



Alice Thomine-Berrada et Barry Bergdol (dir.)

Repenser les limites : l'architecture à travers l'espace, le temps et les disciplines

31 août - 4 septembre 2005

Publications de l'Institut national d'histoire de l'art

Controverses autour de l'axe héliothermique : l'apport de la simulation physique à l'analyse des théories urbaines

Amina Harzallah, Daniel Siret, Eric Monin et Julien Bouyer

DOI : 10.4000/books.inha.2509

Éditeur : Publications de l'Institut national d'histoire de l'art

Lieu d'édition : Paris

Année d'édition : 2005

Date de mise en ligne : 5 décembre 2017

Collection : Voies de la recherche

EAN électronique : 9782917902646



<http://books.openedition.org>

Édition imprimée

Date de publication : 4 septembre 2005

Référence électronique

HARZALLAH, Amina ; et al. *Controverses autour de l'axe héliothermique : l'apport de la simulation physique à l'analyse des théories urbaines* In : *Repenser les limites : l'architecture à travers l'espace, le temps et les disciplines : 31 août - 4 septembre 2005* [en ligne]. Paris : Publications de l'Institut national d'histoire de l'art, 2005 (généré le 27 juillet 2023). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/inha/2509>>. ISBN : 9782917902646. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.inha.2509>.

Ce document a été généré automatiquement le 27 juillet 2023.

Controverses autour de l'axe héliothermique : l'apport de la simulation physique à l'analyse des théories urbaines

Amina Harzallah, Daniel Siret, Eric Monin et Julien Bouyer

- 1 Les techniques contemporaines de modélisation et de simulation appliquées à l'architecture sont souvent mises en avant pour la restitution visuelle des environnements bâtis disparus au moyen d'images de synthèse photo réalistes. Ces techniques informatiques offrent bien d'autres possibilités pour l'analyse historique. En particulier, les outils de simulation physique développés pour l'étude des projets contemporains d'architecture et d'aménagement urbain, peuvent s'appliquer très à propos pour une analyse rétrospective des théories et des propositions architecturales qui ont jalonné l'histoire.

Cet article voudrait donner une illustration de ces possibilités par une nouvelle étude critique, à la fois historique et technique, de la théorie de l'axe héliothermique, proposée à la fin des années 1920 dans *La science des plans de villes* d'A. Augustin-Rey et al¹. Cette étude s'inscrit dans le cadre plus large d'une thèse portant sur l'instrumentation des phénomènes solaires dans les théories architecturales et urbaines de la fin du XIX^e siècle jusqu'au milieu du XX^e. Rappelons que nous assistons en France, à cette période, à une importante prise en compte des questions de salubrité et de santé publique dans les prescriptions architecturales et urbaines. Ces préoccupations ont poussé au début du XX^e siècle certains architectes à proposer des principes et des théories supposés rendre la ville et l'habitat plus « hygiéniques ». Il s'agissait en particulier de favoriser l'ensoleillement et la ventilation des habitations et des espaces publics². Les théories et propositions de constructions à gradins (A. Sauvage), de cours ouvertes (A. Augustin-Rey et H. Provensal) ou encore d'immeubles à redents (E. Hénard, H. Provensal, Le Corbusier), s'inscrivent parfaitement dans cette visée.

Le système de « l'axe héliothermique » est un exemple extrême de ces recherches. Il

s'agit, pour les auteurs de *La Science des plans de ville*, de réformer l'orientation urbaine de manière à optimiser l'insolation des bâtiments. De manière catégorique, A-Rey, Pidoux et Barde établissent qu'en vertu du décalage entre insolation maximale et température maximale, l'orientation optimale des bâtiments se situerait autour de 19° par rapport à l'axe nord-sud, la façade est étant décalée vers le sud et la façade ouest vers le nord. Cette théorie, fondée sur des bases très contestables mais reprise et réifiée par Le Corbusier dans *La Ville radieuse* en 1935, a suscité une importante controverse dans les milieux scientifiques des années 1940, opposant les partisans de l'exposition est-ouest à ceux défendant l'exposition nord-sud.

L'objectif de cet article est de montrer comment nous pouvons aujourd'hui dépasser ces contradictions en procédant à une évaluation de la théorie de l'axe héliothermique au moyen de simulations physiques. Dans un premier temps, nous rappellerons la genèse et les principes de la théorie héliothermique et nous situerons les différentes positions prises par les acteurs de la controverse suscitée par cette théorie. Nous procéderons ensuite à une traduction physique du problème posé par la théorie héliothermique et nous montrerons les résultats d'un ensemble de simulations physiques qui permettent d'en discuter les fondements. Nous concluons sur la théorie elle-même, mais aussi sur les relations que peuvent entretenir aujourd'hui la simulation physique et l'histoire en matière de recherche et de projet urbain.

La théorie de l'axe héliothermique : principes et controverses

- 2 Adolphe Augustin-Rey étudie à l'École des arts décoratifs, puis à l'École des beaux-Arts, où il devient architecte diplômé en 1888. Sa carrière prend un tour marquant lorsqu'il gagne, en 1905, le concours de la Fondation Rothschild ; il se spécialise dès lors dans les problèmes de l'hygiène de l'habitation et de l'urbanisme³. Présent au deuxième congrès international d'hygiène de l'habitation à Genève en 1906, il y rencontre Justin Pidoux (astronome honoraire de l'observatoire de Genève) et Charles Barde (architecte) qui exposent leurs travaux sur l'insolation des bâtiments. Ils engagent ensemble une collaboration sur « l'héliothermie » qui les conduira jusqu'à la publication de *La Science des plans de ville* en 1928 (J. Pidoux décède avant cette publication).

La théorie héliothermique est basée sur le constat que la température maximale de l'air (ce que les auteurs appellent « la vague thermique ») n'est pas strictement superposée au maximum des flux solaires. Ainsi, la température maximale journalière est atteinte quelques heures après le midi solaire ; de même, la température maximale annuelle n'est pas atteinte au solstice d'été mais dans les deux mois suivants. Ce décalage entre insolation maximale et température maximale justifie, selon les auteurs, la nécessité de définir une nouvelle unité de mesure, la « valeur héliothermique », produit de la durée d'ensoleillement en un point par la température moyenne de l'air pendant cette durée. Le terme « héliothermique » suggère cette combinaison des deux éléments principalement mis en jeu dans la sensation de chaleur. On notera que l'insolation est considérée en terme de durée d'exposition, sans tenir compte de l'énergie transmise (fonction de l'angle d'incidence entre les rayons solaires et les façades des bâtiments).

Munis de cette unité, Augustin-Rey, Pidoux et Barde proposent de rechercher une sorte d'axe de symétrie thermique, distinct de l'axe de symétrie solaire. Ainsi naît l'axe héliothermique qui prétend rendre compte de « l'échauffement » des bâtiments en

tenant compte à la fois de leur exposition au soleil et de la température de l'air. L'axe héliothermique est défini par la direction permettant de répartir les valeurs héliothermiques de manière égale entre les deux façades opposées d'un bâtiment :

« Cette direction partage l'insolation totale en deux parties inégales, et la valeur héliothermique totale en deux parties égales. Si nous supposons un bâtiment ou une suite de constructions alignées suivant cette direction, les façades tournées à l'est et celles tournées vers l'ouest jouiront de la même valeur héliothermique, savoir pour chacune la moitié de la valeur totale. Aux deux extrémités de l'alignement se trouvent : tournée au sud la façade la mieux ensoleillée, et à l'autre extrémité, tournée au nord, la façade avec l'exposition la plus défavorable. »⁴

- 3 Ces propositions ont suscité d'intenses controverses parmi les théoriciens de l'urbanisme. Certains adhèrent (et cautionnent de fait) la théorie héliothermique dans ses principes, comme l'ingénieur Edmond Marcotte ou l'architecte André Gutton. Marcotte reprend ainsi, dans un ouvrage publié en 1930, certains principes énoncés par Augustin-Rey et notamment celui de l'axe héliothermique, qu'il recommande principalement dans le cas où l'on recherche la lumière et la chaleur du soleil : « Si l'on veut dispenser également, aux deux expositions de la voie nord-sud, non seulement la lumière mais encore la chaleur du soleil, on modifiera légèrement cette orientation nord-sud de 20° vers l'est dans la région parisienne. »⁵. Gutton⁶ considère l'axe héliothermique comme la meilleure exposition pour les façades des bâtiments. Mais c'est sans doute Le Corbusier qui a contribué le plus à faire connaître la théorie de Rey en définissant l'axe héliothermique comme « l'armature du tracé urbain »⁷.

Les théories de A-Rey ont été violemment contestées au début des années 1940 par Gaston Bardet, qui estime que le principe de valeur héliothermique est physiquement vide de sens, faux et simpliste. Bardet compare Augustin-Rey à un hydraulicien qui multiplierait la hauteur d'une chute d'eau par la durée de l'écoulement, en oubliant le débit. Par ailleurs, l'ingénieur et architecte R. Leroux (professeur de climatologie appliquée à l'Institut international d'urbanisme de Bruxelles) explique prudemment en 1946 que « le facteur héliothermique [...] est une des bases de l'urbanisme et sur lequel souvent on se guide pour une climatologie de l'habitation » mais qu'« il n'apporte pas des arguments aussi décisifs pour la théorie de la construction que ceux apportés par la thermohygrométrie »⁸. De même, l'architecte A. Hermant admet l'intérêt de l'axe héliothermique mais en relativise la portée : « L'axe héliothermique [...] peut être considéré comme la trace du véritable plan de symétrie thermique de l'espace - ce qui ne signifie point que l'on doive nécessairement, et d'une manière générale, orienter les façades parallèlement à cet axe, comme le préconisait M. Augustin-Rey. »⁹

La théorie de l'axe héliothermique soumise à la simulation physique

- 4 L'une des difficultés rencontrées pour analyser les controverses au sujet de l'axe héliothermique consiste à traduire les propositions d'Augustin-Rey dans un langage physique, afin d'en situer la portée et les limites au regard des connaissances et outils contemporains. Comment en effet prendre parti dans le débat technique opposant Augustin-Rey et Bardet sans apporter des éléments de connaissance nouveaux susceptibles de trancher entre les opinions ? Ce travail d'analyse critique d'une théorie scientifique contestée est aujourd'hui possible au moyen des outils de simulation numérique développés dans les champs de la physique du bâtiment et de l'informatique

appliquée. C'est l'objectif de cet article que de proposer une telle rencontre et d'en montrer l'intérêt.

En essayant de combiner chaleur ambiante (température de l'air) et durée d'ensoleillement, les auteurs de l'axe héliothermique espèrent définir une sorte de « charge thermique » sur les façades leur permettant de proposer une orientation pour laquelle cette charge thermique s'égalise de part et d'autre d'un immeuble en long. La notion physique la plus proche de ces intentions semble être celle de température de surface des façades de l'immeuble considéré. Cette température de surface est fonction de la nature de la paroi (matériaux, épaisseur), de la température de l'air extérieur, ainsi que de l'énergie solaire atteignant la façade (énergie directe, énergie diffusée par le ciel et réfléchi par les éléments proches). Ces différents paramètres doivent être considérés de manière dynamique (variation des températures extérieures selon les dates et heures de la journée, dynamique des flux solaires). La température de surface a une incidence sur la température intérieure du bâtiment considéré, mais également sur le microclimat autour du bâtiment et le confort ressenti dans les espaces ouverts attenants.

La question posée par la théorie de l'axe héliothermique pourrait alors se formuler de la manière suivante : existe-t-il des conditions d'orientation pour lesquelles les températures de surface moyennes annuelles s'égalisent des deux côtés d'un bâtiment ? Pour se rapprocher des hypothèses d'Augustin-Rey, il nous faut alors considérer un bâtiment aveugle (l'énergie transmise par les vitrages et l'effet de serre intérieur n'est pas considéré par Augustin-Rey), sans masques proches (les effets d'ombre portée ne sont pas pris en compte dans la théorie héliothermique) et constitué des quatre côtés d'un simple mur de pierre parfaitement homogène...

On voit donc que le problème posé est non seulement de faible intérêt physique (l'égalité des températures de surfaces ne présume pas une égalité de températures intérieures) mais qu'il repose de plus sur des conditions très théoriques et sans applicabilité, comme celle des murs aveugles. Ces conditions nous sont imposées par les hypothèses mêmes de la théorie de l'axe héliothermique, hypothèses très réductrices pour une théorie prétendant réformer l'organisation des villes.

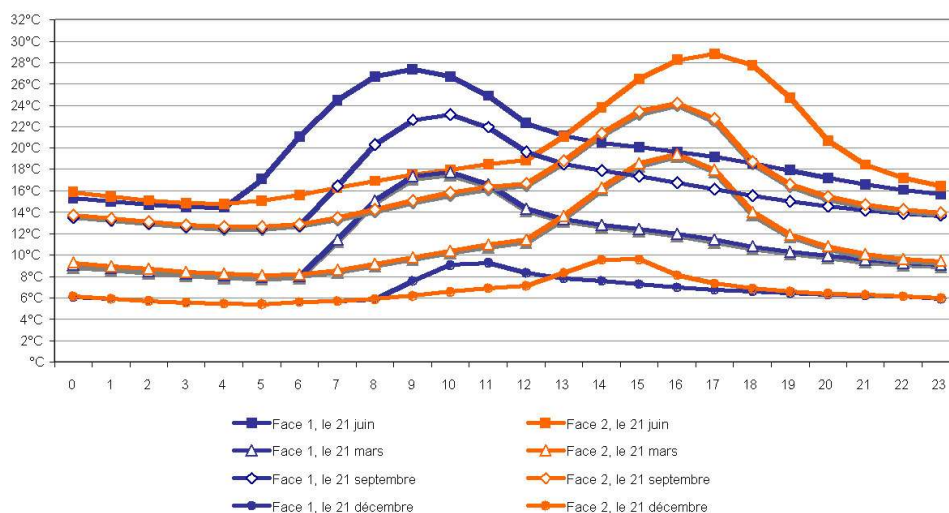
Dans les conditions fictives ainsi imposées, nous avons calculé la variation des températures de surface des façades opposées d'un « immeuble » et composées de deux murs aveugles en pierre de 40 cm d'épaisseur. Les températures sont calculées sous un ciel clair en décembre, mars, juin et septembre¹⁰. L'immeuble est orienté par pas de 10° entre -45° et +45° par rapport à l'axe nord-sud (direction 0°), de manière à évaluer les effets de l'inclinaison sur la température. Chaque situation est évaluée sur un cycle de 3 jours afin de prendre en compte les effets d'inertie. Nous avons repris la table des températures de l'air horaires annuelles publiées dans *La science des plans de ville*, établie d'après les relevés météorologiques disponibles à l'époque. Le logiciel mis en œuvre a été développé dans notre laboratoire et est utilisé régulièrement pour des études solaires, lumineuses, énergétiques et microclimatiques urbaines¹¹.

Les résultats pour la direction nord-sud (situation de référence) sont donnés dans la figure 1 ci-après. On voit que la façade est (face 1 sur le graphique) atteint sa température maximale vers 9 heures solaires en été (27°C environ) et vers 11 heures solaires en hiver (9°C environ). L'effet de l'ensoleillement sur la température varie suivant la saison. En été, il provoque une hausse de plus de 10°C en moins de 4 heures (de 5 heures à 9 heures) ; en hiver, l'échauffement est moindre (un peu moins de 4°C en 3 heures, de 8 heures à 11 heures). Dans les deux cas, la chaleur accumulée se dissipe

lentement sur l'ensemble de la journée.

La façade orientée ouest s'échauffe tout au long de la journée pour atteindre son maximum en fin d'après-midi solaire. En été, la température maximale est atteinte à 17 heures solaires (près de 29°C). En hiver, la façade ouest atteint son maximum (9,5°C) entre 14 et 15 heures solaires. L'effet de la température de l'air, mis en avant par les tenants de la théorie héliothermique, est sensible en été. À durée d'insolation égale, la température de la façade ouest à 15 heures est en effet supérieure de près de 2°C à celle de la façade est à 9 heures. La courbe montre bien l'échauffement de la façade le matin, suivant l'élévation progressive de la température de l'air. Cet effet est également sensible en mars, avec une différence de 2°C entre les deux façades. En septembre cependant, la différence n'est que de 1°C, tandis qu'en décembre, les deux façades atteignent des températures à peu près égales, symétriques par rapport au midi solaire. On voit donc que l'incidence de la « vague thermique » sur l'échauffement de la façade est variable suivant les saisons, et nul en hiver.

Fig. 1. Températures de surface simulées heure par heure pour 4 dates représentatives – Direction nord-sud



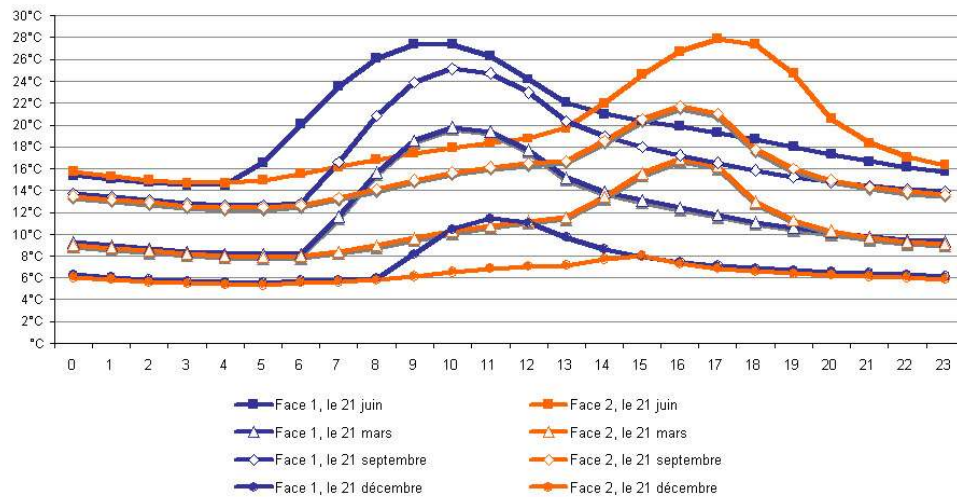
- 5 La page suivante (fig. 2) montre les résultats des simulations pour la direction 20°, c'est-à-dire l'orientation correspondant à l'axe héliothermique pour la latitude de Paris (19° selon Augustin-Rey). La façade orientée légèrement sud-est (face 1 sur le graphique) atteint des températures maximales supérieures de 2°C par rapport au cas de référence nord-sud en décembre (maximum de 11,5°C), en mars (17,7°C) et en septembre (23,2°C). En juin, les valeurs maximales sont égales entre les deux orientations.

La façade orientée légèrement nord-ouest connaît une situation inverse, avec des températures maximales toutes inférieures au cas nord-sud. La différence est de 1°C en été (maximum de 27,9°C à 17 heures solaires) et en hiver (maximum de 8°C à 15 heures solaires) mais elle dépasse 2°C en mars (maximum de 16,8°C au lieu de 19,4°C) et en septembre (21,7°C au lieu de 24,2°C). Les courbes montrent également que la température de la façade nord-ouest est généralement inférieure à celle de la façade sud-ouest. La différence atteint 3°C en mars, et près de 4°C en septembre et en décembre.

On voit donc que par rapport au cas nord-sud, l'orientation héliothermique augmente la température de la façade sud-est d'environ 2°C toute l'année sauf en été, et diminue

la température de la façade Nord-Ouest, de 1°C à 2°C selon la saison. Dans ce mouvement de balancier, la différence entre les deux façades de l'immeuble orienté suivant l'axe héliothermique s'avère importante, sauf en été. Elle atteint 3°C en mars, et près de 4°C en septembre et en décembre. On en conclut que l'axe héliothermique ne réalise la « symétrie thermique » de l'immeuble qu'en été, accentuant aux autres dates le déséquilibre des températures entre les deux façades par rapport au cas de référence.

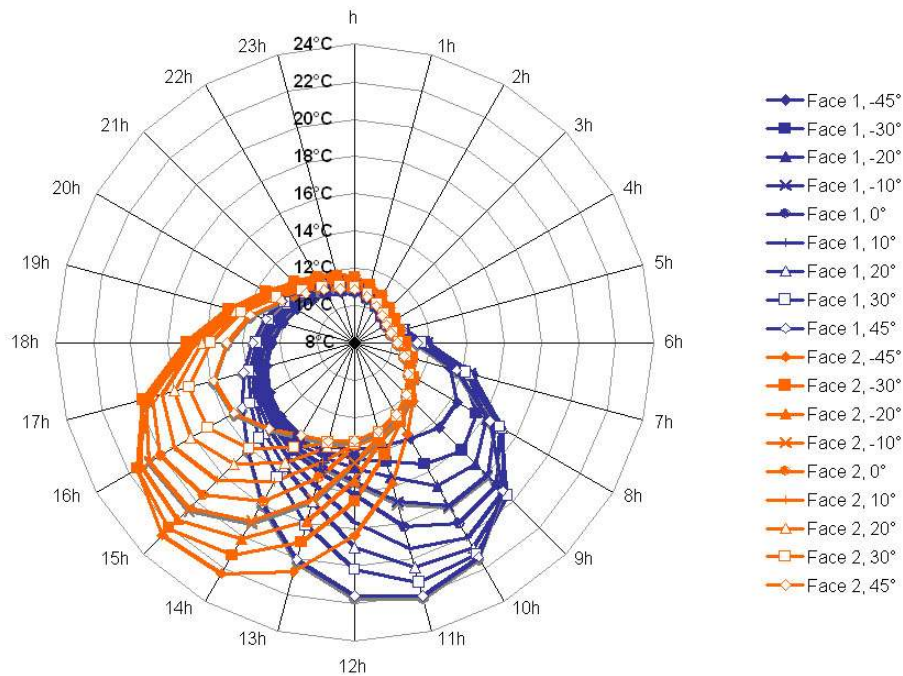
Fig. 2. Températures de surface simulées heure par heure pour 4 dates représentatives – Direction 20° (axe héliothermique)



- 6 Pour affiner ces résultats et nous rapprocher des conditions moyennes considérées dans la théorie héliothermique, nous avons calculé la température horaire moyenne annuelle de chaque façade en fonction de l'orientation. Cette température est simplement la moyenne, à chaque heure, des températures en mars, juin, septembre et décembre. Elle donne une indication des variations thermiques de la paroi en fonction de l'orientation.

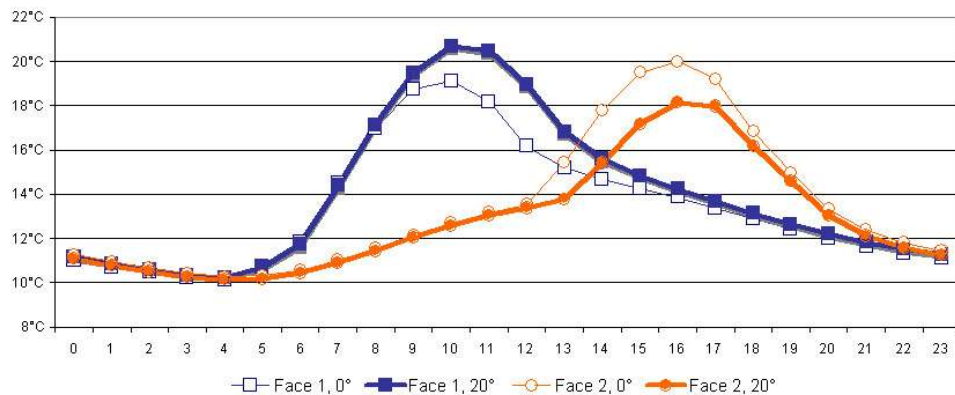
La figure 3 montre les résultats obtenus. Ce sont naturellement les orientations les plus proches du Sud (-45° et 45°) qui conduisent aux plus fortes températures. Cependant, les températures maximales ne sont pas obtenues aux mêmes heures. Pour la façade exposée le matin, c'est en milieu de matinée (entre 10 heures et 12 heures solaires selon l'orientation) que la paroi est la plus chaude en moyenne annuelle. Pour la façade exposée l'après-midi, la température de surface maximale est obtenue en milieu d'après-midi, entre 14 heures et 16 heures solaires.

- 7 Fig. 3. Températures moyennes annuelles selon l'orientation



- 8 La figure montre également, comme on pouvait s'y attendre, la forte dissymétrie des températures moyennes annuelles des façades dès que l'orientation s'écarte de l'axe nord-sud. Ainsi, pour l'immeuble orienté à 45°, la façade exposée sud-est atteint une température moyenne annuelle de 22°C à 11 heures solaires, tandis que la façade opposée ne dépasse pas les 16°C à 17 heures solaires, soit un écart de 6°C entre les maxima. On voit donc que l'effet de l'insolation (énergie solaire directe) dépasse largement celui de la température de l'air. L'exposition héliothermique suit cette règle : dans l'immeuble orienté à 20°, la façade exposée sud-est voit sa température moyenne annuelle varier de 17°C à 19°C le matin entre 8 heures et midi solaires, avec un maximum à 21°C à 10 heures. Au contraire, la température moyenne annuelle de la façade exposée nord-ouest varie de 13°C à 16°C entre midi et 18 heures solaires, avec un maximum à 18°C à 16 heures. L'équilibre « héliothermique » recherché n'est donc pas réalisé, comme le montre bien la comparaison entre les orientations 0° et 20° dans la figure 4.

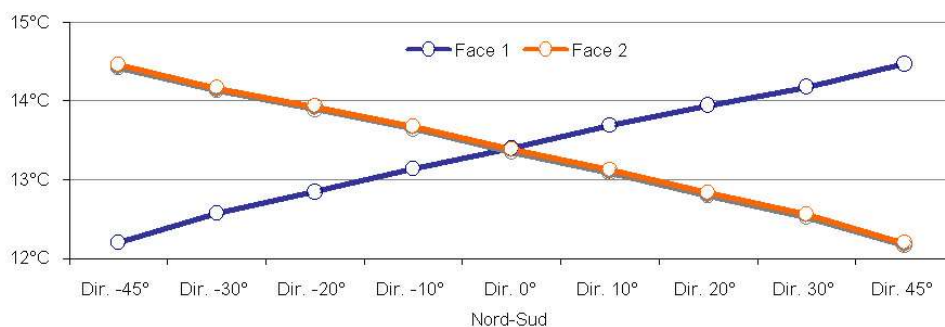
Fig. 4. Températures moyennes annuelles selon l'orientation : comparaison entre les orientations 0° et 20°



- 9 La part prépondérante des effets de l'ensoleillement par rapport à ceux résultant de la température de l'air, apparaît encore plus clairement lorsque nous calculons les moyennes annuelles (moyenne sur l'année des moyennes sur la journée), orientation par orientation. Les résultats obtenus sont sans appel. Les températures moyennes de surface s'équilibrent pour l'orientation exacte nord-sud. Autrement dit, dans les conditions de simulation choisies et suivant les hypothèses simplifiées mises en oeuvre, l'effet de la température de l'air est négligeable, en moyenne annuelle, sur l'effet de l'énergie solaire incidente. Les variations journalières et saisonnières analysées précédemment s'annulent de telle sorte que les températures de surface moyennes annuelles suivent une simple progression linéaire, parfaitement symétrique entre les deux façades (fig. 5).

L'égalité thermique moyenne, recherchée par les partisans de l'axe héliothermique, n'est donc réalisée que pour les façades exposées parfaitement à l'est et à l'ouest, c'est-à-dire pour un immeuble orienté exactement nord-sud. Toutes les autres orientations entraînent une dissymétrie thermique qui s'accroît au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'axe Nord-Sud¹².

Fig. 5. Températures de surface moyennes annuelles selon l'orientation



Conclusion

- 10 Dans le contexte social issu des désastres de la tuberculose au début du xx^e siècle, différentes théories urbaines sont apparues, prétendant réorganiser la ville pour mieux

ventiler les rues et exposer les bâtiments au soleil. Ces théories hygiénistes légitimaient leur radicalisme par l'urgence et l'ampleur des fléaux dont les populations urbaines souffraient.

La tuberculose fut résorbée par l'utilisation de la pénicilline dans les années 1940 et la plupart des théories hygiénistes sont aujourd'hui oubliées. L'une de ces théories cependant, l'axe héliothermique, formée au cours des années 1910 et publiée en 1928, est restée dans la mémoire urbaine par la publicité qu'en a faite Le Corbusier dans *La Ville radieuse* en 1935. Cette théorie proposait de réorganiser les villes selon un axe de symétrie thermique prenant en compte températures de l'air et durées d'insolation. Les hypothèses sur lesquelles est fondée cette théorie ont suscité une importante controverse dans les années 1940, opposant les hygiénistes tenant de l'exposition est-ouest, aux « climatistes » partisans de l'exposition Sud.

Plus de 75 ans après la publication de *La Science des plans de ville*, nous disposons des connaissances et des moyens techniques nécessaires à l'élucidation des principales questions solaires, thermiques et énergétiques qui se posent en matière d'architecture et d'urbanisme. La transcription de la théorie héliothermique en termes physiques nous a conduit à simuler les températures de surfaces des façades d'un immeuble fictif (simple paroi de pierres, sans ouvertures) orienté par pas de 10° autour de l'axe Nord-Sud. Les hypothèses restrictives choisies sont conformes aux hypothèses simplificatrices de *La Science des plans de ville*.

Dans ces conditions, nous avons montré que les intuitions des auteurs de *La Science des plans de ville* étaient partiellement vérifiées : du fait de l'augmentation de la température dans la journée, la façade ouest d'un immeuble orienté exactement nord-sud s'échauffe légèrement plus que la façade est, ensoleillée durant la même durée. La différence n'est cependant sensible qu'en mars et juin, et quasi nulle en décembre.

Cependant, contrairement à ce qu'affirment Augustin-Rey, Pidoux et Barde, l'orientation héliothermique ne permet pas de réguler ces différences. Elle tend à augmenter sensiblement la température de la façade sud-est toute l'année sauf en été (augmentation sensible de 2°C environ), et à diminuer celle de la façade nord-ouest, si bien qu'au final, elle accentue la différence entre les deux façades la plupart du temps (3°C en mars, près de 4°C en septembre et en décembre). L'axe héliothermique ne réalise la « symétrie thermique » de l'immeuble qu'en été, renfonçant aux autres dates l'écart de températures entre les deux façades par rapport au cas de référence. L'analyse des températures moyennes horaires sur l'année confirme ce résultat ; l'axe héliothermique introduit en effet un déséquilibre thermique en faveur de la façade sud-est, bien supérieur au déséquilibre thermique « naturel » en faveur de la façade ouest de la situation de référence.

Enfin, l'analyse des températures annuelles moyennes des façades révèle que l'égalité thermique moyenne, recherchée par les partisans de l'axe héliothermique, n'est réalisée que pour un immeuble orienté exactement Nord-Sud. Toutes les autres orientations entraînent une dissymétrie thermique moyenne qui s'accroît au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'axe Nord-Sud. L'axe héliothermique en lui-même ne présente donc rien de spécifique.

Au-delà de ces résultats qui sont aujourd'hui anecdotiques pour l'urbaniste, cette recherche montre que les rapports entre histoire urbaine et simulation physique peuvent être féconds. Comme nous l'avons montré, la simulation physique permet d'éclairer certains points de l'histoire urbaine que les historiens laissent souvent

obscur, faute de moyens d'investigation adaptés ; d'autres analyses que celle concernant l'axe héliothermique mériteraient d'être menées.

NOTES DE FIN

1. A. AUGUSTIN-REY, J. PIDOUX, C. BARDE, *La science des plans de villes, ses applications à la construction, à l'extension, à l'hygiène et à la beauté des villes, orientation solaire des habitations*, Paris/Lausanne, Dunod /Payot et Cie., 1928, 493 p.
2. Pour une analyse de cette question sous l'angle de l'histoire de la médecine, voir notamment T. C. MEDICI, « La tuberculose et l'idéal de l'habitat moderne », *Médecine & Hygiène*, n°2448, septembre 2003
3. Cf. M.-J. DUMONT, *Le logement social à Paris, 1850-1930 : les habitations à bon marché*, Liège, Mardaga, 1991.
4. *La science des plans de villes*, op. cit., p. 22-23.
5. Edmond MARCOTTE, ingénieur, technicien sanitaire diplômé par l'état, chef de la section des essais à l'École nationale des Ponts et Chaussées. Extrait de *L'art de bâtir une maison agréable et saine*, Paris et Liège, Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1930. p. 217.
6. André GUTTON, architecte diplômé par le gouvernement en 1927 et urbaniste, fut successivement architecte en chef des Bâtiments civils et palais nationaux en 1936, architecte (1936) puis architecte en chef de l'Institut de France (1943-1969), architecte en chef de l'Opéra de Paris (1950-1954) et architecte des P.T.T. Il fut également professeur à l'École nationale supérieure des beaux-arts (1949-1958) et à l'Institut d'urbanisme de l'université de Paris (1944).
7. LE CORBUSIER, *La ville radieuse*, Paris, 1935, p. 159.
8. R. LEROUX, « La climatologie de l'habitation », Institut technique du bâtiment et des travaux publics. *Circulaire série B*, n°7, Paris, 1946, p. 11.
9. A. HERMANT. « Ensoleillement direct et orientation », *Techniques et architecture*, juillet-août 1943, p. 205.
10. Si les équinoxes sont équivalents du point de vue solaire, ils doivent être différenciés du fait de la température moyenne différente en mars et en septembre.
11. Logiciel Solène. Voir entre autres D. GROLEAU, « Simulation thermo-radiative d'un îlot urbain avec le logiciel Solène », *Rapport interne*, Laboratoire CERMA, École d'Architecture de Nantes, 2004, 27 p.
12. Ces résultats ne sont évidemment interprétables et applicables que dans les conditions de simulation décrites précédemment et correspondant à la présente étude.

INDEX

Index chronologique : Epoque contemporaine

Mots-clés : urbanisme, architecture, axe héliothermique

AUTEURS

AMINA HARZALLAH

Enseignant-chercheur à l'ENAU (École nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis, Tunisie).
Architecte, elle est docteur en sciences de l'ingénieur, option Architecture et a obtenu en ex-
æquo le prix de la thèse de doctorat en architecture 2007 décerné par l'Académie d'architecture