

Approche géométrique et fréquentielle de la thermique du bâtiment

Benoit Beckers & Hassan Arham

Ce rapport est basé sur la première version du logiciel Heliodon et sur les travaux menés par Hassan Arham, dans le cadre de sa thèse de doctorat, “Valoración de la respuesta térmica en edificios : la repercusión dinámica de la envolvente” (Université Polytechnique de Catalogne, 2005).

1. Une approche fréquentielle et géométrique

Introduction

Tout édifice est d’abord un refuge, sensé nous protéger des vents et de la pluie, des nuits trop fraîches et des jours trop chauds. La plupart des phénomènes atmosphériques impliqués ont une forte composante périodique, ce qui justifie une analyse fréquentielle, centrée sur la période d’un jour, sur ses multiples (basses fréquences) et sur ses partiels (vers les hautes fréquences).

Si les techniques constructives ont déjà offert quelques applications intéressantes à la théorie de Fourier, pour la détermination de la température intérieure statique¹, c’est dans une perspective vraiment architecturale que s’inscrivent nos recherches sur le comportement thermique dynamique des édifices, ce qui leur confère une originalité certaine et, selon nos premiers résultats, très prometteuse, menant à une relation approfondie entre la physique et l’architectureⁱⁱ.

Dans la première partie de ce rapport, nous discuterons deux espaces géométriquement comparables (tous deux ont l’ensemble de leurs fenêtres percées dans une seule façade orientée au sud [SSE]). Nous y montrerons l’intérêt des représentations fréquentielles, et aussi l’importance de la géométrie, qui enrichit considérablement l’interprétation des courbes thermiques présentées.

Matériel et méthode

Nous utilisons ici des mesures réalisées dans un appartement et dans un bureau à Barcelone¹, sur des périodes de 8 à 9 jours, que nous passons au domaine fréquentiel. La fonction de transfert T.F. (transformée du rapport des températures intérieures et extérieures) est exprimée en décibels dans les graphiques, de même que l’échelle des périodes (de 4 heures à 3 ou 4 jours).

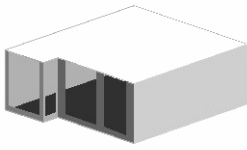
Pour l’étude des trajets solaires, nous utilisons le programme « Heliodon² » : nous en faisons ici un usage très approximatif, sans tenir compte, par exemple, de l’épaisseur des murs. Nous considérons comme *géométrique* tout ce qui tient des dimensions des espaces, de leur topologie et de leur orientation, mais aussi ce qui relève des angles de vue et des trajets du soleil.

A partir de ces données, nous tenterons une analyse du comportement thermique des deux espaces étudiés aux basses et aux moyennes fréquences (pour des périodes allant de 4 jours à 12 heures environ), sans trop nous risquer aux plus hautes fréquences, où les conditions thermiques dépendent essentiellement du comportement des occupants durant la période étudiée, que nous ne connaissons pas.

¹ Les mesures et les plans ont été réalisés par H. Coch et A. Isalgué, de l’Université Polytechnique de Catalogne.

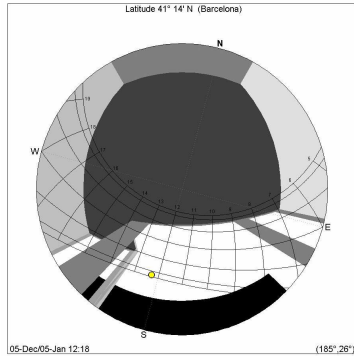
² Le programme “Heliodon” (auteurs: B. Beckers et L. Masset), pour la conception architecturale en fonction de l’illumination naturelle, est disponible gratuitement, avec un manuel en espagnol, sur le site www.upc.edu/aie.

Premier cas

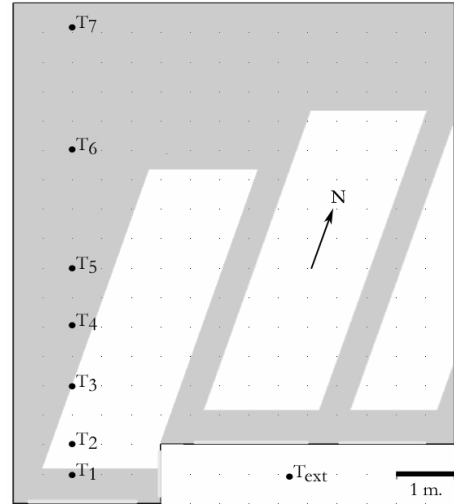


Le premier espace étudié est caractérisé par une façade présentant quatre grandes fenêtres qui, comme le montre le plan ombré, produisent sur le sol, en hiver à mi-journée, de longues taches de lumière, jusqu'aux deux tiers environ du salon ici représenté.

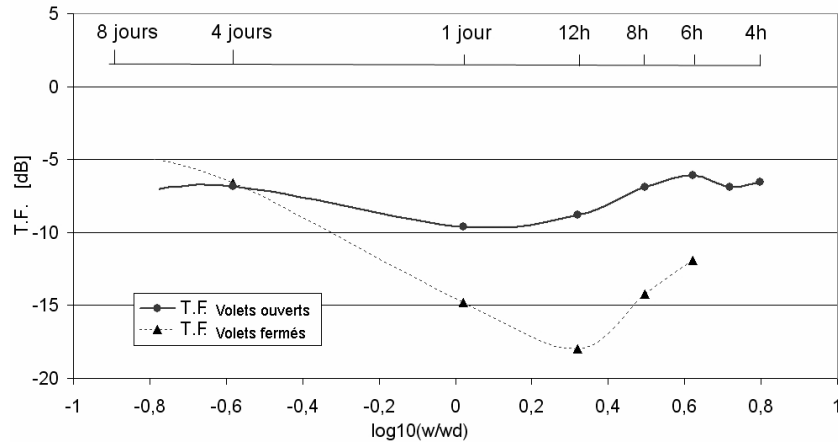
Les sept capteurs intérieurs, protégés du soleil, s'échelonnent, respectivement, à 50 cm, 1 m, 2m, 3 m, 4 m, 6 m. et 8.2 m. de la fenêtre percée dans le saillant de la façade. Un huitième capteur mesure la température extérieure.



Comme le montre la stéréographie réalisée pour un point situé à hauteur d'homme au centre de la pièce et près des fenêtres, l'illumination solaire directe est importante (plus de cinq heures en décembre, et encore est-elle alors limitée par la façade de l'édifice d'en face, en noir sur le dessin).



Le diagramme suivant montre la fonction de transfert moyennée sur les sept points de mesure dans deux situations : une semaine de décembre avec les volets ouverts (en traits pleins), et une autre avec les volets fermés (en pointillés) :

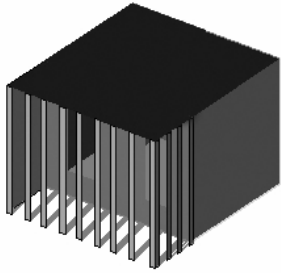


Pour interpréter ce graphique, il faut se rappeler qu'il représente, dans le domaine fréquentiel, le rapport des oscillations intérieures et extérieures de la température, et qu'il s'exprime dans une échelle logarithmique. Si la courbe se ramène à une droite horizontale à 0 dB, cela signifie que l'oscillation intérieure est exactement la même que dehors (mais pas forcément la température !); si elle se maintient au-dessus (au-dessous) de zéro, cela veut dire que l'oscillation intérieure est plus forte (plus faible) que l'oscillation extérieure.

Dans le cas où les volets sont ouverts, la courbe se maintient entre -5 et -10 dB : à toutes les fréquences, le salon étudié répercute ostensiblement les oscillations de la température extérieure. L'oscillation intérieure atteint un maximum d'environ 30% de l'extérieure pour les périodes de 4 jours et de 6 heures, et baisse à 10% pour la période de 24 heures.

Ces résultats ne sont pas étonnants, puisque la grande baie vitrée de la façade, orientée au sud, permet une captation généreuse tout au long de la journée, ce qui garantit des oscillations internes importantes à toutes les fréquences. En particulier, c'est certainement l'influence de la radiation solaire directe qui explique la hausse des oscillations aux hautes fréquences. Ainsi, le pic des 6 heures peut être mis en relation avec la stéréographie de la page antérieure, qui montre une durée d'ensoleillement du même ordre pour le mois de décembre...

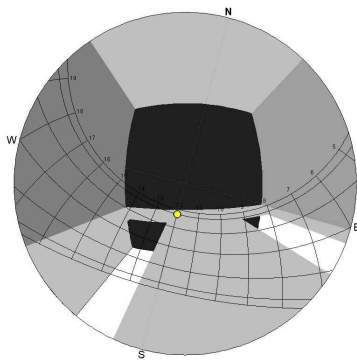
Lorsque les volets sont fermés, les oscillations de la température intérieure sont fortement amorties aux moyennes et hautes fréquences, baissant jusqu'à moins de 2 % de l'oscillation extérieure (en deçà de 6 heures, elles deviennent imperceptibles, ce qui explique l'interruption de la courbe sur le graphique).



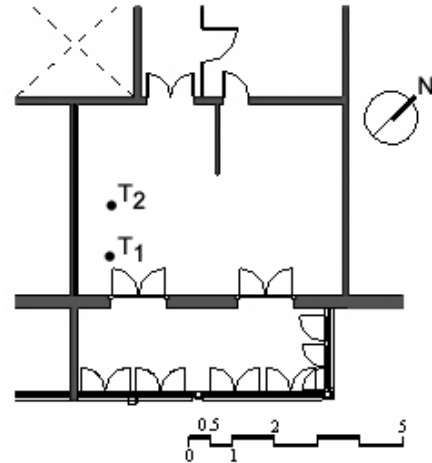
Second cas

Le second cas étudié est caractérisé par la présence d'une terrasse vitrée (véranda) qui est séparée de l'espace intérieur par un mur épais (30 centimètres) percé de deux portes-fenêtres dont une partie seulement est vitrée : on considère que la « façade », orientée au sud (SSE) exactement comme dans le cas antérieur, est constituée, ici, d'une double paroi incluant la terrasse tout entière. C'est l'effet thermique de cette « façade » complexe que nous allons comparer avec celui de la façade simple antérieure, puisque tous les autres paramètres constructifs et géométriques sont assez semblables entre les deux cas traités.

Ici, les mesures correspondent au mois de mai, et la véranda constitue alors une protection très efficace, qui empêche pratiquement l'entrée du soleil dans le bureau : sur le temps de midi, il n'y a pas de tache solaire sur le sol, et la stéréographie à hauteur d'homme nous montre que, même près des fenêtres du mur intérieur, le soleil n'entre pas.

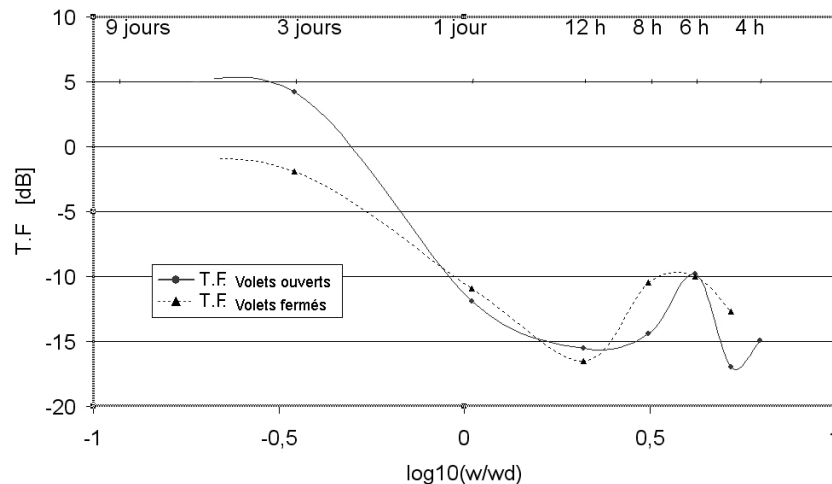


L'orientation de la véranda au sud lui permet une captation très importante, mais celle-ci n'est pas transmise directement vers le bureau. On peut donc prévoir un effet de serre nourri sous la véranda, dont l'effet sur le bureau dépendra essentiellement de la constante de temps du mur de séparation. En employant une formule approximativeⁱⁱⁱ, on trouve que celle-ci est environ de 1,3 jour.



Dans un cas comme celui-ci, il serait intéressant de comparer deux fonctions de transfert : une entre l'extérieur et la véranda (considérée comme « intérieur »), puis une seconde entre la véranda (considérée comme « extérieur ») et le bureau. Toutefois, dans une perspective architecturale, il est aussi justifié de considérer le dispositif verrière-véranda-mur comme un tout, une façade « complexe », qui constitue dans son ensemble une solution constructive alternative, à comparer avec la façade simple du cas antérieur.

Dans ce cas, la fonction de transfert est la suivante :



Dans le cas où les volets sont ouverts, les oscillations dans le bureau sont très importantes aux basses fréquences (avec un gain supérieur à 300% pour la période de 3 jours), ce qui montre un effet de serre important, emmagasiné dans le mur épais de séparation, lequel transmet au bureau des gains substantiels et de longue durée. En revanche, en deçà de la constante de temps de ce mur, c'est-à-dire pour les moyennes et hautes fréquences, on vérifie une chute brutale du gain : pour la période d'un jour, celui-ci n'est plus que de 5% par rapport aux oscillations de la température extérieure...

La pénétration de la chaleur au travers du mur épais de séparation est filtrée aux moyennes et hautes fréquences, parce que la constante de temps du mur est supérieure à un jour. De plus, les fenêtres percées dans ce mur sont protégées du soleil par le toit de la véranda et, à l'époque correspondant aux mesures, la radiation solaire directe n'atteint pratiquement jamais le bureau : ceci suffit à expliquer la courbe mesurée.

Dans le cas où les volets sont fermés, on n'observe pas de changement, sauf aux basses fréquences, où les oscillations intérieures de la température chutent à 70% seulement des oscillations extérieures pour la période de 3 jours.

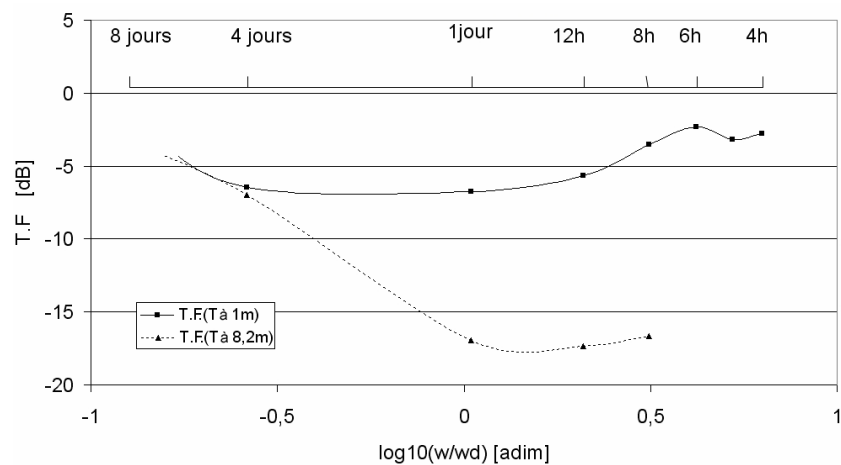
Le paramètre de la profondeur

Jusqu'ici, nous n'avons utilisé les mesures de la température intérieure disponibles (7 dans le premier cas et 2 seulement dans le second) que moyennées, en supposant qu'elles donnent ainsi, dans leur ensemble, une idée suffisamment précise de l'évolution de la température dans les locaux étudiés.

Il est important de préciser ici que les auteurs de ce rapport n'ont pas participé directement à ces mesures, et que celles-ci n'ont pas été réalisées spécifiquement pour la présente étude. Dans un domaine où les mesures sont très longues et leurs conditions particulièrement difficiles à déterminer (comment connaître exactement les activités des occupants d'un local durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, sachant que la simple ouverture d'une fenêtre ou d'une porte pendant quelques heures peut s'observer sur la fonction de transfert ?), il est nécessaire de profiter au maximum des données disponibles et de s'accommoder de leurs incertitudes. Cependant, une telle situation a ses limites, et nous sommes bien conscients que des mesures beaucoup plus précises, et réalisées avec les intentions ici suggérées, seraient nécessaires pour mieux montrer ce que nous voulons affirmer.

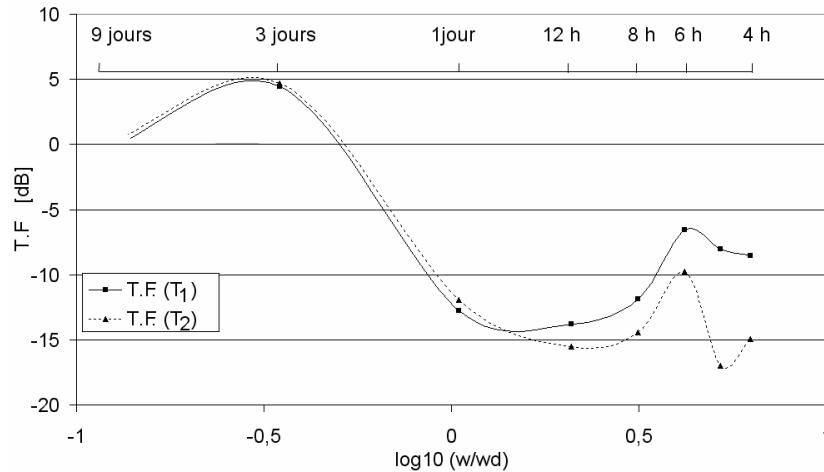
Malgré tout, il nous semble possible, au risque de frôler l'évidence, de suggérer l'importance cruciale du facteur géométrique sur les fonctions de transfert étudiées. Nous le ferons dans le seul cas exploitable, en examinant l'influence sur la température mesurée de la distance entre le capteur et la façade.

Dans le premier cas, avec les volets ouverts, nous laissons de côté le capteur T_1 , caché par le bas de la fenêtre, et nous comparons les capteurs T_2 (à 1m. de la fenêtre) et T_7 (à 8.2 m. de la fenêtre).



L'angle solide selon lequel le capteur T_2 « voit » le ciel est largement supérieur à celui qui correspond au capteur T_7 : les échanges de chaleur (gains et pertes) y sont donc bien plus importants, ainsi que la ventilation, ce qui explique des oscillations de température beaucoup plus fortes.

Dans le second cas, avec les volets ouverts, nous comparons les deux seuls capteurs disponibles, à 1 m. et à 2.5 m. environ du mur de séparation entre le bureau et sa véranda.



Ici, on voit que la fonction de transfert ne change pas avec la profondeur (hormis les oscillations à hautes fréquences, qui sont de toute façon très faibles). Même si la distance entre les deux capteurs est ici beaucoup plus faible que celle qui existe entre les capteurs T_2 et T_8 du premier cas, on peut facilement imaginer que les oscillations varient beaucoup moins avec la profondeur dans le bureau, qui est protégé des radiations directes, que dans le salon, qui est sous leur influence.

Discussion et conclusions

Il a été montré ailleurs^{iv} que la fonction de transfert moyennée sur un intérieur peut être simulée numériquement d'une manière très satisfaisante dans le domaine fréquentiel, et que cette fonction – mesurée ou simulée – donne une représentation graphique très instructive du comportement thermique d'un édifice.

L'étape suivante devrait être, logiquement, d'utiliser cette représentation pour constituer une typologie des édifices qui permette de prévoir leur comportement thermique et de concevoir de nouvelles solutions.

Cependant, les programmes actuels, qui évacuent presque complètement la géométrie, ne sauraient suffire à cette tâche, car, comme nous venons de le montrer, le facteur géométrique est déterminant sous trois aspects.

En premier lieu, sous l'aspect de l'*orientation*, qui détermine les trajets solaires intérieurs. Ce problème est le plus facile à traiter, et un programme comme « Heliodon », une fois développé dans ce sens, pourra apporter toute l'information nécessaire⁵, du moment qu'on lui fournisse les données nécessaires sur l'emplacement et la forme des masques et des ouvertures.

En second lieu, sous l'aspect de la *distribution des inerties*. C'est elle qui explique, par exemple, la différence de comportement thermique entre les deux cas ici étudiés : le déplacement d'une partie de l'inertie vers un mur intérieur placé derrière la verrière suffit, dans le cas du bureau, à bouleverser le comportement dynamique de sa température intérieure. Dans ce cas, on peut encore parler d'une « façade complexe » (caractérisée, entre autres, par l'épaisseur du mur intérieur et sa distance aux fenêtres extérieures), mais on ne saurait se limiter à un classement général des types d'enveloppe, puisque l'inertie peut aussi se distribuer dans l'ameublement, dans les cloisons qui séparent les différentes pièces d'un appartement...

En troisième lieu, sous l'aspect de la *variation spatiale* de la fonction de transfert, qui peut être importante, comme dans le premier cas étudié quand on s'éloigne des fenêtres. A notre avis, l'information que nous donnerait cette variation serait aussi importante que celle des deux aspects pour établir une typologie détaillée des édifices.

À cela, il faut ajouter le problème de la ventilation, que nous avons ici complètement évacué, faute de disposer de l'information nécessaire (mesure des courants aériens).

La première conclusion de ce travail est, justement, qu'il faudrait réaliser des mesures beaucoup plus précises, au cas par cas, afin d'isoler les différentes composantes du problème : radiation, ventilation, activité des occupants... Une fois ces données obtenues, il serait certainement possible, en comparant continuellement les expressions temporelle et fréquentielle de la fonction de transfert mesurée en divers points, d'identifier et de quantifier l'influence de ces différentes composantes sur le comportement thermique de l'édifice étudié.

A partir de là, il devient envisageable de simuler numériquement ce comportement, en tenant compte du facteur géométrique sous ses trois aspects, ce qui demandera tout de même un profond changement de la mentalité algorithmique actuelle dans ce domaine : on ne devrait plus pouvoir se satisfaire des simplifications statistiques communément admises, même si le travail à réaliser pour passer à une programmation plus géométrique peut paraître, pour la thermique du bâtiment, assez prométhéen...

Une démarche pragmatique consisterait à utiliser, dès à présent, toute l'information qu'un modèle géométrique peut nous apporter facilement, ce qui signifierait déjà un changement considérable, lequel pourrait inciter les chercheurs à des travaux ciblés afin d'enrichir peu à peu une telle démarche.

Du reste, même avec les moyens limités que nous avons maniés jusqu'ici, on peut déjà sentir l'intérêt de la fonction de transfert sous sa forme fréquentielle, qui nous permet une analyse assez détaillée des situations étudiées et nous conduit à toujours plus d'exigence quant aux mesures, quant à leur interprétation et quant à la connaissance géométrique des espaces impliqués.

2. La thermique et l'architecture

Introduction

On commence par distinguer deux points de vue assez différents sur le bâtiment : celui de la construction et celui de l'architecture. Sans doute les thermiciens sont-ils plus habitués, en général, à travailler avec des constructeurs qu'avec des architectes, lesquels ont besoin, plus spécifiquement, de posséder des outils de simulation qui puissent accompagner chacun de leurs projets depuis ses premières décisions formelles jusqu'au dernier niveau de détail pouvant produire des conséquences thermiques importantes. Le grand défaut de la plupart des logiciels actuels, c'est qu'ils évacuent presque complètement la géométrie, la réduisant à des données globales (volume total, surfaces équivalentes,...) peu sensibles aux décisions fondamentales du projet d'architecture, telles que la forme des intérieurs, leur tracé en plan, ou l'emplacement des différentes ouvertures. À ce défaut essentiel, il faut ajouter un manque chronique de réflexion sur les propriétés des représentations graphiques offertes, celles que manipuleront, exclusivement, les utilisateurs...

Pour qu'un programme informatique puisse aider efficacement l'architecte à maîtriser les énergies (thermique, acoustique, illumination,...) dans ses projets, il doit respecter, à notre avis, trois critères fondamentaux :

- Offrir des représentations graphiques de qualité, qui puissent être intégrées dans le dossier du projet.
- Permettre une manipulation interactive qui, tout en suivant l'ordre naturel du projet, guide l'utilisateur dans ses principales décisions.
- Utiliser au maximum les données géométriques dans les calculs, dont les résultats doivent être limpides et faciles à interpréter.

Ce dernier point, le plus important, car les deux autres le suivent assez naturellement, mène tout droit au développement des théories et des méthodes géométriques, qui s'imposent dans le domaine de l'illumination (rendu réaliste, lancer de rayons déterministe^v,...), ont déjà une longue histoire en acoustique des salles (méthode des images, lancer de rayons probabiliste¹), mais paraissent beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre pour la thermique du bâtiment...

Cependant, les progrès récents de l'informatique nous permettent d'espérer une certaine unification autour de la géométrie des différents problèmes énergétiques relatifs à l'architecture, incluant la thermique. Pour approfondir et illustrer cette intuition, nous décrirons ici quelques aspects du programme « Heliodon ». Comme ses résultats intéressent directement la thermique, on peut le considérer comme le premier module d'un futur logiciel pour l'étude architecturale de la thermique du bâtiment, mais aussi, à la fois, comme un modèle, dont les propriétés interactives et le graphisme soigné devraient être dans l'avenir transposés vers une étude plus générale de la thermique appliquée au projet d'architecture.

L'enseiement

Comment les rayons du soleil lancés dans ses trajets célestes sont-ils interrompus par les obstacles lointains, partiellement transmis par les fenêtres, filtrés par les volets et tronqués par les opacités de l'entourage, se convertissant en trajets intérieurs qu'il faudra plier aux nécessités thermiques et lumineuses de l'édifice projeté ? Même si on simplifie au maximum les données géométriques (orbites circulaires, schématisation des édifices, absence de réflexions), il devient vite difficile de se représenter clairement ce double mouvement au long du jour et de l'année qui, passant d'une ouverture à l'autre, laissant des ombres propres et d'autres projetées, balaie l'espace, le sol, les murs et les diverses inclinaisons des objets présents.

Ici, le problème tient surtout de la représentation graphique choisie et de l'exploitation de ses possibilités visuelles.

1) La vue en plan

Dans un projet d'architecture, les différentes représentations graphiques se succèdent presque toujours dans l'ordre suivant : vue en plan (projection cotée), axonométries, façades, coupes longitudinales et transversales, perspectives centrales. C'est cet ordre qu'il convient de respecter dans tout logiciel d'aide à la conception. Dans « Heliodon », c'est la vue en plan qui reçoit les premiers traits, associés à des cotes numériques indiquant les hauteurs. Une vue en perspective permet de contrôler le volume ébauché.

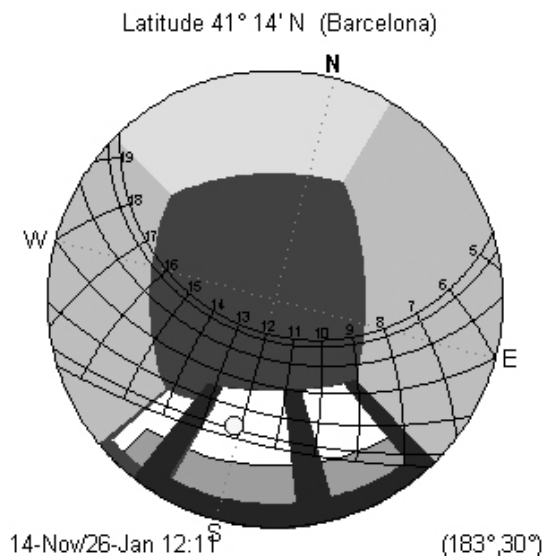
La vue en plan ombrée montre très bien l'ensoleillement dans son déploiement spatial, mais c'est un instantané qu'il est difficile d'animer, puisqu'il faudrait faire voir le double balayement du soleil (quotidien et annuel) ; on peut aussi représenter les ombres cumulées, ou les ombrages correspondant à des moments choisis (solstices et équinoxes, par exemple), superposés en couches translucides ; cependant, de telles représentations deviennent vite très complexes et leur usage, malaisé pour la conception, se montre plus utile pour l'analyse. Cela est encore plus vrai pour l'ombrage en trois dimensions que proposent les logiciels de rendu réaliste : ceux-ci sont très utiles pour vérifier un projet terminé et le présenter au public, mais ils sont bien trop lents pour la conception.

2) La stéréographie

Tout aussi traditionnel est l'usage de projections spécifiques pour l'étude de l'ensoleillement. Il s'agit de projeter d'abord les trajets solaires et les édifices à étudier sur une même sphère virtuelle (la « voûte céleste »), puis de ramener celle-ci sur le plan, au moyen d'une projection orthogonale, gnomonique (centrale depuis le centre de la sphère) ou stéréographique (centrale depuis le nadir).

Les projections de la sphère, étudiées depuis des siècles par les cartographes, sont bien connues, et nous nous limiterons ici à rappeler les avantages de la stéréographie : elle est conforme (respecte les angles) et transforme les cercles en des cercles ou des droites (elle est donc facile à tracer, manuellement ou par ordinateur).

Comme le montre l'image suivante³, le soleil se déplace sur des parallèles (jours de l'année) et méridiens (heures du jour) qui sont des arcs de cercles se coupant à angle droit ; les verticales de l'édifice sont des droites convergeant au zénith, et les horizontales des arcs de cercle ; le cercle extérieur représente l'horizon.



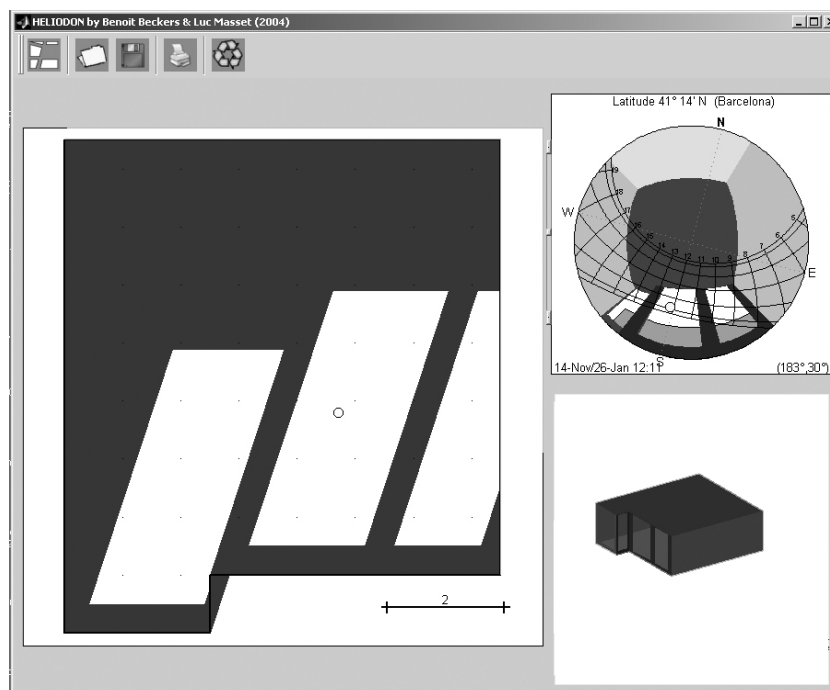
La stéréographie nous offre donc une représentation temporelle complète, pour toute l'année, de l'interaction entre les trajets solaires et les masques ou fenêtres de la construction. Mais c'est une représentation ponctuelle, où toute l'information spatiale est perdue.

3) Combinaison interactive

On a donc deux représentations complémentaires : la vue en plan ombrée, spatiale mais instantanée, et la stéréographie, temporelle mais ponctuelle. L'idée principale du programme « Heliodon » est de combiner ces

³ Toutes les images ici reproduites se rapportent au premier cas étudié dans la partie précédente : le salon d'un appartement à Barcelone.

deux représentations, en les présentant simultanément à l'utilisateur (une troisième fenêtre montre une perspective de contrôle) :



Chacune des deux représentations principales explique l'autre : en déplaçant l'observateur sur la vue en plan, on voit la stéréographie se transformer selon le parcours suivi; en déplaçant le soleil sur la stéréographie, on voit les ombres se mouvoir sur la vue en plan. Si l'observateur se place dans l'ombre, le soleil passe sur le masque qui la projette ; quand le soleil passe par une fenêtre dégagée, l'observateur est directement ensoleillé...

En voyageant continuellement d'une représentation à l'autre, du temps à l'espace et de l'espace au temps, on se fait très vite une idée précise des configurations les plus complexes. C'est pourquoi le programme « Heliodon », même dans sa version actuelle, encore très incomplète, est utilisé par de nombreux étudiants de l'École d'Architecture de Barcelone, qui y trouvent une application efficace, simple et purement géométrique, beaucoup plus maniable en début de projet que les logiciels commerciaux plus développés.

Comme nous l'avons suggéré dans la partie précédente, une même sorte de combinaison interactive pourrait s'appliquer à la thermique, entre une vue en plan où l'on déplacerait librement un capteur, et la fonction de transfert simulée pour ce capteur, qu'il faudrait exprimer à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. En voyageant entre ces trois représentations, l'utilisateur prendrait très efficacement conscience du comportement thermique de l'édifice étudié.

Du reste, cette forme interactive de voyager entre différentes représentations complémentaires semble très prometteuse dans tous les problèmes énergétiques liés au projet d'architecture^{vi} : elle a ainsi été appliquée ailleurs⁴ à l'acoustique des salles, dans un logiciel où l'on passe constamment d'une carte des niveaux sonores vus en plan à un diagramme polaire plus complet^{vii}, signalé sur la carte par un « microphone ».

Quant à « Heliodon », on pourrait en tirer meilleur parti pour la thermique, en sacrifiant soit l'interactivité (pour rechercher, par exemple, le volume moyen soumis à la radiation solaire directe dans un local quelconque aux différentes époques de l'année), soit la pureté géométrique (pour tenir compte, par exemple, des données quotidiennes sur les obstructions nuageuses disponibles dans la plupart des grandes villes).

L'ouverture de ciel

Toutefois, outre l'ensoleillement, il existe un autre paramètre utile pour la thermique et qui peut être calculé sans rien sacrifier des caractéristiques premières du programme : il s'agit de l'ouverture de ciel.

Au-delà de la stéréographie, nous sommes en effet naturellement poussés à examiner les autres formes de projection de la sphère, qui toutes ont leur utilité : la projection *cylindrique* pour représenter en vue panoramique

⁴ Le programme « Radit2d » (auteurs: B. Beckers et L. Masset), pour la conception acoustique des salles, est disponible gratuitement, avec un manuel en espagnol, sur le site www.upc.edu/aie.

les contours de l'horizon, la projection *gnomonique* pour déterminer l'emplacement et la forme des fenêtres en fonction de l'illumination désirée en un point particulier du local projeté,...

La plus intéressante est sans doute la projection *équivalente*, qui maintient les proportions entre les surfaces projetées.

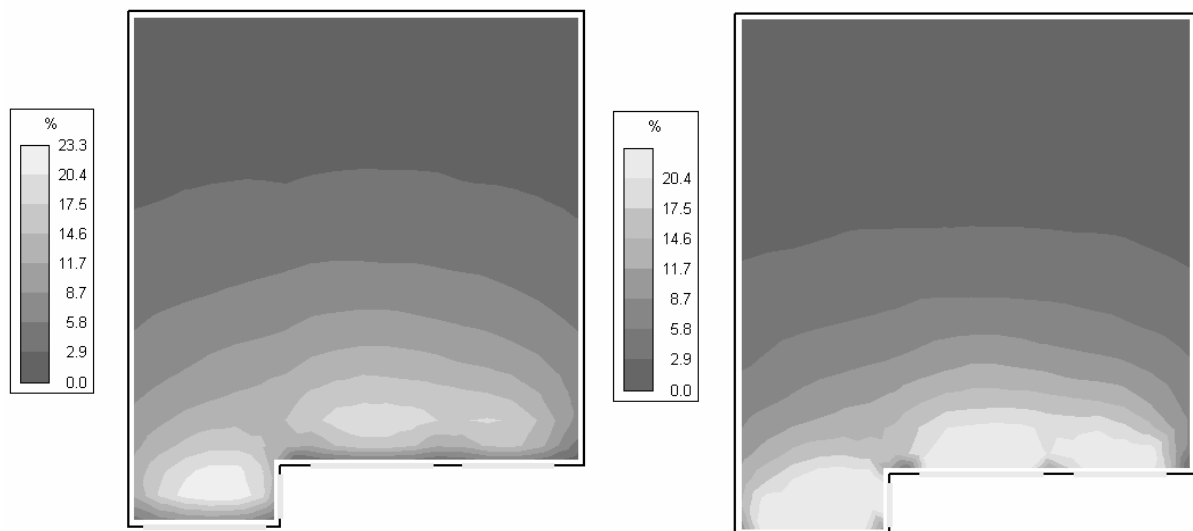
Pour la réaliser, la voûte céleste est projetée sur un plan tangent au zénith. Tous les grands cercles passant par ce point (les méridiens) sont projetés dans le plan comme les rayons d'un cercle centré sur le zénith ; l'orientation de ces rayons, images des grands cercles, est respectée, comme dans la projection stéréographique. Quant aux parallèles, ils se projettent comme des cercles centrés sur le zénith avec des rayons tels que la surface de chaque calotte sphérique limitée par un de ces cercles soit la même que celle du disque image. Ainsi, la voûte céleste complète de surface $2\pi R^2$ est représentée par un cercle de rayon $R\sqrt{2}$.

Comme les surfaces sont respectées, si toute la scène est projetée sur une équivalente initialement blanche, les masques étant coloriés en noir, la partie blanche montrera l'ouverture du ciel. Le rapport blanc / (blanc + noir) donne l'angle solide sous lequel est vu le ciel depuis le point étudié. Il est à noter que, même si ce point est au-dessus du sol, l'ouverture de ciel ne peut jamais être supérieure à une demi-sphère, sauf à très haute altitude.

Des projections équivalentes sont montrées dans la dernière illustration de cette communication, en rapport avec une carte des ouvertures de ciel. Pour réaliser cette carte, on a recours à un procédé assez original. La projection équivalente est calculée en chaque point d'une grille, et l'image est à chaque fois « congelée ». Le programme effectue alors un simple et rapide comptage des pixels blancs et noirs. Le seul inconvénient de la projection équivalente est que les courbes représentant les horizontales et verticales de l'architecture n'y sont généralement plus, comme dans la stéréographie, des cercles et des droites, ni même des coniques. Il faut donc les calculer point par point. En revanche, le grand avantage de la méthode ici décrite est qu'il n'est pas nécessaire de procéder à l'élimination des parties cachées (comme dans les méthodes basées sur la recherche pyramidale de l'angle solide) : il importe peu, en effet, que les masques se recouvrent entre eux, puisque seules nous intéressent les surfaces restées libres.

La figure suivante, à gauche, montre les ouvertures de ciel au niveau du sol. Les maximums sont légèrement éloignés des fenêtres, parce que celles-ci ne descendent pas jusqu'au sol. Dans l'illustration qui clôt ce rapport, on montre comment cette carte est obtenue et expliquée à partir des projections équivalentes.

La figure de droite montre les ouvertures de ciel à 80 centimètres au-dessus du sol. Ici, les maximums touchent les fenêtres et sont plus importants (jusqu'à 40 % de la voûte céleste).



En général, les cartes d'ouverture de ciel, superposées aux ombrages, accentuent fortement la suggestion du relief et son réalisme ; les logiciels de rendu réaliste en font d'ailleurs un usage très effectif (« lumière du ciel » ajoutée à la « lumière du soleil »).

En thermique, leur intérêt est évident, puisqu'elles montrent les endroits les plus exposés aux pertes par radiation vers le ciel, beaucoup plus froid que les obstructions de l'architecture.

On en conclut que les projections équivalentes et stéréographiques permettent ensemble d'étudier les principaux échanges radiatifs entre les bâtiments, le ciel et le soleil.

Discussion et conclusions

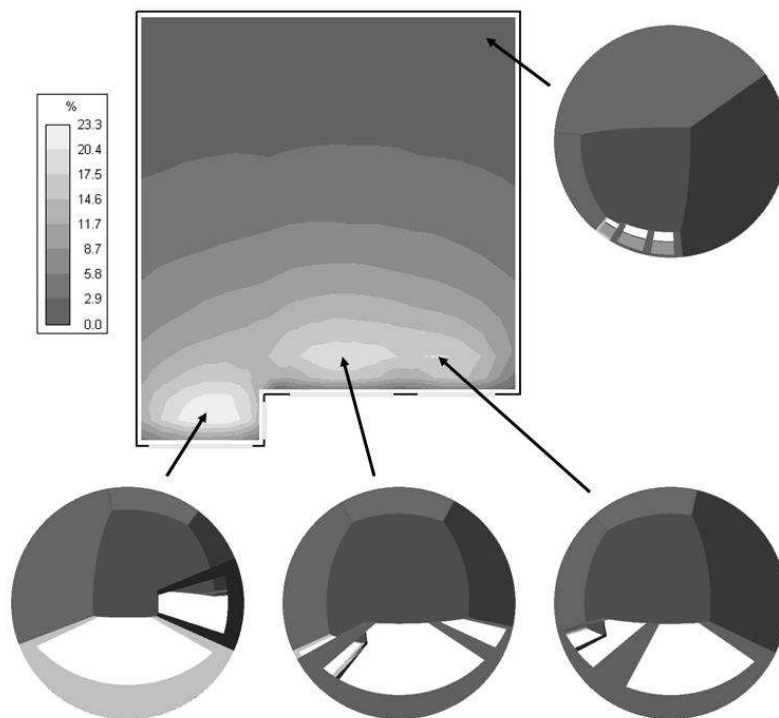
Est-il possible aujourd'hui de construire une théorie géométrique pour la thermique du bâtiment, comme cela a déjà été fait, par exemple, pour l'acoustique des salles ?

A notre avis, cette question n'a pas de sens, car une réponse négative serait inacceptable. L'importance centrale du facteur géométrique n'est-elle pas évidente dans les problèmes de radiation, de ventilation ou de distribution des inerties ? D'autre part, seule une théorie géométrique peut apporter une collaboration étroite au projet d'architecture : elle est donc nécessaire, et la question est plutôt de savoir comment faire, dans un domaine particulièrement difficile sous cet aspect.

Le programme « Heliodon » apporte, selon nous, quelques éléments de réponse et, surtout, un premier modèle pour ce qui devrait être fait. En effet, il ne s'agit pas seulement de parfaire un logiciel d'analyse thermique, calibré par des mesures soigneuses et capable de prendre en compte la géométrie dans son ensemble, mais aussi de prévoir dès à présent un outil interactif, rapide et limpide, qui aide à la conception architecturale sans rien cacher de ses limites ni de ses méthodes.

Car c'est dans le développement des projets et dans la formation des étudiants en architecture que tout se joue : c'est par ceux-ci et dans ce travail-là que se forme la qualité thermique des bâtiments, dans une liberté expressive et avec des contraintes formelles et sociales dont jamais les méthodes statistiques qui dominent aujourd'hui ne pourront rendre compte.

La question est posée, la parole est aux physiciens...



Références bibliographiques

ⁱ *Yumrutas R., Unsal M., Kanoglu M.*, “Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by Complex Finite Fourier Transform technique”. *Building and Environment* 40, 1117-1125 (2005).

ⁱⁱ *Arham H., Marincic I., Isalgué A.*, “Valoración de la respuesta térmica en edificios; el efecto dinámico de la piel (fachada principal)”. COTEDI 2005, México.

ⁱⁱⁱ *Clarke J.A.*, “Energy Simulation in Building Design”. Linacre House, Jordan Hill, Oxford (2nd Edition, 2001).

^{iv} *Arham H., Isalgué A.*, “L'effet de la condition de protection de l'enveloppe sur le type de réponse thermique interne”. 7^{ème} Congrès de Mécanique, Casablanca (2005).

^v *Beckers B.*, “Geometría sensible”. Thèse de doctorat, UPC, Barcelone (2005).

^{vi} *Beckers B., Serra Florensa R.*, “Hacia una acústica para la arquitectura”. Congreso Nacional Tecniacústica, Terrassa, España (2005).

^{vii} *Beckers B., Coch Roura H.*, “La acústica diseñada desde su expresión gráfica”. Congreso Nacional Tecniacústica, Terrassa, España (2005).