *L'Affranchi*, « Énergie solaire et habitat. Utilisation domestique de l'énergie solaire », n°59, 1977, Paris, 126 p.

⁴² Wladimir Vernadsky, *La Biosphère*, Paris, Seuil, (coll. Points Sciences), 2002, p. 157.

⁴³ Georges Alexandroff, Jeanne-Marie Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, *op. cit.*, p. 349.

- Georges Alexandroff., Jeanne-Marie Alexandroff, *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Paris, Berger-Levrault (coll. Architectures), 1982, 378 p.
- Bruce Anderson, Michael Riordan, *Your Solar Home : Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Harrisville, Cheshire Books, 1976, p.
- Daniel A. Barber, *A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, New York, Oxford University Press, 2016, 336 p.
- Patrick Bardou, Varoujan Arzoumanian, *Archi de soleil*, Marseille, Parenthèses, 1978, 120 p.
- Ken Butti, John Perlin, *A Golden Thread. 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1980, 289 p.
- Michel Beuzard, Pierre Le Chapellier, « L'énergie éolienne », *Techniques & Architecture*, n° 315, juin-juillet 1977, p. 56-65.
- Stewart Brand (éd.), *Whole Earth Catalog. Access to tools*, auto-édition, 1968, n. p.
- Bernard Brunhes, *La Dégradation de l'énergie*, Paris, Flammarion, (coll. Champs), 1991, (1^{re} éd. 1909), 410 p.
- Jean-Pierre Cordier (dir.), *Conception architecturale et RT 2012. Influence des facteurs énergétiques sur la forme des bâtiments*, Paris, Le Moniteur, 2013, 282 p.
- Farrington Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, New Haven et Londres, Yale University Press, 1964, 374 p.
- Emile Duhot, *Les Climats et l'organisme humain*, Paris, PUF (coll. Que sais-je?), 1945, 127 p.
- Baruch Givoni, *Climate Considerations in Building and Urban Design*, New York, John Wiley & Sons, 1998, 441 p.
- James Marston Fitch, *American Building: The Forces that shape it*, Cambridge, The Riverside Press, 1947, 382 p.
- Clément Gaillard, « L'Opposition entre systèmes passifs et systèmes actifs : les antagonismes de deux conceptions de l'énergie solaire dans l'habitat », *Cahiers François Viète*, vol. III, n° 12, 2021, (à paraître).
- Jean-Louis Izard, *Le Gisement solaire et le projet d'architecture*, Marseille, auto-édition, s. d., 369 p. (Archives du groupe A.B.C. - École d'Architecture de Marseille-Luminy).
- Jean-Marc Jancovici, « Éléments de base de base sur l'énergie au 21^e siècle », cours à donné à l'École des Mines de Paris, mai 2019, (en ligne).
- François Jarrige (dir.), Alexis Vrignon (dir.), *Face à la puissance. Un histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte, 2020, 397 p.
- Philippe Leblond, *L'Essentiel de la RT 2012. Obligations et mise en œuvre de la réglementation thermique*, Paris, Dunod, Le Moniteur, 2013, 190 p.
- Caroline Maniaque, *Go West ! Des architectes au pays de la contre-culture*, Marseille, Parenthèses, 2014, 240 p.
- Edward Mazria, *Le Guide de la maison solaire*, Marseille, Parenthèses, (1^{re} éd. 1981), trad. de l'anglais par Pierre Bazan, 2005, 339 p.
- Victor Olgyay, *Design with Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton, Princeton University Press, 1963, 190 p.
- Victor Olgyay, Aladár Olgyay, *Solar Control and Shading Devices*, Princeton, Princeton University Press, 1957, 201 p.
- Victor Olgyay, « The Temperate House », *Architectural Forum: The Magazine of Building*, vol. 94, n° 3, New York, Time, 1951, pp. 179-194.
- Christian Perrin de Brichambaut, Christian Vauge, *Le Gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique*, Paris, Lavoisier, (coll. Technique et documentation), 1982, 222 p.
- Christian Perrin de Brichambaut, *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Méthode actinométrie*. Paris, Gauthier-Villars, (coll. Monographie de météorologie), 1963, 299 p.

- Marcel Perrot, *La Houille d'or ou l'énergie solaire*, Paris, Fayard, 1963, (coll. Bilan de la science), 159 p.
- Marcel Roubinet, *La Climatisation*, Paris, PUF (coll. Que sais-je ?), 1970, 126 p.
- *Le Sauvage*, « Guide pratique de la maison solaire », n°52, avril 1978, Paris, 116 p.
- Wladimir Vernadsky, *La Biosphère*, Paris, Seuil, (coll. Points Sciences), (1^{re} éd. 1929), 2002, 277 p.
- David Wright, *Manuel d'architecture naturelle*, Marseille, Parenthèses, (coll. Habitat / Resso), (1^{re} éd. 1979), trad. de l'anglais par Pierre Bazan, 248 p.