

# **Modélisation du rayonnement dans les projets architecturaux et urbains**

- Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches -

**Benoit Beckers**

Président du jury : Monsieur Gérard Hégon.

Jury : Messieurs Francis Allard (rapporteur), Jean-Louis Batoz, Olivier Blanpain (rapporteur), Robert Hausler (rapporteur), Serge Thibaut (rapporteur), Pierre Villon.

Université de Technologie de Compiègne  
Département de Génie des Systèmes Urbains  
Equipe de recherche Avenues – GSU  
Septembre 2011

## - Sommaire

### Introduction

#### I Recherche sur les outils de modélisation pour la conception

I.1	L'acoustique des salles	p.5
	<i>I.1.1 Quantités d'observation</i>	
	<i>I.1.2 Quantités de conception</i>	
	<i>I.1.3 Modélisation du rayonnement</i>	
I.2	Géométrie du rayonnement	P.11
	<i>I.2.1 Le lancer de rayons</i>	
	<i>I.2.2 Les projections sur la sphère</i>	
	<i>I.2.3 Les projections azimutales</i>	
I.3	L'architecture et la lumière	p.18
	<i>I.3.1 Les projections du ciel</i>	
	<i>I.3.2 La radiosité</i>	
	<i>I.3.3 L'accompagnement du projet</i>	

#### II Recherche théorique

II.1	La géométrie sensible	p. 41
II.2	Modélisation du regard	p. 46
II.3	Le projet d'architecture	p. 49

#### III Nouveaux développements

III.1	Physique et géométrie urbaine	p. 55
	<i>III.1.1 L'édifice environné</i>	
	<i>III.1.2 Le ciel et ses nuages</i>	
	<i>III.1.3 L'exploration par l'optimisation</i>	
III.2	Les échanges radiatifs	p. 61
	<i>III.2.1 L'articulation des recherches</i>	
	<i>III.2.2 L'articulation des échelles</i>	
	<i>III.2.3 Le rayonnement thermique</i>	
III.3	Typologie urbaine	p. 66
	<i>III.3.1 Smart or sustainable?</i>	
	<i>III.3.2 L'évolution des villes</i>	
	<i>III.3.3 Les logiciels</i>	

### Annexes

A.1	Curriculum Vitae détaillé	p. 70
A.2	Présentation du choix d'articles	p. 90

## Introduction

Dans l'alternance régulière de journées chaudes et de nuits froides que connaît le climat désertique, l'espace intérieur d'un bâtiment voûté est généralement plus frais que le même pourvu d'un toit plat, parce que la surface exposée au ciel est plus grande, ce qui augmente les échanges par rayonnement thermique. Cependant, le plafond voûté focalise les sons, qui s'y réfléchissent de manière presque parfaitement spéculaire. Dans le cas extrême d'un ellipsoïde de révolution, toute l'énergie sonore émise depuis l'un des foyers rejoint l'autre. De tels effets, parfois extraordinaires, ont fourni dès l'antiquité des anecdotes nombreuses : en Egypte, la statue chantante de Memnon, à Syracuse, l'oreille de Denys. Dans les palais khmers ou mayas, dans les salles capitulaires et dans les cathédrales du Moyen Âge européen, dès que l'on a voulu mettre de l'ordre dans l'architecture et dans l'urbain, par l'agencement de surfaces planes et quadriques bien dessinées, de tels effets imprévus et surprenants sont apparus : des échos, des focalisations, des résonances.

Le premier ouvrage synthétique d'architecture, et le seul que l'on connaisse jusqu'à la Renaissance, le traité de Vitruve<sup>1</sup>, contemporain d'Auguste, parle à la fois de l'ordre et des surprises. Au XV<sup>ème</sup> siècle, Leon Battista Alberti inaugure, à son exemple, le genre du traité d'architecture, qui connaîtra un développement ininterrompu jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle : Serlio, Pèlerin, de l'Orme, Dumont, Roubo, Patte, Saunders, Langhans. Dans ces traités, trop méconnus, se trouve exposé l'effort de recherche qui accompagne le développement de l'architecture européenne à l'ère moderne.

C'est d'abord les lois de la perspective centrale qui vont donner aux théâtres, puis aux palais, aux avenues et à la ville une allure nouvelle. Ce n'est plus seulement le plan en damier des romains – mais aussi de Xi'an et, à son exemple, de Kyoto –, essentiellement bidimensionnel, mais un lien mathématique enfin établi entre le plan horizontal et la verticalité. Désormais, le contrôle de l'espace tridimensionnel, et donc des volumes, sera une exigence constante dans la théorie et dans les écoles d'architecture.

*« Mon idée était qu'il y avait à Barcelone la possibilité de développer une vision réaliste de l'urbanisme, une vision plus intéressée par la structuration volumétrique de la ville que par le tracé de ses rues. C'est-à-dire, une vision d'architecte plutôt que d'urbaniste. Je pensais que la ville se construit avec de l'architecture, et pas avec des plans généraux ».*

Oriol Bohigas<sup>2</sup>

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, le développement de la forme perspective s'applique à la lumière : les ombrages, puis les dégradés, la différence entre le rayonnement parallèle du soleil et celui, divergent, des lampes. Dans l'architecture correspondante, l'ellipse et l'ellipsoïde prennent une place particulière (Le Bernin, Puget,...), en permettant une gradation variable de la circulation, de la vue et de la lumière. Au siècle suivant, les derniers traités, tout occupés de la salle d'opéra, chercheront entre le cercle et l'ellipse la forme qui conduise le mieux le son.

*« Pour la salle elliptique de la Cité de la musique, j'ai beaucoup travaillé avec Pierre Boulez. Et plusieurs fois, il m'a demandé : « Tu ne voudrais pas qu'elle soit rectangulaire ? ». Et je disais « non ». C'est elliptique. En fait, l'ellipse, c'est très mauvais acoustiquement, ça crée des foyers, c'est très risqué. Il n'y a pas de salles de concert elliptiques. Les focalisations du son y sont ce qu'il y a de pire. En plus, je voulais cette salle haute, d'une quinzaine de mètres, donc les plafonds n'étaient pas utilisables pour les premières réflexions du son. Dans une grande réunion, pour la dernière fois, Pierre Boulez me demande si j'accepte de revenir à un parallélépipède, et je lui dis : non, ce doit être elliptique. Alors là, il a répondu : « Je ne comprends pas la forme, mais je comprends la volonté de*

<sup>1</sup> « Les dix livres d'architecture », Vitruve, version française de Claude Perrault (1684), Pierre Mardaga, Liège, 1988.

<sup>2</sup> « La ciudad de los arquitectos », p. 30, Llätzer Moix, Anagrama, 1994.

*forme, c'est comme en musique, s'il n'y a pas de volonté de forme, on ne va vers rien. Donc maintenant allons-y, on suit l'ellipse ! »... Et avec Xu Ya Ying, l'acousticien, on a trouvé beaucoup d'autres moyens de rendre l'ellipse très bonne pour le son. »*

*Christian de Portzamparc<sup>3</sup>*

L'architecte d'aujourd'hui sait que l'ellipse est problématique, il s'efforce donc, avec l'aide d'un expert, d'en effacer les inconvénients acoustiques. Les auteurs des traités n'en étaient pas là. Ils recherchaient, avec les moyens et les connaissances de leur temps, la forme parfaite. Les progrès de l'optique géométrique, et quelques intuitions du même ordre sur l'acoustique, leur avaient montré que l'on pouvait contrôler la propagation des ondes par la forme des objets placés sur leur chemin. Leur échec à transposer de telles lois à l'échelle d'une grande salle de concert a signifié l'éclipse, pendant deux siècles, de la recherche liée à l'architecture.

Au XX<sup>ème</sup> siècle, les architectes n'ont plus guère parlé que par aphorismes : « La clef de l'architecture, c'est la proportion » (Le Corbusier) ; « Ma maison, ce n'est pas le mur, ce n'est pas le sol, ce n'est pas le toit, c'est le vide entre ces éléments, parce que c'est là que j'habite » (Lao Tseu, cité par Franck Lloyd Wright et par Christian de Portzamparc) ; « La sculpture modifie l'espace, l'architecture crée l'espace » (Louis Kahn),...

Ce que l'architecture peut, et devrait, contrôler, dans sa « volonté de forme », c'est le rayonnement acoustique, thermique et lumineux. Tout le reste est soit secondaire (les matériaux, à considérer selon leurs propriétés acoustiques, thermiques et optiques, comme des pondérations de la forme), soit trop local (la conduction), soit ingouvernable (le vent, l'humidité), et peut être traité de manière qualitative. Mais le rayonnement, c'est l'essence même de l'architecture, en ce qu'il offre une ***condition nécessaire et suffisante pour définir la forme tridimensionnelle qui convienne le mieux à un usage donné.***

---

<sup>3</sup> « Voir Écrire », p.87, Christian de Portzamparc et Philippe Sollers, éditions Calman-Lévy, 2003.

# I Recherche sur les outils de modélisation pour la conception

## I.1 L'acoustique des salles

### I.1.1 Quantités d'observation

La première quantité définie pour décrire globalement l'acoustique d'une salle, formulée par Wallace Clement Sabine à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle<sup>4</sup>, est le **Temps de Réverbération**, le temps pour que le niveau sonore, une fois l'émission interrompue, décroisse de 60 décibels. Cette quantité peut être comparée, dans le domaine de l'illumination naturelle, au **Facteur de Lumière du Jour** (le rapport, exprimé en pourcents, de l'éclairement intérieur reçu en un point du plan de référence à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé) et, dans le domaine du climat urbain, à l'**Ilot de Chaleur Urbain** (la différence entre les températures de l'air au centre-ville et dans la campagne environnante).

Ces trois quantités ont en commun d'être fidèles à des impressions fortes ressenties dans des situations architecturales ou urbaines. Dans une salle, la réverbération est certainement ce que l'on perçoit d'emblée, en l'absence de défauts acoustiques marqués. Le facteur de lumière du jour, inventé lui aussi il y a cent ans, reflète bien notre perception relative des intensités lumineuses. Quant à l'ilot de chaleur urbain, il avait déjà été décrit, à Londres et à Paris, il y a près de deux siècles.

Ces trois quantités sont également faciles à mesurer. Ce sont donc ce que nous appellerons des **quantités d'observation**. Une première caractéristique de cette famille, c'est qu'il est facile d'en définir d'autres, toutes proches, tout aussi pertinentes, mais peu ou pas corrélées avec les premières. Ainsi, la réverbération peut être définie sur une décroissance de 40 ou 30 dB, voire de 10 dB (*Early Decay Time*), mais on parle aussi d'intelligibilité, de clarté (*Clarity*, la proportion des réflexions arrivant dans les 50 ou 80 millisecondes après le son direct, respectivement pour la parole ou la musique),... Quant à l'ilot de chaleur urbain, sa définition même est fluctuante, selon les auteurs.

Pour chacune de ces quantités, des formules ont été proposées (Sabine lui-même pour le temps de réverbération, Oke pour l'ilot de chaleur urbain,...). Dans la formule de Sabine, le temps de réverbération est directement proportionnel au volume et inversement proportionnel à la somme des surfaces de l'enceinte pondérées par leur absorption. La variante d'Eyring<sup>5</sup> repose, elle, sur la notion de libre parcours moyen. Dans les dizaines de formules alternatives qui ont été proposées depuis, la géométrie est toujours – forcément – perdue. Toutes ces formules relèvent d'une **théorie statistique** de l'acoustique, de l'illumination ou de la thermique. Elles sont toujours le résultat d'une droite de régression que l'on fait passer au plus près de points mesurés. On parle aussi de **méthodes à zéro dimension**, pour signifier que la géométrie est évacuée. En effet, le volume, le libre parcours moyen ou les rapports d'aspect sont bien des paramètres liés à la géométrie, mais ils sont abstraits de l'espace. Ou encore : l'espace de ces paramètres n'est plus 3D, ni 2D, ni même 1D, c'est un **espace 0D**.

Or, les mesures ont beaucoup progressé depuis l'époque où ces premières quantités ont été proposées. Elles relèvent, quant à elles, de la **théorie du signal**. Il y a toujours un signal émis en un point et reçu en un autre point. La manière dont la scène modifie le signal devient une boîte noire, décrite par la fonction de transfert. Cette fonction dépend de la position des deux points et de l'ensemble des obstacles de la scène où les ondes sont réfléchies, absorbées, éventuellement réémises, diffractées, réfractées, sans oublier la participation du milieu (diffusion, absorption, interférences). Si l'on déplace l'un des deux points, la fonction de transfert se modifie, mais la théorie du signal ne peut presque rien en dire, car la géométrie lui est inconnue.

<sup>4</sup> « Collected Papers on Acoustics », W. C. Sabine (1921). Los Altos, Peninsula Publishing, 1993.

<sup>5</sup> « Reverberation time in "dead" rooms », C. F. Eyring, Journal of the Acoustical Society of America, pp. 217-241, 1930.

Dans un premier temps, il est utile de valider les formules statistiques par des mesures, nécessaires pour les calibrer. Mais très vite, on ne peut plus rien dire, parce que la théorie statistique a elle aussi évacué l'espace. Après que les pionniers ont donné une approximation acceptable à zéro dimension (Sabine, Angström, Oke,...), vient toute une production un peu vaine. Un simple exemple résume tout le problème.

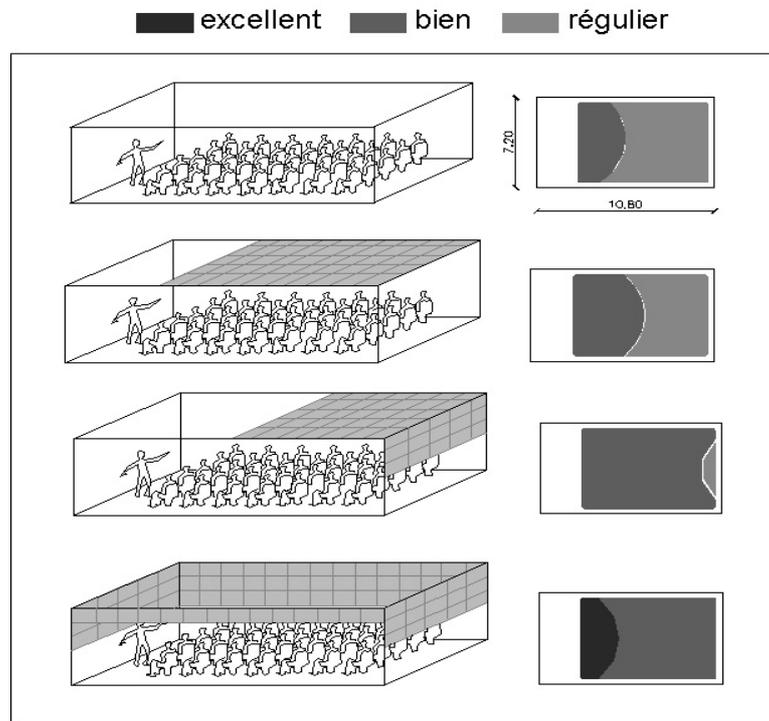


Figure 1 : Contrôle de l'intelligibilité par différentes dispositions d'une même quantité de matériau absorbant

Dans la figure 1 (d'après une étude du CSTB<sup>6</sup>), on mesure l'intelligibilité dans une salle de cours, avant et après intervention. Celle-ci consiste à disposer une même quantité de matériau absorbant, mais dans trois configurations différentes. Le résultat varie considérablement ; l'intervention est presque inutile dans le premier cas, et très satisfaisante dans le dernier. On comprend que le son réfléchi sur le plafond est ensuite presque entièrement absorbé par le public, alors que les réflexions sur les murs peuvent se poursuivre indéfiniment, alimentant ainsi une réverbération qui nuit beaucoup à l'intelligibilité. La formule de Sabine, évidemment, donne la même valeur pour la réverbération dans les trois cas...

Cet exemple montre qu'un simple raisonnement géométrique, même qualitatif, est beaucoup plus utile qu'une formule statistique, lorsqu'il s'agit de prendre des décisions dans un projet. Bien sûr, le raisonnement ne donne pas la quantité d'absorbant à placer. La formule, oui, mais avec une précision inconnue, si l'on s'éloigne un tant soit peu des configurations pour lesquelles elle a été calibrée.

En acoustique, les maquettes réelles sont très coûteuses, car il faut tout mettre à échelle, y-compris la source (des ultra-sons) et les propriétés des matériaux. Pour progresser, il est donc nécessaire de pouvoir simuler le champ sonore dans une maquette tridimensionnelle virtuelle. Pour le calcul, on devrait partir de l'équation de Helmholtz (acoustique linéaire). C'est une équation hyperbolique, et les méthodes numériques de type éléments finis sont encore inapplicables à l'échelle d'un bâtiment. La *théorie ondulatoire* de l'acoustique donne seulement quelques solutions analytiques pour des géométries très simples, et une description locale ou

<sup>6</sup> « L'acoustique du bâtiment par l'exemple », M. Meisser, ed. Le Moniteur, Paris, 1994; « Réussir l'acoustique d'un bâtiment », L. Hamayon, ed. Le Moniteur, Paris, 1996.

qualitative des phénomènes qui en relèvent exclusivement (les ondes stationnaires, les interférences, la diffraction).

La *théorie géométrique* est, de loin, la plus ancienne de toutes. Euclide avait déjà imaginé des rayons visuels. Au XVII<sup>ème</sup> siècle, Athanasius Kircher dessinait des rayons sonores et lumineux<sup>7</sup>. Dès les années 1970, de nombreux logiciels ont été développés. Si la réflexion est principalement spéculaire, ce qui est généralement le cas en acoustique des salles, les méthodes de lancer de rayon, mais aussi des images, donnent de bons résultats.

Elles permettent de déterminer rapidement la contribution directe et les premières réflexions entre deux points, c'est-à-dire, le début de la réponse impulsionnelle, ou échogramme (en régime temporel), et donc de la fonction de transfert (en régime fréquentiel). Il est en revanche très difficile d'évaluer la fin de l'échogramme (notamment à cause du temps de calcul), et donc la réverbération.

On arrive ainsi à deux premières conclusions :

- S'il n'est pas possible d'unifier les quatre théories de l'acoustique des salles – *ondulatoire, statistique, géométrique* et *du signal* –, les deux dernières se combinent particulièrement bien, et offrent, dans un premier temps, les meilleures méthodes pour l'analyse et l'aide à la conception.

- Les quantités d'observation sont faciles à comprendre et à mesurer, mais il est très difficile de les évaluer par simulation, et ce ne sont pas de bons candidats pour l'aide à la conception, c'est-à-dire, l'accompagnement du projet d'architecture.

Ces conclusions s'appliquent à l'ensemble des domaines du rayonnement.

### ***1.1.2 Quantités de conception***

Ces vingt dernières années, la modélisation du rayonnement a donné ses meilleurs résultats dans le domaine du rendu réaliste. Avec des méthodes géométriques telles que le lancer de rayon, la radiosité et diverses solutions hybrides, le rendu permet de construire une image visuellement réaliste à partir d'une scène virtuelle illuminée<sup>8</sup>. L'avantage est que l'on sait ce que l'on veut obtenir : un certain degré de « photoréalisme » plus ou moins stylisé. C'est l'œil finalement qui décide si le marbre ressemble bien à du marbre, et si le métal apparaît bien chromé. Très présentes dans les bureaux d'architecture, les techniques de rendu ne servent cependant guère au développement du projet, mais plutôt à sa présentation finale à des tiers.

Il en va autrement dans la modélisation des champs sonores, lumineux ou thermiques. Il y est beaucoup plus ardu de savoir ce qu'il faut calculer. Les quantités habituelles sont mal évaluées, et leur calcul est toujours long. De plus, il faut d'emblée répondre à des questions très précises qui n'ont pas leur place en début de projet. Si au moins ces simulations permettaient, à la fin, de valider une idée, de permettre quelques itérations, ce serait déjà très utile, mais c'est rarement le cas. En fait, le problème commence avec la définition d'un ensemble complet et cohérent de quantités pour qualifier les différentes dimensions du champ et de sa perception : le temps, l'espace, l'intensité et la fréquence. Problème sans doute impossible à résoudre...

Dans la pratique du projet, l'acousticien commence par quelques calculs utilisant la formule de Sabine, ou l'une de ses variantes, ou encore, directement, des relations établies empiriquement entre, par exemple, la surface de l'audience et le volume de la salle. Combien de mètres cubes faut-il par spectateur ? En analysant des salles en éventail réputées sonner bien, on arrive à des valeurs qui peuvent n'avoir plus guère de sens pour des salles rectangulaires. On ne s'en sort pas non plus. Or, il y a un autre travail, beaucoup plus précis : placer des réflecteurs et les orienter, comme des miroirs pour la lumière, afin de renforcer le champ sonore dans la partie de la salle la plus éloignée de la scène. On peut faire ce travail à la main, il y a des méthodes

---

<sup>7</sup> « Athanasius Kircher, Un homme de la Renaissance à la recherche du savoir perdu », Joscelyn Godwin, éd. Jean-Jacques Pauvert, 1980.

<sup>8</sup> « Digital Modeling of Material Appearance », Julie Dorsey, Holly Rushmeier & François Sillion, Morgan Kaufmann, 2008.

graphiques de construction, et les livres d'acoustique des salles sont illustrés de vues en plan et de sections où les réflexions sur les surfaces réfléchissantes sont représentées au moyen de rayons fléchés. Mais ces flèches ne montrent pas que l'intensité diminue avec le carré de la distance, et que le son est perçu en décibels, qu'une contribution égale au son direct ne lui ajoute que 3 dB, et les suivantes encore moins, c'est-à-dire : que le champ sonore, comme tout phénomène faisant l'objet d'une perception, ne se construit pas de manière simplement additive, et que pour y obtenir une modification sensible, il faut accumuler exponentiellement les ressources.

Le logiciel Radit2D a été développé à partir de ces pratiques. La coupe d'une salle (en plan ou en section) y est représentée par un polygone fermé, que l'on peut déformer à loisir, en voyant directement comment les premières réflexions se déplacent et s'ajoutent les unes aux autres en décibels. La source peut être déplacée, les résultats apparaissent sur une carte en dB ou, pour un microphone ponctuel, sur un diagramme polaire, qui permet de contrôler les quantités caractérisant chaque réflexion (son retard, son niveau sonore et son angle d'arrivée par rapport au son direct). Par exemple, pour une situation initiale donnée, on retrouve en quelques secondes la forme idéale d'un plafond acoustique. On y reconnaît sans peine la forme « ovoïde » de bien des salles actuelles. La courbe directrice n'est pas une ellipse – qui focaliserait toute l'énergie en un point –, mais une courbe à peine plus complexe, qui a la propriété de répartir les réflexions dans une zone déterminée de manière uniforme (au sens de la perception, c'est-à-dire en niveau sonore) : la spirale logarithmique. Cette courbe avait été utilisée dans les années 1920, mais dans un autre domaine du rayonnement, par Poul Henningsen<sup>9</sup>, fabriquant des fameuses lampes PH, dont le triple luminaire de révolution a pour directrices trois morceaux de spirales logarithmiques...

Le logiciel utilise la méthode des images. Celles produites par une courbe discrétisée recomposent l'orthotomique de la courbe. Ainsi, lorsque la source se trouve au foyer d'une ellipse, l'orthotomique est un cercle ; si on la déplace, on obtient le « limaçon de Pascal », décrit au XVII<sup>ème</sup> siècle par le père de Blaise Pascal. Plus l'orthotomique s'approche d'une forme circulaire, plus la focalisation est importante. On se trouve ainsi amené à étudier une forme par sa courbe accompagnatrice...

Le programme se limite donc à décrire une source et un microphone (théorie du signal) placés dans une enceinte, et la première réflexion par la méthode des images (théorie géométrique) : il est la plus simple réalisation de cette combinaison fertile des deux théories qui a été évoquée plus haut. Les quantités sur lesquelles on peut optimiser la forme sont : le retard de chaque première réflexion (qui devrait être maintenu en-dessous de 50 ms pour la parole et de 80 ms pour la musique), l'angle d'arrivée (dans une coupe horizontale, on peut ainsi chercher à maximiser la fraction d'énergie latérale, et donc la spatialisation du son), l'uniformité de la répartition du niveau sonore induit par les premières réflexions.

Ce sont là des quantités qui forment un ensemble incomplet (la réverbération, par exemple, ne peut pas être estimée), mais cohérent, en relation directe avec les décisions formelles du projet. C'est ce que nous appellerons, par opposition aux quantités d'observation évoqués plus haut, des **quantités de conception**.

Le logiciel Radit2D a permis à de nombreux étudiants d'architecture de prendre un premier contact avec l'acoustique des salles beaucoup plus rigoureux et productif que ce qui est d'ordinaire disponible, et surtout de mettre directement en rapport ces nouvelles interrogations avec leur pratique habituelle du projet. Dans le domaine de l'acoustique des salles, il reste, à ma connaissance, le seul outil d'aide à la conception.

---

<sup>9</sup> « Luminosidad lógica », Steen Jørgensen, Edicions UPC, Barcelone, 2000; « Light years ahead – The story of the PH lamp », Louis Poulsen, ed. Tina Jørstian & Poul Erik Munk Nielsen, Danemark, 1994.

### ***1.1.3 Modélisation du rayonnement***

La véritable difficulté de l'acoustique des salles de concert est dans ses enjeux, qui sont d'ordre intellectuel, comme tout ce qui a trait à l'architecture et à sa perception. Quelques seuils d'ordre physiologique peuvent être précisés dans les différentes dimensions du champ acoustique : la perception des intensités et des fréquences, de l'espace et du temps est régie par quelques propriétés identifiables de l'oreille humaine. Au-delà, notre perception dépend de notre éducation, de nos goûts et de l'ensemble de notre expérience de la musique et de ses représentations.

Identifier un quantité d'observation qui synthétise l'ensemble du problème, lui désigner une valeur idéale, ou une fourchette délimitant une zone de confort, puis atteindre cette zone en optimisant des paramètres simples abstraits de la géométrie (la surface totale d'absorbant par rapport au volume pour la réverbération, et de même le taux de fenêtrage pour le facteur de lumière du jour ou l'albédo de la ville pour l'îlot de chaleur urbain), en bref, penser de manière exclusivement réglementaire, peut devenir un étouffoir de la recherche et du projet.

Pour se dégager enfin de cette interminable ornière, la simulation numérique du rayonnement offre aujourd'hui de réelles possibilités, du moment que le problème étudié soit bien modélisé. On a besoin d'un modèle géométrique, d'un modèle physique, d'un modèle perceptif et aussi d'un modèle typologique. L'acoustique des salles présente une des rares applications abouties de cette quadruple modélisation.

#### ***- Un modèle géométrique***

La première condition du succès, c'est de ne plus se résoudre aux méthodes à zéro dimension. Il est nécessaire de prendre en compte la géométrie, et de trouver le niveau de détail qui corresponde le mieux au problème étudié. Ici, on peut d'abord remarquer que l'essentiel des bâtiments construits se réduit à l'union et à l'intersection de surfaces quadriques (plans, cylindres, sphères, et, beaucoup moins souvent, ellipsoïdes, voire paraboloides hyperboliques). Or, s'agissant de réflexion spéculaire, il est aussi facile de calculer celle-ci sur une quadrique que sur un plan : il n'est donc pas nécessaire de discrétiser les surfaces courbes, ce qui offre le triple avantage de simplifier la construction, d'avoir à manipuler un modèle beaucoup plus léger et d'éviter les artefacts dus à la discrétisation dans la représentation finale du champ acoustique. Quant au niveau de détail, il dépend de la fréquence étudiée ; seules les surfaces dont la plus petite dimension est deux ou trois fois supérieure à la longueur d'onde réfléchissent de manière principalement spéculaire.

#### ***- Un modèle physique***

Il convient d'identifier les composantes du rayonnement, de manière à mettre en évidence différentes interactions avec la géométrie, selon la longueur d'onde, l'ordre des réflexions, le retard, la direction... Dans la théorie du signal, l'information est entièrement contenue dans la réponse impulsionnelle (voire dans deux échogrammes, un par oreille). En déduire des quantités n'est pas évident, car la sensibilité de la quantité choisie dépendra des limites d'intégration, toujours discutables. On peut préférer maintenir l'information dans des représentations graphiques synthétiques, toujours plus riches que les quantités. Toujours dans cette théorie, on peut reprendre l'idée d'une *signature*. De même que les raies d'émission du fer ou du nickel donnent une signature différente, qui permet de repérer ces éléments dans le rayonnement des étoiles lointaines, est-il possible d'identifier une signature acoustique propre à chaque forme de salle ? La réponse ne peut pas se trouver seulement dans le modèle physique.

#### ***- Un modèle perceptif***

En effet, la perception humaine d'un phénomène n'est pas une donnée immédiate. Nous construisons peu à peu nos propres modèles de perception. Nous ne nous limitons pas à voir,

nous regardons, et notre regard est toujours un modèle, de même que notre écoute. Cela se comprendra mieux sur un exemple. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, les architectes prisait encore les salles en fer à cheval, puis en éventail, toutes redevables formellement au théâtre antique. Par ailleurs, quelques grandes salles fonctionnelles, rectangulaires (des « boîtes à chaussures » selon l'expression des acousticiens) étaient apparues, pour la danse de salon (à l'époque, la valse). Or, lorsque l'on s'avisait de donner des concerts dans ces salles, à Berlin et à Vienne, on découvrit que leur acoustique était de loin supérieure à celle des salles traditionnelles. Il fallut beaucoup de temps pour en découvrir la raison, qui n'était ni dans les visuelles (très mauvaises), ni dans le temps de réverbération (comparable à celui de certaines salles d'opéra jugées, cependant, acoustiquement inférieures). C'est finalement dans les années 1970 que des acousticiens ont identifié un besoin de premières réflexions très latérales par rapport au son direct, qui n'existent pas dans les salles en éventail, et bien dans les salles rectangulaires et hexagonales, où elles produisent une sensation d'enveloppement, de spatialité. Or, les tests conduits par la suite en laboratoire semblent montrer que les habitués des concerts y sont très sensibles, alors que les personnes qui écoutent de la musique chez elles le sont beaucoup moins.

#### - *Un modèle typologique*

La question pourrait se poser ainsi : existe-t-il une signature correspondant à la manière dont une cathédrale gothique reçoit la lumière du jour, et qui distingue clairement celle-ci d'une cathédrale romane ? Comme on le verra plus loin, la réponse est probablement positive, parce que l'un des objectifs déclarés des constructeurs gothiques était, justement, de faire entrer plus de lumière dans les nefs du nouveau style. Mais, y a-t-il une signature acoustique qui distingue également le gothique du roman ? La réponse est probablement négative. Le « roman » et le « gothique » forment une distinction pertinente pour répondre à certaines questions, mais pas pour d'autres. De plus, ce sont des catégories historiques très précises : non seulement, il n'y avait pas de cathédrales gothiques au XI<sup>ème</sup> siècle, mais il ne pouvait pas y en avoir.

En acoustique des salles, on peut d'abord distinguer toutes les salles pensées selon la jauge, c'est-à-dire réunir le plus grand nombre le plus près possible de la scène. Dans ce « modèle circulaire », on trouve le théâtre gréco-romain, le théâtre d'opéra à l'italienne, les auditoriums en éventail (*fan-shaped concert halls*),... Des contraintes acoustiques, mais aussi visuelles (le décor d'opéra en perspective) et constructives expliquent en partie l'évolution du modèle, avec l'imitation (le prestige de l'antiquité). C'est à un tout autre modèle qu'appartient la « boîte à chaussures » (*shoe-box concert halls*). La musique polyphonique est née dans les cathédrales et les églises, qui forment le « modèle réverbérant ». Toutes les salles où l'on a joué de la musique en Europe se retrouvent inmanquablement dans l'un ou l'autre de ces trois modèles. Ceux-ci correspondent partiellement à des types historiques, mais ils sont d'abord en lien direct avec l'acoustique, dont ils héritent de qualités propres. Ainsi, dans le modèle circulaire, les parois latérales sont inexistantes, ou du moins très éloignées de la majeure partie du public, qui ne reçoit des réflexions que du plafond, et éventuellement du sol (l'*orchestra* du théâtre antique). Les salles de ce modèle manquent donc toujours de réflexions latérales. L'intuition de Lothar Cremer a été de combiner ce modèle avec le modèle rectangulaire, en imaginant des terrasses dans une salle enveloppant entièrement la scène. Le résultat remarquable obtenu pour la Philharmonie de Berlin a donné lieu à des recherches géométriques dont on voit le résultat dans toutes les grandes salles contemporaines, que l'architecte soit Hans Scharoun (Berlin, 1956), Franck Gehry (Los Angeles, 2003) ou Jean Nouvel (Copenhague, 2009). L'optimisation simultanée de la jauge et de la qualité sonore a été rendue possible par l'emboîtement de deux modèles typologiques au moyen du terrassement des gradins.

## I.2 Géométrie du rayonnement

### I.2.1 Le lancer de rayons

Dans les techniques de lancer de rayon, les tirs sont effectués depuis les sources (les lampes pour le rendu réaliste) ou depuis les récepteurs (l'œil ou la caméra). Ce n'est pas seulement un choix algorithmique : les sources et les rayons lumineux appartiennent au modèle physique, tandis que les récepteurs et les rayons visuels appartiennent au modèle perceptif. Tout ce qui s'interpose – les objets formant la scène, leurs propriétés optiques et, éventuellement, le milieu participatif – appartient au modèle géométrique.

Dans le premier modèle du rayonnement connu<sup>10</sup>, l'optique euclidienne, il n'y a pas de tableau, et la scène est réduite à des objets très simples. Euclide ne connaissait pas non plus la trigonométrie, et il n'a pas indiqué comment les rayons partaient de l'œil, s'il s'agissait d'un tir déterministe ou aléatoire. Son traité est une pure théorie du regard, lequel est modélisé comme un balayage incessant de la scène, avec une intuition de ce que nous appelons la persistance rétinienne.

À la Renaissance, Brunelleschi et Alberti y ont ajouté le tableau plan. Ils ont compris aussi que l'absence de tableau était équivalente à un tableau sphérique. C'est ainsi qu'ils distinguaient la « perspective naturelle » d'Euclide de la leur, la « perspective artificielle ». Cependant, ils assimilèrent le rayonnement à l'objet particulier de leur recherche – ils étaient des architectes, suivis par des sculpteurs et des peintres – : la *perspective*, qui prit avec eux le sens nouveau d'une **suggestion de la troisième dimension dans un tableau plan**.

Dans la description physique du rayonnement, on distingue les idéalizations de fronts d'ondes sphériques (l'émission est le fait d'une sphère pulsante, assimilable à un point), cylindriques (par exemple, le bruit d'un train ou d'une suite de voitures sur un tronçon de route droit) et planes (par exemple, le rayonnement du soleil perçu à l'échelle humaine). De même, on devrait parler de projection centrale, axiale ou parallèle selon que les rayons tirés le sont depuis un point, une droite ou un plan.

Pour l'étude du rayonnement solaire, il est utile de pouvoir projeter la voûte céleste (une demi-sphère). Or, depuis l'école d'Alexandrie, ce sont les applications cartographiques qui ont le mieux exploré les différentes projections centrales, planes et axiales de la sphère (pour eux : le globe terrestre) sur un tableau plan ou sphérique – la projection stéréographique de Ptolémée, puis celles de Postel, Mercator, Lambert ou Aitoff – et leurs propriétés singulières : l'équidistance, l'équivalence (respect des surfaces) et la conformité (respect des angles). C'est donc en cartographie<sup>11</sup> que nous trouverons une nomenclature précise et complète des projections de la sphère<sup>12</sup>.

### 1.2.2 Les projections sur la sphère

Pour représenter tout l'espace sur un récepteur fini, on a, en principe, le choix entre la projection centrale sur un récepteur sphérique et la projection parallèle sur un récepteur plan. Dans cette dernière, les rayons ont tous la même direction, et la zone examinée est située à l'intérieur d'une surface cylindrique parallèle à cette direction. Pour examiner tout l'espace, le récepteur devrait être infini. Dans la représentation en un point (projection centrale), les rayons de projection sont convergents et, par conséquent, ils peuvent balayer tout l'espace qui entoure le point.

La projection sur la sphère contient donc toute l'information sur l'environnement du point, mais cette information n'est pas facile à utiliser. Certains ont surmonté cette difficulté en

---

<sup>10</sup> « Geometría sensible », Benoit Beckers, Thèse de Doctorat, Université Polytechnique de Catalogne, 2005.

<sup>11</sup> « Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections », J. Snyder, University of Chicago Press, 1993.

<sup>12</sup> « Communication graphique », Pierre Beckers, Editions de l'Université de Liège, 2003.

remplaçant la sphère par un cube<sup>13</sup> qui est aussi un objet géométrique convexe, en principe plus facile à manipuler.

En se limitant au demi-espace visible depuis un point posé sur une surface, on a donc une méthode basée sur l'hémisphère ou sur l'hémicube. Dans le second cas, la représentation sur le plan est triviale. Dans le premier cas, on obtient une représentation plane en effectuant une seconde projection. C'est le problème qu'ont dû résoudre les cartographes pour la représentation de la « sphère » terrestre.

Comme la sphère n'est pas réductible sans déformation à un plan, toutes les solutions proposées font apparaître des distorsions ou des limitations plus ou moins gênantes selon l'application envisagée.

En ce qui concerne les limitations, nous savons que certaines des solutions ne permettent pas de représenter la sphère complète : la projection gnomonique est limitée à une calotte sphérique d'ouverture inférieure à la demi-sphère, la projection stéréographique ne permet pas de représenter la sphère complète et celle de Mercator ne permet pas de représenter les « pôles ».

En pratique, dans la plupart des applications qui nous concernent, la possibilité de représenter une demi-sphère est suffisante. La limitation de la projection stéréographique n'est donc plus un problème.

Comme toutes ces projections partent du même objet hémisphérique, elles permettent toutes de conserver la même information et on peut passer de l'une à l'autre au moyen de transformations géométriques plus ou moins complexes.

On pourrait donc imaginer qu'on se limite à une seule d'entre elles. Dans ce cas cependant, certaines opérations telles que la détermination de plus courtes distances, le calcul des angles solides ou des aires vont se révéler plus ou moins complexes à réaliser et donner des images tellement déformées de certaines propriétés qu'elles en perdent tout intérêt. Il s'avère également que le fait d'utiliser une projection plutôt qu'un autre accélère ou ralentit significativement les calculs à effectuer pour évaluer certaines grandeurs.

Comme dans les problèmes cartographiques, on est donc amené à utiliser plusieurs de ces représentations en s'appuyant sur leurs propriétés pour optimiser les opérations à effectuer.

Les propriétés qui nous intéressent sont le respect des angles (conformité), le respect des aires (équivalence), la simplicité de l'expression de certaines lignes (droites de l'espace, cercles de la sphère, etc.), le respect du facteur de vue, la non distorsion du temps, la capacité à limiter la déformation des motifs de la sphère. L'exemple de la cartographie nous enseigne qu'il existe un très grand nombre de possibilités plus ou moins intéressantes.

L'objet que nous avons à traiter est la sphère ou l'hémisphère. Cela oblige à surmonter deux difficultés importantes. La première, qui vient d'être évoquée, est celle de sa représentation dans le plan et la seconde est celle de son quadrillage : comment créer sur la sphère un nombre imposé de cellules de mêmes tailles et si possible de mêmes formes ? Ce problème concerne en particulier toutes les applications qui nécessitent de scanner le ciel et également celles où il est souhaitable d'optimiser les tirs de rayons dans les méthodes de Monte Carlo.

En se basant sur les méthodes présentées ci-dessous, en particulier en ce qui concerne les projections azimutales, le problème du quadrillage de la sphère peut être résolu en quadrillant un cercle lié à la sphère par une de ces projections. L'optimisation de ce quadrillage peut être réalisée en contrôlant l'aspect des carreaux, soit sur la sphère, soit sur sa projection.

---

<sup>13</sup> « The hemicube: A radiosity solution for complex environments », M. Cohen & D. Greenberg, SIGGRAPH'85, Volume 19, pp. 31-40, Number 3 (1985).

### 1.2.3 Les projections azimutales

On suppose que les projections sont réalisées sur un plan tangent à la sphère. Si elles sont effectuées sur un plan quelconque, on peut toujours déplacer ce plan parallèlement à lui-même pour le rendre tangent à la sphère, ce qui n'affecte que l'échelle de l'épure.

Au point de contact entre le plan de projection et la sphère, appelé *point principal de l'épure*, les tangentes à toute courbe inscrite sur la sphère sont représentées sans distorsion. En particulier, les directions géographiques ou azimuts, indiquant les orientations par rapport à un point de référence de la sphère (par exemple le pôle nord), sont représentées correctement au point principal de l'épure. Une autre conséquence de cette propriété est que les orthodromies ou géodésiques (lignes de plus courte distance) issues du point principal sont toujours des lignes droites. En effet, ce sont des grands cercles qui passent par ce point et par le centre de projection, qu'il soit situé à distance finie ou infinie et qu'il soit réel ou qu'il soit virtuel, comme dans le cas des projections de Postel ou de Lambert.

#### *Projection orthogonale*

Une image plane de la sphère est obtenue directement par projection parallèle sur le plan. En considérant que nous entourons la sphère d'un cylindre, la projection de sa silhouette est un cercle quand le plan de projection est perpendiculaire à l'axe du cylindre. C'est une ellipse si le plan est oblique. Elle correspond à l'ombre portée par la sphère sur ce plan.

La configuration la plus courante est la projection orthogonale. En effet, la projection oblique offre peu d'intérêt dans le cas de la sphère et ne diffère de la précédente que par un changement d'échelle effectué selon la projection sur le plan de la direction de projection.

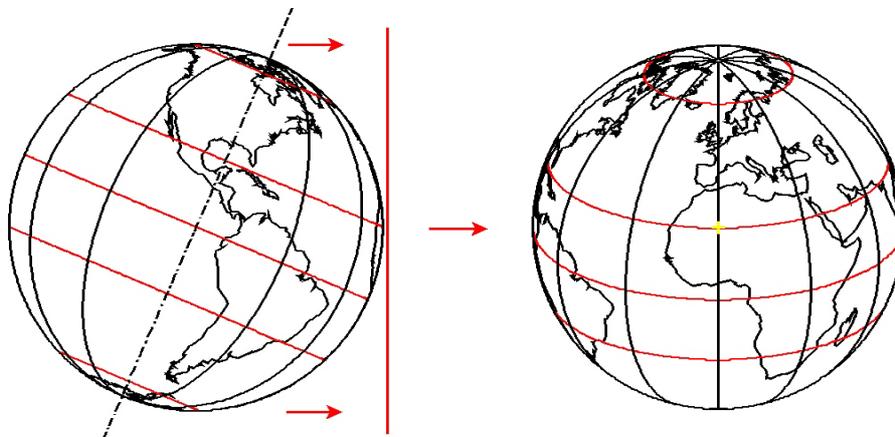


Figure 2 : Projection orthogonale

Ce type de projection s'applique bien au cas de l'hémisphère, mais son inconvénient est d'introduire une forte distorsion dans les zones proches de la base de l'hémisphère. Cependant, l'intérêt principal de cette projection est sa capacité à visualiser sans distorsion les facteurs de vue des éléments qui ont été projetés sur l'hémisphère. C'est l'analogie bien connue de Nusselt<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> « Détermination graphique du rapport d'angle pour le rayonnement thermique », Wilhelm Nusselt, in B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, *Commentaires sur l'analogie de Nusselt*, Rapport Helio\_004\_fr, [www.heliodon.net](http://www.heliodon.net), 2009.

### *Projections centrales*

Une sphère définit deux lieux géométriques particuliers : son centre et sa surface. On peut y placer le centre de projection, déterminant ainsi les deux projections centrales particulières qui sont décrites dans les paragraphes suivants.

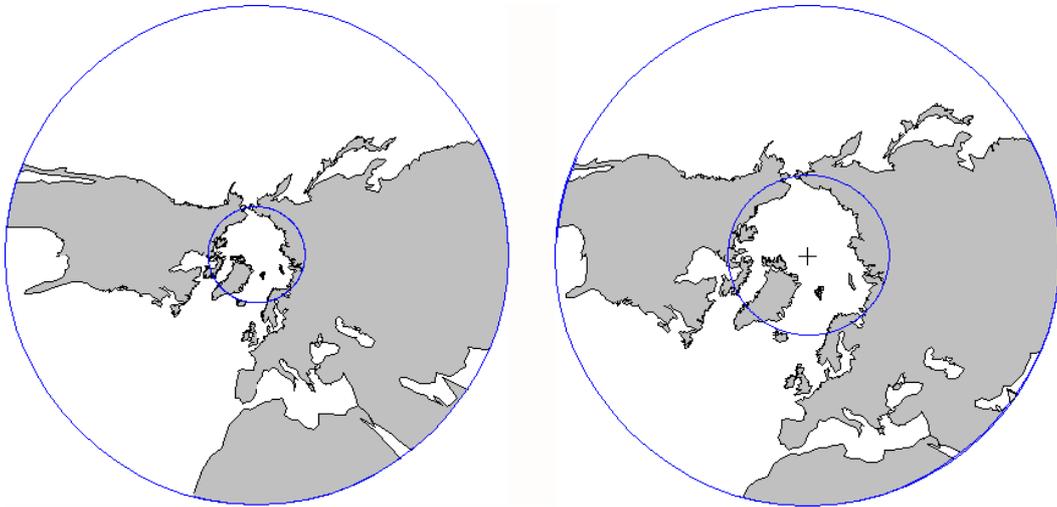


Figure 3 : Projections gnomonique (à gauche) et stéréographique (à droite).  
Hémisphère nord limité au tropique du Cancer

1. *Projection gnomonique* : Examinons tout d'abord la situation où le centre de projection n'est ni sur la sphère, ni en son centre. S'il est situé à l'extérieur, la sphère peut être entourée d'un cône qui matérialise l'angle solide selon lequel elle est vue. Ce cône est droit et son axe passe par le centre de la sphère. C'est l'intersection de ce cône et du tableau qui matérialise la silhouette ou "l'ombre portée de la sphère". Si le tableau est perpendiculaire à l'axe du cône, c'est un cercle, sinon c'est une conique dont le type est défini par son orientation.

Le premier cas particulier intéressant est celui où le centre de projection est au centre de la sphère (Figure 3, gauche). Tout grand cercle se projette selon une droite. Tout autre cercle se projette selon une conique, mais la projection d'un cercle parallèle au plan de projection reste un cercle. Si le plan de projection est parallèle à l'équateur, les parallèles se projettent selon des cercles concentriques. Les projections des méridiens et des parallèles sont des lignes orthogonales. La projection de ces lignes est conforme, c'est-à-dire que les images de ces lignes orthogonales sur la sphère sont aussi orthogonales.

Dans cette projection l'orthodromie ou géodésique, qui est un arc de grand cercle de la sphère, se représente par une ligne droite. Cependant, la distance ne peut être mesurée directement sur la ligne, à cause de la distorsion. Enfin, l'inconvénient de cette projection est d'introduire de très grandes déformations lorsqu'on s'approche de la demi-sphère, c'est-à-dire d'un angle d'ouverture proche de  $180^\circ$ .

2. *Projection stéréographique* : Le second cas est celui où le centre de projection est situé sur la sphère et où le tableau est le plan tangent situé à son antipode (Figure 3, droite). Elle mérite une attention toute particulière, car il s'agit en fait d'une inversion. Dans cette projection, les cercles de la sphère ne sont pas déformés, leurs images restant des cercles, même si leur taille augmente lorsqu'on s'éloigne du point principal. Cette projection convient bien pour la représentation d'une demi-sphère.

### ***Projection de Postel***

Dans la représentation de Postel, on représente les latitudes et longitudes sur un diagramme polaire. Les longitudes sont les angles alors que les colatitudes sont figurées par leurs arcs radiaux, tous représentés à la même échelle. Cette méthode permet de représenter la sphère complète, mais l'antipode du point principal est vu comme un cercle.

On a représenté à la

Figure 4 l'hémisphère nord en rouge et, en superposition de type miroir, l'hémisphère sud. On y compare facilement les latitudes et les longitudes des terres émergées.

Dans cette représentation, les distorsions sont très fortes au bord de l'épure quand on réalise la projection de la sphère complète, mais, c'est la seule carte où les distances peuvent être directement mesurées à partir du point principal. Cette projection convient parfaitement pour montrer une ligne de ciel (ligne de séparation entre le ciel et la surface topographique) ou des distances zénithales. Cette projection, comme la suivante, sont des projections pour lesquelles on n'utilise pas un rayon de projection droit, mais une transformation algébrique pouvant être interprétée comme un rayon courbe. Par analogie avec la physique du rayonnement, on peut parler de ***projections non linéaires***.

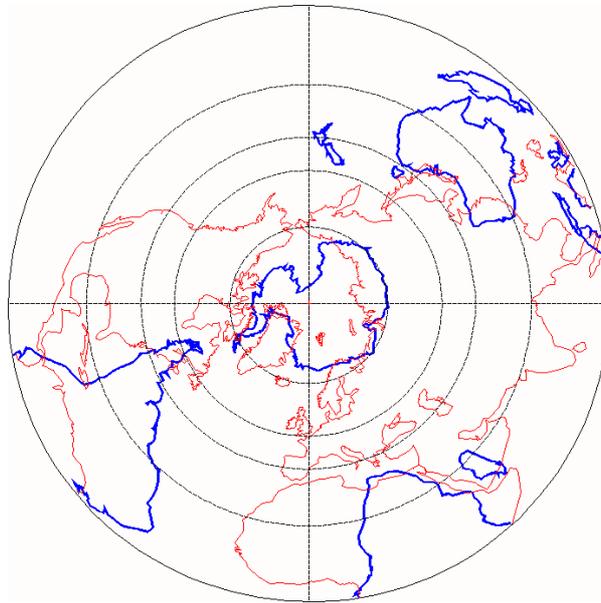


Figure 4 : Deux projections de Postel superposées, avec les cercles de l'équateur, des tropiques, des latitudes 40 et 50, et des cercles polaires.

### ***Projection azimutale équivalente de Lambert***<sup>15</sup>

Cette projection est construite de manière semblable à la précédente, mais le rayon est ajusté de telle manière que l'aire de chaque cercle soit la même que celle de la calotte sphérique qu'il représente. Le rapport des tailles de deux aires quelconques de la sphère y est respecté. Cela signifie que les angles solides des objets projetés sur la sphère y sont vus à la bonne taille. La figure suivante donne une idée exacte de la surface des terres émergées dans les deux hémisphères terrestres.

---

<sup>15</sup> «Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae», Johann Heinrich Lambert (1760), German translation by E. Anding in Ostwald's Klassiker der Exakten Wissenschaften, Vol. 31-33, Leipzig, 1892. Cited by Peter Schröder & Pat Hanrahan, «A Closed Form Expression for the Form Factor between Two Polygons», Research Report CS-TR-404-93, January 1993.

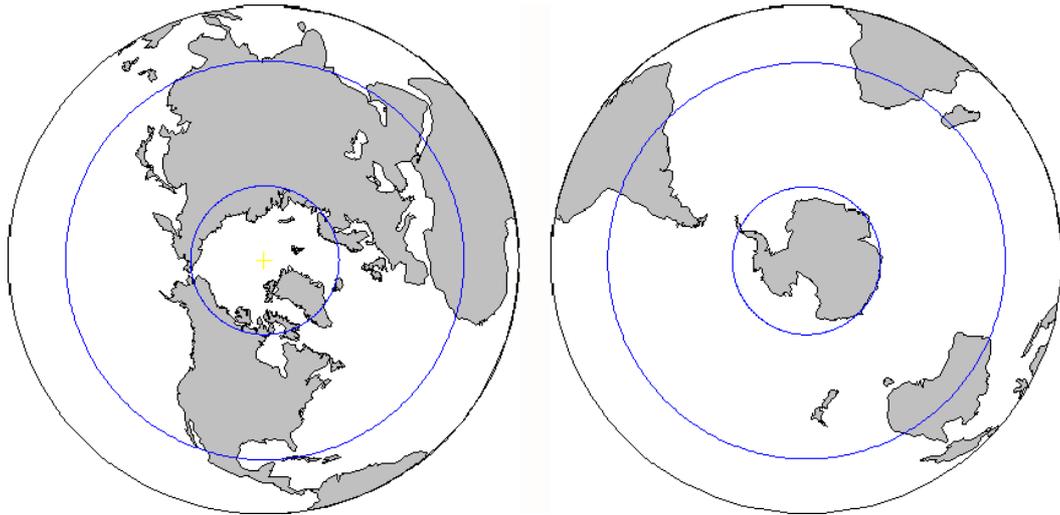


Figure 5 : Projections de Lambert des deux hémisphères

En résumé :

<i>La projection</i>	<i>respecte :</i>
orthogonale	les facteurs de vue
gnomonique	la plus courte distance entre deux points
stéréographique	les angles
Lambert équivalente	les aires
Postel	les distances à partir du point principal

Un dernier point important à noter est que dans la projection stéréographique, tout arc de cercle de la sphère est représenté par un arc de cercle ou une droite, ce qui signifie que toutes les entités géométrique qui nous intéressent – droites de l'espace, qui deviennent des arcs de grands cercles sur la sphère, et lieux de distances zénithales constantes, qui sont des petits cercles – sont représentés par des arcs de cercles. Cette propriété permet de systématiser et d'optimiser les calculs relatifs à ces contours.

### ***Le quadrillage de la sphère***

Sachant qu'il est possible de créer un quadrillage uniforme de la sphère<sup>16</sup> dans lequel les cellules sont bordées par des arcs de cercles et des rayons et qui respecte les propriétés de n'importe laquelle des projections azimutales présentées ci-dessus, on dispose d'un moyen simple et efficace d'effectuer une quadrature des entités représentées sur la projection.

Ces quantités peuvent être calculées par un simple comptage des pixels présents à l'intérieur des zones concernées. En attribuant aux pixels situés sur le même anneau un poids qui dépend de la relation entre la projection étudiée et la stéréographie, on peut effectuer tous les calculs sur la même projection, par exemple sur la stéréographie, pour laquelle les contours ont une forme standard<sup>17</sup>.

<sup>16</sup> « A general rule for circle and hemisphere partition into equal-area cells », B. Beckers & P. Beckers, submitted for publication.

<sup>17</sup> « The universal projection for computing data carried on the hemisphere », B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Computer-Aided Design, Volume 43, Issue 2, Pages 219-226, February 2011.

A titre d'exemple, voici la subdivision de l'hémisphère<sup>18</sup> en 145 cellules :

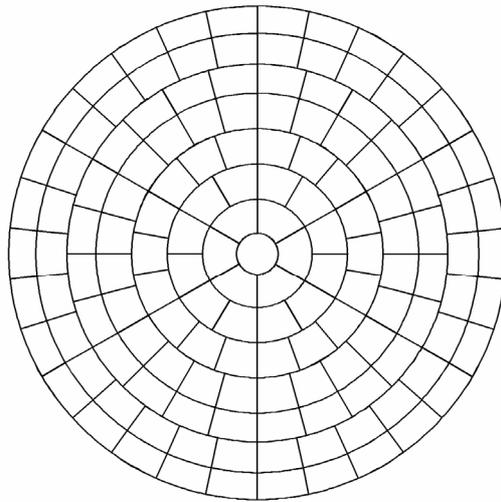


Figure 6 : Disque comportant 145 cellules de mêmes aires agencées selon la séquence de Tregenza

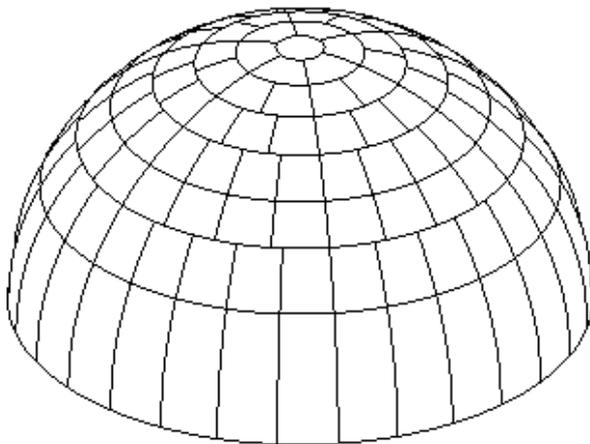


Figure 7 : Les 145 cellules transportées sur l'hémisphère par l'inverse de la projection orthogonale ont toutes le même facteur de vue

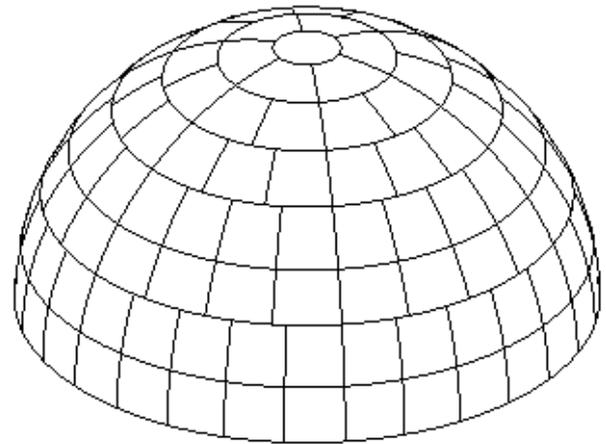


Figure 8 : Les 145 cellules transportées sur l'hémisphère par l'inverse de la projection équivalente ont toutes le même angle solide

<sup>18</sup> « Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements », P.R. Tregenza, Lighting Research and Technology 19 (1), pp. 13–14, 1987.

## I.3 L'architecture et la lumière

### I.3.1 Les projections du ciel

#### *Le mouvement du soleil*

La position du soleil varie avec le temps selon deux périodicités principales. La première, due à la rotation de la terre, est de 24 heures et la seconde, due à la rotation de la terre autour du soleil, est d'un an. Cependant, alors qu'on peut considérer que le premier mouvement est uniforme, il n'en est pas de même pour le second. Les deux causes principales de cette non-uniformité sont l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à son plan orbital et la forme elliptique de son orbite.

Le calcul du trajet solaire fait partie des problèmes des trajectoires de planètes autour du soleil ou de satellites autour d'une planète. Si on adopte la simplification dite des deux corps qui a été introduite par Kepler à partir de l'observation du mouvement des planètes, le mouvement est décrit par une ellipse. Selon la seconde loi de Kepler, le satellite balaye des aires égales en des temps égaux. Cela signifie que le temps passé sur un segment de la trajectoire est à la période de l'orbite dans le même rapport que l'aire balayée et la surface de l'ellipse. Pour chaque quartier d'ellipse, on peut donc écrire la relation suivante entre le temps de parcours  $\Delta t$  sur l'ellipse et la période orbitale  $T$ .

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\text{aire du quartier}}{\text{aire de l'ellipse}} \quad (1)$$

L'aire d'un quartier d'ellipse se calcule à partir des angles définissant les deux extrémités de l'arc d'ellipse délimitant ce quartier. L'angle  $E$  défini à partir du centre de l'ellipse est appelé **anomalie excentrique**. Il est compté à partir du périégée, où  $E=0$ . Pour un quartier débutant au périégée et se terminant en  $E$ , l'aire est égale à :

$$\frac{ab}{2}(E - e \sin E) \quad (2)$$

Les variables  $a$  et  $b$  désignent les demi-axes de l'ellipse et  $e$  son excentricité. Le temps écoulé à partir du passage au périégée ( $E = 0$ ) se calcule donc selon la formule suivante.

$$t = \frac{T}{2\pi}(E - e \sin E) \quad (3)$$

Cette relation peut être réécrite sous forme d'angle sans faire intervenir explicitement la période :

$$\frac{2\pi t}{T} = (E - e \sin E) = M \quad (4)$$

$M$  est l'angle parcouru au cours du même laps de temps sur une orbite circulaire de même période. Comme le mouvement est uniforme sur les orbites circulaires, cette définition permet en quelque sorte de disposer d'une horloge dont le tour de cadran est la période de l'orbite.

L'angle  $M$  est appelé **anomalie moyenne**. La relation (4) est la célèbre **équation de Kepler** dans laquelle il s'agit de calculer  $E$  à partir de  $M$  et  $e$ . Malheureusement il n'existe pas de solution explicite de cette équation. Il faut donc la résoudre numériquement par méthode

itérative<sup>19</sup> ou utiliser des solutions approchées, par exemple, des développements en série de Fourier<sup>20</sup>. Il existe de nombreuses publications proposant des méthodes plus ou moins complexes et différents niveaux de précision<sup>21</sup>.

Comme l'excentricité de l'orbite terrestre est faible :  $e = 0.016710219$ , en première approximation, on peut considérer que l'orbite est circulaire et donc, que les deux anomalies se confondent.

En résumé, le calcul de la position de la terre s'effectue à partir de la date, c'est-à-dire la valeur de  $M$ , en tenant compte de sa position à un moment donné (généralement le premier janvier 2000 à 0 heure).

Connaissant la position de la terre sur son orbite autour du soleil, il s'agit de calculer la position du soleil en un point de la surface terrestre dans son système de référence local.

Comme l'axe de rotation de la terre est incliné de  $23.45^\circ$  par rapport au plan de sa trajectoire, la position du soleil à midi varie au cours de l'année, nous appelons cette grandeur : déclinaison, elle varie entre  $-23.45^\circ$  et  $+23.45^\circ$  (les latitudes des tropiques).

Pour calculer la position du soleil dans le ciel, c'est-à-dire son azimut et sa distance zénithale, il reste enfin à tenir compte de la rotation de la terre. Pendant une journée, la déclinaison du soleil varie très peu : sa trajectoire apparente peut donc être assimilée au parallèle dont la latitude est égale à sa déclinaison et qui est compris entre les deux tropiques.

Une image de la voûte céleste est aussi obtenue en projection stéréographique à la latitude de  $50^\circ$  nord (Figure 9 & Figure 10). Dans la présentation de droite, la trajectoire terrestre est supposée circulaire, ce qui signifie qu'au cours de l'année, à une heure donnée de la journée, le soleil semble se déplacer sur le méridien horaire correspondant. Au cours de la journée, il se déplace d'est en ouest sur l'arc de cercle représentant le parallèle correspondant à sa déclinaison. Ces deux mouvements, de périodicité annuelle et de périodicité journalière, sont représentés par le réseau de courbes à l'intérieur du cercle représentant le plan horizontal local.

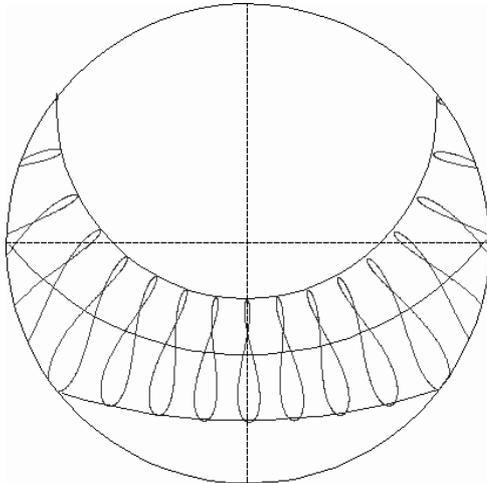


Figure 9 : Orbite terrestre elliptique

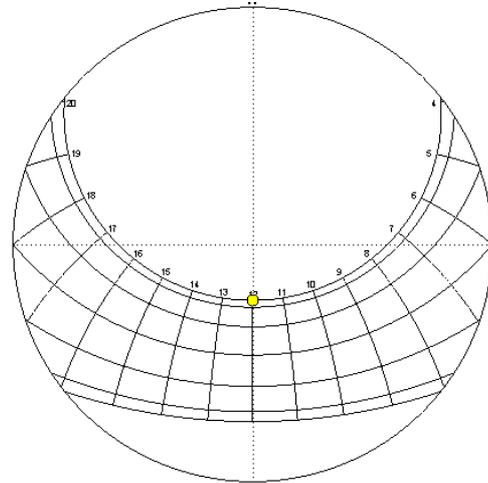


Figure 10 : Orbite terrestre circulaire

En résolvant de manière plus précise l'équation de Kepler, on observe des fluctuations de position du soleil au cours de l'année ; la courbe décrite par un corps céleste observé tous les jours à la même heure n'est plus le méridien horaire mais une courbe en forme de huit, appelée *analemme*.

<sup>19</sup> « Les anomalies, l'équation de Kepler, la position du soleil », B. Beckers & P. Beckers, 2010, Helio\_006\_fr, www.heliodon.net

<sup>20</sup> « Fourier series representation of the position of the Sun », J.W. Spencer, 1971, Search 2 (5).

<sup>21</sup> « An algorithm for the computation of the solar position », R. Grena, 2008, Solar Energy 82, 462–470.

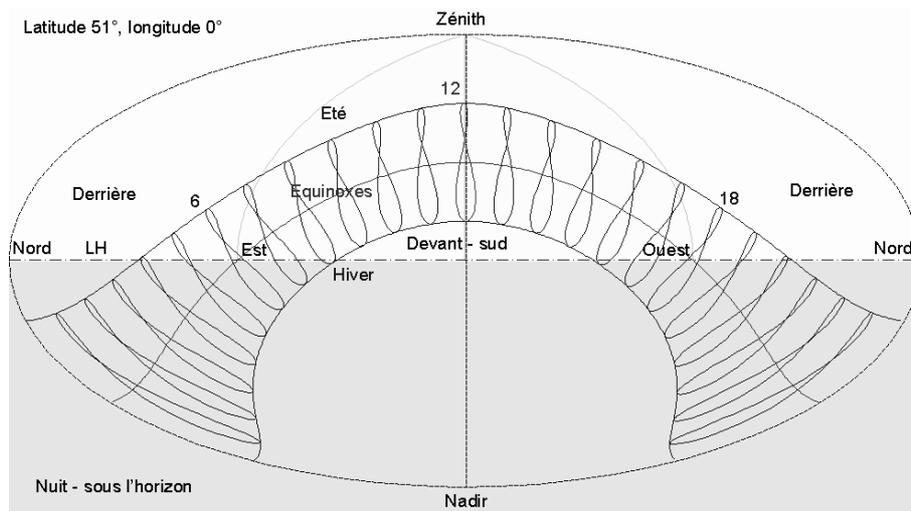


Figure 11 : Trajectoires annuelles du soleil entre 1 et 23 heures à Londres

En utilisant une projection d'Aitoff, représentation du planisphère construite sur la base de la projection de Postel en utilisant deux mises à échelle astucieuses pour limiter au maximum les distorsions, on peut représenter la sphère terrestre complète<sup>22</sup>. On y observe alors les trajectoires annuelles du soleil à toutes les heures du jour et de la nuit. Les segments d'analemmes situés en dessous du grand axe de l'ellipse représentant l'entière de la voûte céleste correspondent à la position du soleil pendant la nuit.

Dans le graphique de la Figure 10, chaque carreau complet représente la même durée, ceci montre bien que, du point de vue temporel, l'échelle est fortement non linéaire.

En déformant la partie de la stéréographie présente sous les trajectoires solaires et en adoptant une double échelle de temps linéaire sur l'année et sur la journée, on obtient le diagramme *isochrone*. Ce graphique, qui apparaît souvent dans l'exposition de résultats mesurés (puisqu'il est assez naturel), n'a cependant jamais été défini jusqu'ici comme projection. C'est donc un apport original d'Heliodon 2, auquel nous avons donné le nom d'*isochrone*, c'est-à-dire : « qui procède par temps égaux ». Il peut être considéré comme une nouvelle projection non linéaire de la partie de la voûte céleste comprise entre les deux parallèles des tropiques. Ces deux cercles marquent les limites de la zone de passage du soleil.

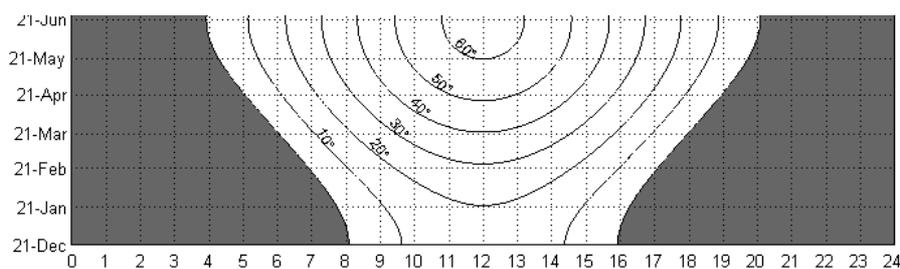


Figure 12 : Isochrones avec hauteurs angulaires du soleil, latitude 50° N

Le réseau de courbes de la Figure 10 apparaît en pointillés sous la forme de quadrillage à la Figure 12. On peut mesurer le temps en heures sur l'axe horizontal et en jours sur l'axe vertical. Dans cette figure, on a représenté les courbes de hauteurs angulaires du soleil. Ce diagramme peut être dédoublé pour avoir une vue sur l'année complète (Figure 13).

<sup>22</sup> « Communication graphique », P. Beckers, Edition de l'Université de Liège, 2003.

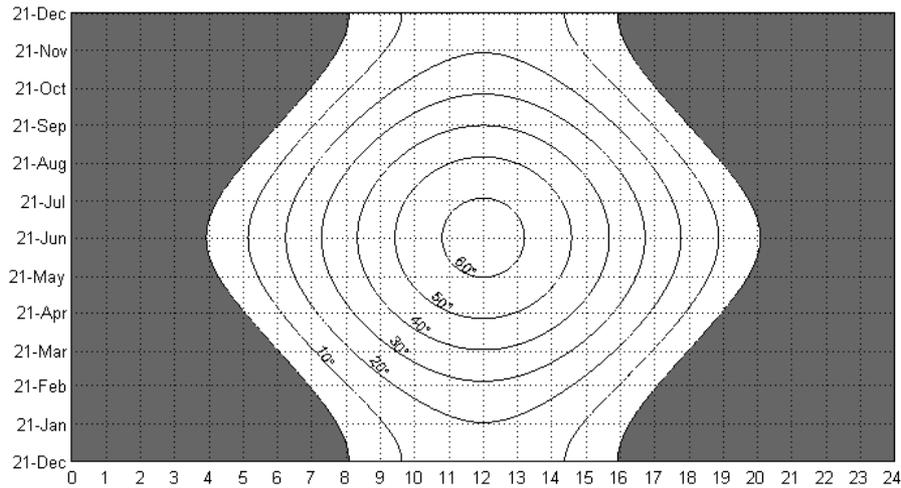


Figure 13 : Isochrones avec hauteurs angulaires du soleil, année complète, latitude 50° N

Le principal avantage de ce diagramme est de fournir une image facile à interpréter lorsqu'on s'intéresse à des périodes de temps. Elle n'est cependant pas essentielle, car tout calcul de durée peut aussi s'effectuer sur la projection stéréographique où, rappelons-le, toutes les courbes à traiter sont des segments de droites ou d'arcs de cercles.

Il faut cependant noter que la prise en compte de l'équation de Kepler et donc des analemmes complique les calculs dans la stéréographie alors qu'elle passe quasiment inaperçue dans l'isochrone où on observe simplement une légère fluctuation de forme des deux courbes marquant le lever et le coucher du soleil. Cette fluctuation produit simplement un glissement des lignes de pixels sur les dessins d'isochrones.

Les deux types de figures sont repris ci-après avec les masques de trois objets qui apparaissent dédoublés dans l'isochrone, puisque le diagramme des trajectoires solaires est dupliqué.

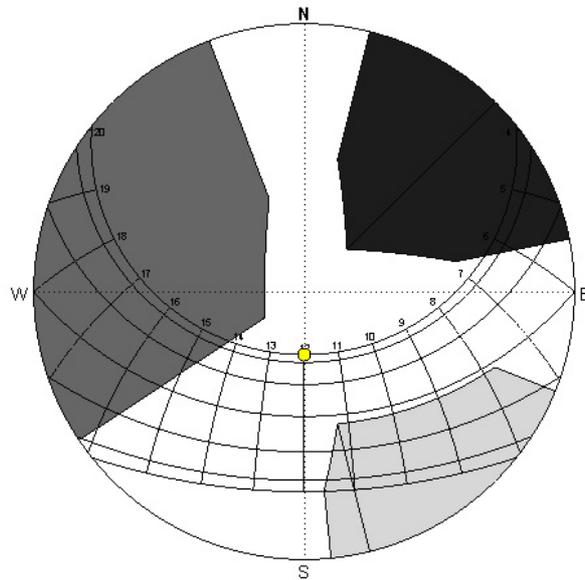


Figure 14 : Calcul effectué à la latitude de 50° N

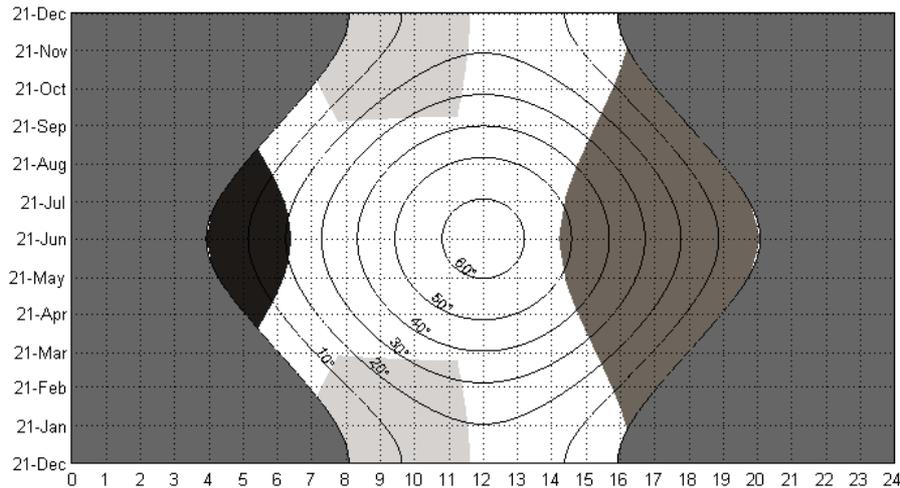


Figure 15 : Isochrone à la latitude de 50° N

Dans ce dernier diagramme, on peut rapidement estimer visuellement pendant combien de temps sur la journée ou sur l'année, un bâtiment cache le soleil alors que, à partir de la Figure 14, cela s'avère quasiment impossible puisque chaque zone élémentaire y a une pondération spécifique. Par contre, par quadrature numérique, cela ne pose pas de problème particulier d'autant plus que, contrairement à ce qui se passe à la Figure 15, toutes les courbes limites de la Figure 14 sont des droites et des arcs de cercles.

En revanche, si on a besoin de l'approximation du premier ordre comportant l'analemme, qui ne se projette plus comme des cercles sur la stéréographie, il redevient plus intéressant d'utiliser l'isochrone, où le temps est linéarisé.

### ***L'atténuation atmosphérique***

Le calcul de l'atténuation atmosphérique de la radiation solaire est basé sur l'évaluation de la pression atmosphérique et de la masse optique de l'air.

La pression atmosphérique est calculée en fonction de l'altitude  $h$  exprimée en mètres.

$$\frac{p_a}{p_0} = e^{-\frac{h}{8200}} \quad (5)$$

Au niveau de la mer, la pression vaut :  $p_0 = 101325$  Pa. La température standard y est de 15°C. Dans la troposphère, qui s'étend approximativement de 0 à 11 km, la température décroît linéairement de 6.5°C environ par km.

La masse optique de l'air (*optical air mass*) est une mesure réalisée au niveau de la mer de la longueur du trajet parcouru à travers l'atmosphère par des rayons lumineux provenant d'un corps céleste; elle s'exprime comme un multiple de la longueur du trajet qui correspond à une source de lumière située au zénith.

Selon le Glossaire de Météorologie publié par l'AMS (American Meteorological Society<sup>23</sup>), pour des distances zénithales (rappelons que la distance zénithale est l'angle entre le rayon et la verticale locale) allant jusqu'à environ 70°, elle est approximativement égale à la sécante de l'angle définissant la distance zénithale du corps céleste donné. Pour un calcul plus précis, il faut tenir compte de la réfraction du rayon lumineux.

<sup>23</sup> « Smithsonian Meteorological Tables », R. J. List, 1951: 6th rev. ed., p. 422.  
<http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search?id=optical-air-mass1>

Pour obtenir une valeur représentative à haute altitude, ces valeurs doivent être multipliées par le rapport entre la pression atmosphérique réelle et la pression au niveau de la mer.

L'atmosphère est modélisée par une couche d'épaisseur constante posée sur un plan tangent à la surface terrestre. La masse optique d'air, fonction de l'angle zénithal  $\psi$  du rayon solaire, est reliée à l'altitude par la formule (5) de calcul de la pression atmosphérique.

$$m_0 = \sec \psi \quad ; \quad m = \frac{p_a}{p_0} m_0 \quad (6)$$

On peut calculer  $m$  directement en fonction de l'altitude en utilisant les combinaisons des formulations définies pour les deux entités : pression atmosphérique et nombre de masse optique. En combinant les formules (5) et (6), on obtient l'expression suivante :

$$m = e^{-\frac{h}{8200}} \sec \psi \quad (7)$$

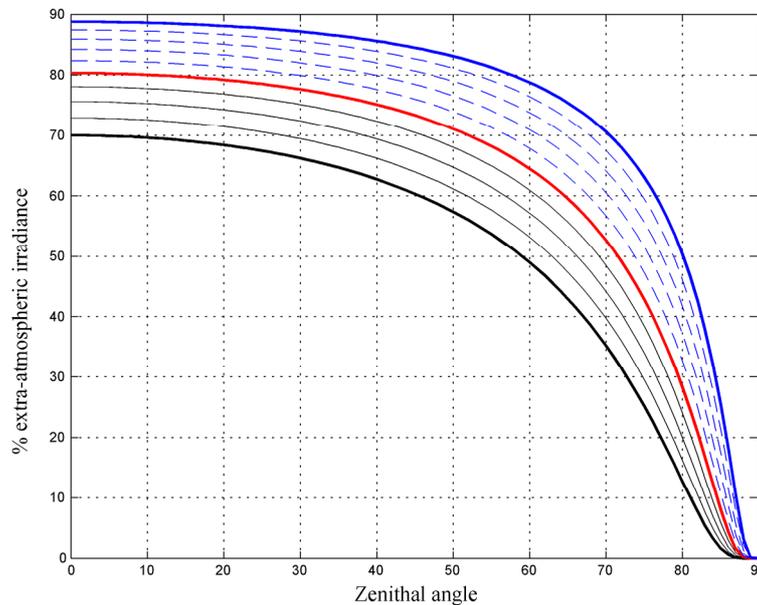


Figure 16 : Irradiances sur une surface perpendiculaire au rayon,  $\tau = 0.7$ , Altitudes de 0 m (noir continu), 4000 m (rouge continu) et 9000 m (bleu continu)

L'irradiance du rayonnement solaire extra-atmosphérique sur une surface perpendiculaire au rayon est désignée par la variable  $S_{p0}$  ( $S_{p0} = 1367 \text{ W m}^{-2}$ ), tandis que l'irradiance solaire directe sur une surface terrestre perpendiculaire au rayon est désignée par la variable  $S_{pb}$ . Ces deux grandeurs se mesurent en  $\text{W m}^{-2}$ . Elles sont liées par une relation dans laquelle on introduit la transmittance atmosphérique, un nombre sans dimension dont la valeur pour un ciel bleu est comprise, selon Campbell<sup>24</sup>, entre 0.65 et 0.75.

$$S_{pb} = S_{p0} \tau^m \quad (8)$$

<sup>24</sup> « An introduction to Environmental Biophysics », G.S. Campbell & J.M. Norman, New York: Springer, second edition, 1998.

Dans la formulation (6), le nombre  $m$  tend vers l'infini lorsque le rayon devient horizontal. Quelle que soit la valeur (par définition inférieure à un) de la transmittance, l'irradiance directe tend donc vers zéro lorsque le soleil se couche sur l'horizon. Une transmittance égale à un correspondrait à un milieu parfaitement transparent, c'est-à-dire au vide.

La Figure 16 montre le rapport  $100 S_{pb} / S_{p0}$  pour les altitudes de 0 m à 9000 m avec une transmittance atmosphérique égale à 0.7.

Quand on étudie un panneau photovoltaïque piloté de manière à suivre constamment l'orientation du rayon solaire, on doit prendre en compte non seulement le rayonnement direct, mais aussi le rayonnement diffus, et en principe, l'albédo. Ce dernier n'est pas abordé dans cette étude. Pour le rayonnement diffus, il faut disposer d'un modèle de radiosité du ciel. Dans ce travail, on prend le modèle de Campbell inspiré des travaux de Liu & Jordan<sup>25</sup>. Il faut aussi tenir compte du facteur de vue de la partie du ciel vue depuis le plan du panneau solaire.

Ce facteur de vue correspond à la partie de la voute céleste constituée du fuseau sphérique limité par le plan horizontal et par celui du panneau. En utilisant l'analogie de Nusselt<sup>26</sup>, on déduit que le facteur de vue de ce fuseau est le rapport entre, d'une part, la somme des aires d'un demi-cercle et de la demi-ellipse projection orthogonale du demi-cercle ayant la même inclinaison que le panneau et, d'autre part, l'aire du cercle complet. Les demi-axes de l'ellipse sont égaux respectivement au rayon du cercle et au même rayon multiplié par le cosinus de l'angle zénithal du rayon solaire. Pour un panneau solaire dont la normale forme un angle  $\psi$  avec la verticale, le facteur de vue du ciel  $SVF$  (sky view factor) est donc donné par :

$$SVF = \frac{1 + \cos \psi}{2} \quad (9)$$

On en déduit le rayonnement diffus :

$$S_{pd} = 0.3 (1 - \tau^m) S_{p0} \cos \psi \left( \frac{1 + \cos \psi}{2} \right) \quad (10)$$

Le rayonnement total sur le panneau vaut donc :

$$S_{pt} = \left( 0.3 (1 - \tau^m) \left( \frac{1 + \cos \psi}{2} \right) \cos \psi + \tau^m \right) S_{p0} \quad (11)$$

Ce résultat est présenté sur la partie gauche de la Figure 17. Dans le meilleur des cas, si le rayon est vertical, le rayonnement diffus correspond à 30% du rayonnement absorbé par l'atmosphère :  $0.3 (1 - \tau^m) S_{p0}$ . Dans les paragraphes suivants, les irradiances mesurées sur une surface perpendiculaire au rayon sont comparées à celles qui sont observées sur des surfaces d'orientation fixe imposée.

L'irradiance directe (beam irradiance) sur une surface horizontale est désignée par la variable  $S_b$ , l'irradiance diffuse sur une surface horizontale par la variable  $S_d$  et l'irradiance totale sur une surface horizontale par la variable  $S_r$ .

<sup>25</sup> « The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation », B.Y.H Liu & R.C. Jordan, *Solar Energy*. 4(3). 1-19, 1960

<sup>26</sup> « Graphische bestimmung des winkerverhältnisses bei der wärmestrahlung », W. Nusselt, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 72(20):673 1928. Voir également : B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Commentaires sur l'analogie de Nusselt, Rapport Helio\_004\_fr, 2009, www.heliodon.net

Les fonctions  $S_b/S_{p0}$  (en rouge),  $S_d/S_{p0}$  (en bleu) et  $S_t/S_{p0}$  (en noir) sont représentées à la Figure 17, en fonction de l'angle zénithal.

$$\begin{aligned}
 S_b &= S_{pb} \cos \psi = \tau^m S_{p0} \cos \psi \\
 S_d &= 0.3 (1 - \tau^m) S_{p0} \cos \psi \\
 S_t &= S_b + S_d = (0.3 + 0.7 \tau^m) S_{p0} \cos \psi
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Grâce à la contribution de sa partie diffuse, l'irradiance totale  $S_t$  (souvent appelée irradiance globale) peut être supérieure à l'irradiance solaire directe sur une surface perpendiculaire  $S_{pb}$  (comparer les graphiques de gauche et de droite de la Figure 17). Lorsque le rayon solaire est proche de la verticale, on se trouve automatiquement dans cette situation. Cela s'explique parce qu'une partie de l'énergie absorbée par l'atmosphère est restituée sous forme d'énergie diffuse.

Tous les graphiques de la Figure 17, par exemple ceux de  $S_b$ ,  $S_d$  et  $S_t$ , peuvent être attribués à la date du 21 mars à midi en interprétant l'abscisse comme une latitude. En effet, au moment des équinoxes, lors du passage du soleil dans le méridien local (midi solaire), l'incidence du rayon solaire est égale à la latitude, laquelle varie de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle.

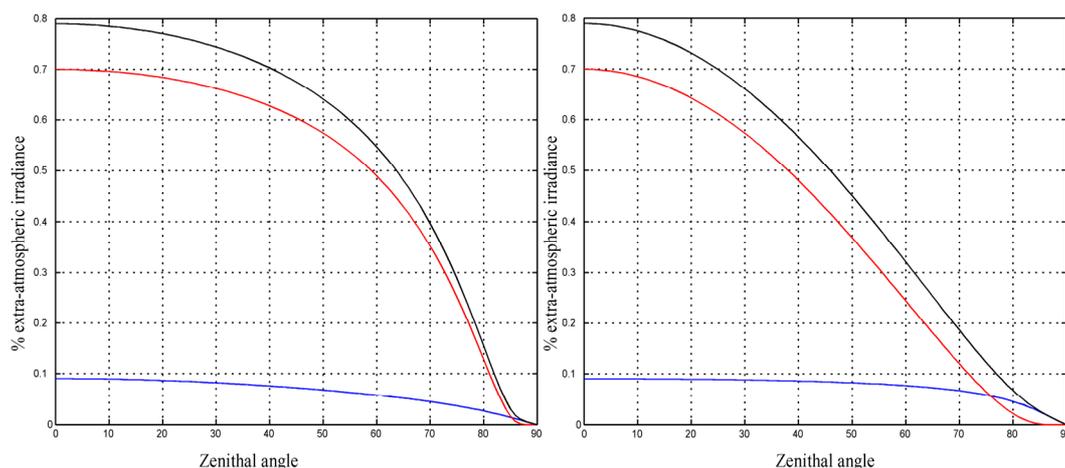


Figure 17 : Irradiances ( $\tau = .7$ )

A gauche : sur un plan perpendiculaire : direct  $S_{pb}/S_{p0}$  (rouge), diffus  $S_{pd}/S_{p0}$  (bleu), global  $S_{pt}/S_{p0}$  (noir)  
A droite : sur un plan horizontal : direct  $S_b/S_{p0}$  (rouge), diffus  $S_d/S_{p0}$  (bleu), global  $S_t/S_{p0}$  (noir)

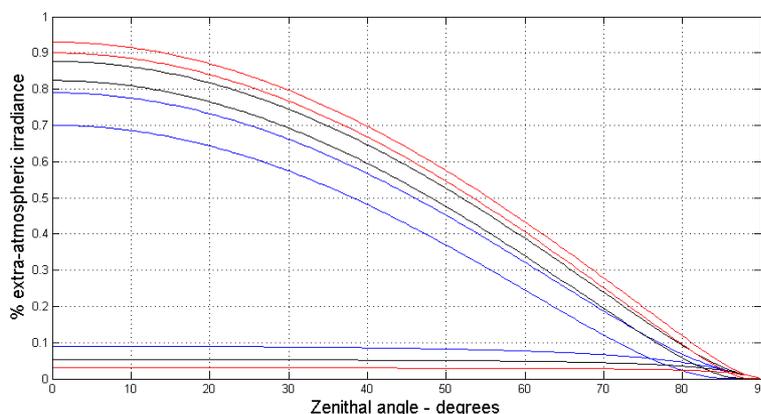


Figure 18 : Irradiances *diffuse, directe et totale* à trois altitudes ; niveau de la mer, 5000 m, 10000 m.

Comme attendu, la contribution diffuse diminue avec l'altitude. A 5000 m d'altitude, l'irradiance directe sur une surface horizontale est de 90 % de l'irradiance extra-atmosphérique et l'irradiance diffuse de 3 %

### ***Calcul des énergies***

Connaissant la position du soleil en tout lieu et à chaque instant, on peut intégrer l'irradiance sur une période de temps, par exemple la journée. Cela permet de suivre l'évolution de l'énergie reçue tout au long de l'année. Selon les disciplines ou les habitudes, l'énergie s'exprime en Joule (le plus souvent MJ) ou en kWh (1 kWh = 3.6 MJ).

Les énergies irradiées par mètre carré sont des intégrales temporelles des irradiances, par exemple sur une journée :

$$J_{pb} = \int_{\text{jour}} S_{pb} dt \quad (13)$$

Quand on passe des irradiances aux énergies, on remplace le symbole  $S$  par  $J$  et on garde les mêmes conventions d'indices que précédemment.

Le but de ces calculs est d'avoir idée des répartitions spatiales et temporelles des énergies provenant de l'irradiance solaire. La procédure permet d'étudier toutes les composantes présentées dans les formules (8) et (12).

Le calcul est réalisé pour la ville de Compiègne (49°24' N) aux solstices et aux équinoxes. L'irradiance extra-atmosphérique est égale à 1367 W m<sup>-2</sup>, la transmittance atmosphérique  $\tau = 0.7$ . Les calculs sont effectués pour l'année 2010. La variable  $b$  indique la durée du jour. Entre l'été et l'hiver, le rapport des énergies reçues est supérieur à cinq pour un panneau toujours orienté dans la direction du soleil, et est égal à 9 pour un panneau horizontal, alors que la durée du jour varie seulement du simple au double.

<b>Compiègne 49°24' N</b>	<i>Heures (b)</i>	$J_{p0} = 1367 * b$	$J_{pb}$	$J_{pd}$	$J_{pt}$	$J_b$	$J_d$	$J_t$
21 mars	11.98	16376	6255	785	7040	3219	1065	4284
21 juin	16.05	21943	10015	1260	11275	6854	1546	8400
21 septembre	12.17	16632	6460	809	7269	3397	1090	4487
21 décembre	7.95	10867	1811	303	2114	455	493	948

Différentes situations ont été analysées au moyen de procédures utilisant les formules présentées ci-dessus<sup>27</sup>. On effectue ainsi le calcul au solstice d'été aux latitudes variant de zéro à soixante cinq degrés nord.

Pour un panneau orienté vers le soleil, l'énergie maximum est obtenue aux plus grandes latitudes alors que, pour le panneau horizontal, c'est à la latitude de 40° N (plus précisément de 36° 42' N, ex. : Málaga, Alger, Mersin) qu'on obtient le maximum, avec cependant des positionnements différents pour le rayonnement direct (30° N), le rayonnement diffus (65° N) et le rayonnement total (40°N).

<sup>27</sup> « Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère », B. Beckers & P. Beckers, 2010, rapport Helio\_008, www.heliodon.net

Solstice d'été - 21 juin – hémisphère nord – énergies en Wh m <sup>-2</sup>								
Latitude	Heures ( <i>h</i> )	$J_{p0} = 1367 * h$	$J_{pb}$	$J_{pd}$	$J_{pt}$	$J_b$	$J_d$	$J_t$
0°	12	16404	7915	991	8906	5597	1196	6792
10°	12.58	17203	8540	1076	9617	6360	1271	7631
20°	13.21	18059	9045	1144	10189	6884	1339	8223
30°	13.93	19046	9448	1195	10644	7141	1404	8545
40°	14.84	20292	9768	1233	11001	7120	1472	8592
50°	16.15	22075	10030	1262	11292	6829	1551	8380
60°	18.49	25275	10299	1300	11599	6305	1670	7975
65°	21.12	28871	10502	1341	11843	5984	1775	7759

A la suite des travaux de Liu & Jordan complétés par Campbell & Norman, nous avons considéré seulement des ciels bleus et sans nuages. Nous avons pu passer de la puissance instantanée à l'énergie radiante intégrée sur des journées parfaitement ensoleillées. Même si de telles journées sont rares à certaines latitudes, on peut toujours considérer leur éventualité près des solstices et des équinoxes, pour estimer le rayonnement maximal recevable aux moments extrêmes de l'année (les équinoxes sont certes des moments moyens aux latitudes intermédiaires, mais ils correspondent bien à des extrêmes sur l'équateur – le passage au zénith – et aux pôles – la naissance et la fin du jour unique de six mois). Une connaissance de ces journées extrêmes est suffisante pour appréhender un grand nombre de problèmes relevant de la conception architecturale.

Pour passer à des bilans d'énergie saisonniers ou annuels, il faut évidemment prendre en compte la répartition statistique du couvert nuageux dans une année standard, mois par mois. Il est intéressant de voir dans quelle mesure cette répartition, en général peu uniforme, peut déplacer l'optimum énergétique, y-compris pour un problème aussi simple que celui de la recherche de l'inclinaison idéale d'un panneau solaire photovoltaïque. Pour ce problème, il est d'usage de faire intervenir d'abord l'albédo, c'est-à-dire d'attribuer un certain coefficient de réflexion moyen à l'ensemble du fuseau sphérique qui ne voit pas le ciel. Nous ne l'avons pas fait ici parce que notre objectif final est de quantifier les apports solaires en milieu urbain, dans un environnement géométrique complexe muni de coefficients de réflexion très variés qui, le plus souvent, ne peuvent pas être résumés par la notion simplificatrice d'albédo.

En fait, dans cet environnement urbain, l'ordre à suivre est bien différent. Nous devons d'abord introduire les nuages, puis les différentes surfaces, mais seulement comme masques (ville noire) ; enfin, nous introduirons la réflexion diffuse (ville grise), mais directement dans toute sa complexité réelle (possibilité de réflexions multiples), avant d'envisager d'autres formes de réflexion, incluant la composante spéculaire des miroirs et des vitrages, ces derniers introduisant de plus leur caractère translucide.

En progressant de cette manière, nous espérons mettre au clair l'ensemble des difficultés qui se présentent (sur le triple plan de la physique, de la statistique et des méthodes de résolution), de manière à parvenir au problème le plus général avec une évaluation aussi rigoureuse que possible des hypothèses faites, et du niveau de précision final sur le calcul de chacune des composantes du problème radiatif en ondes courtes, en considérant d'abord le spectre solaire d'une manière globale (comme nous l'avons fait ici), puis par bandes de fréquences (ultraviolet, visible, infrarouge proche), avant de passer à la réponse radiative de la ville échauffée, et à ses échanges avec le ciel dans l'infrarouge thermique.

### 1.3.2 La radiosité

Nous proposons comme lecture de base le livre de Sillion & Puech<sup>28</sup>

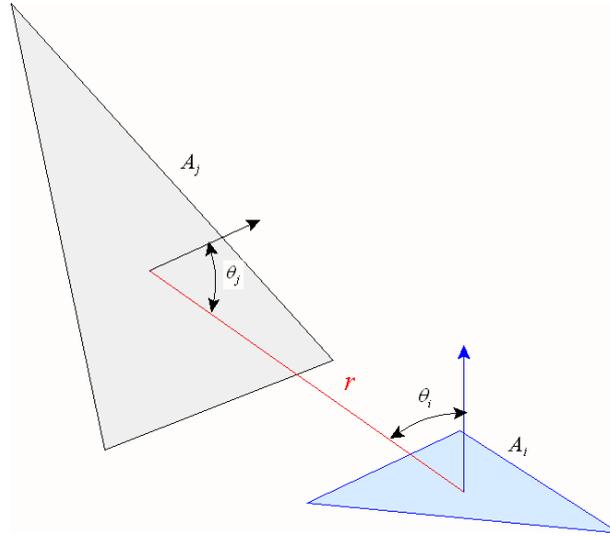


Figure 19 : Facteur de vue

Pour introduire le problème, on part des équations de la radiosité établies initialement par les thermiciens<sup>29</sup> et reprises par la suite pour l'étude de l'illumination globale<sup>30</sup>.

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_1 F_{11} & \rho_1 F_{12} & \cdots & \rho_1 F_{1n} \\ \rho_2 F_{21} & \rho_2 F_{22} & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \rho_n F_{n1} & \cdots & \cdots & \rho_n F_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{pmatrix} \quad (14)$$

Il faut résoudre le système d'équations linéaires comportant pour inconnues les radiosités  $B_i$ , les seconds membres étant constitués des exitances<sup>31</sup>  $E_i$  :

$$MB = E \quad ; \quad M_{ij} = \delta_{ij} - \rho_i F_{ij} \quad (15)$$

Les composantes de la matrice sont constituées des coefficients de réflexion  $\rho_i$  et des facteurs de vue, appelés aussi facteur de forme,  $F_{ij}$  entre les surfaces  $A_i$  et  $A_j$  (Figure 19).

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i A_j} \iint \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} V(x, y) dA_j dA_i \quad ; \quad x \in A_i \quad ; \quad y \in A_j \quad (16)$$

Les radiosités  $B_i$  et les exitances  $E_i$  se mesurent en Watt m<sup>-2</sup>. Le facteur de vue est une variable adimensionnelle purement géométrique, mais sa définition fait appel à des notions

<sup>28</sup> « Radiosity and Global Illumination », F. Sillion & C. Puech, Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1994.

<sup>29</sup> « Heat Transfer », Benjamin Gebhart. McGraw-Hill Book Company, 1961.

<sup>30</sup> « Modelling the interaction of light between diffuse surfaces », Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg, and Bennett Battaile, Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings), volume 18, pages 212–22, July 1984.

<sup>31</sup> La Commission Internationale de l'éclairage recommande l'appellation **exittance** au lieu d'* mittance énergétique*.

énergétiques :  $F_{ij}$  est la proportion de la puissance totale quittant  $A_i$  qui est reçue par  $A_j$ . Il lie donc deux carreaux d'aires égales à  $A_i$  et  $A_j$ . L'angle entre le rayon  $r$  et la normale au carreau  $A_i$  est noté  $\theta_p$ , l'angle entre le rayon  $r$  et la normale au carreau  $A_j$  est noté  $\theta_r$ .

Dans une enceinte fermée, la somme des facteurs de vue de tous les éléments entourant le carreau étudié doit être égale à 1. C'est la propriété dite de **fermeture**. Pour  $n$  carreaux, on écrit :

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1 \quad ; \quad i = 1, n \quad (17)$$

Cette propriété se vérifie par simple inspection de la matrice des facteurs de vue : la somme des termes de chaque ligne de cette matrice doit être égale à 1. Elle peut aussi l'être en résolvant le système d'équations. En effet, si tous les coefficients de réflexion sont identiques et si toutes les **exitances sont égales à 1**, toutes les radiosités doivent être identiques :

$$\text{Si } \rho_i = \rho \text{ and } E_i = 1 \quad ; \quad i = 1, n \quad \rightarrow \quad B_i = \frac{1}{1-\rho} \quad ; \quad i = 1, n \quad (18)$$

Dans les enceintes convexes, il est facile de satisfaire la condition de fermeture. Mais, si l'enceinte n'est pas convexe, et quelle que soit la méthode de calcul du facteur de vue, il faut veiller à bien prendre en compte le coefficient de visibilité  $V(x, y)$  de la formule (16).

Considérant la symétrie de l'intégrale (16), on déduit la propriété de **réciprocité** :

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad ; \quad F_{ji} = \frac{A_i}{A_j} F_{ij} \quad (19)$$

Cette propriété a pour conséquence, par exemple, que, si  $A_i$  est un disque et  $A_j$  l'hémisphère qui le surplombe, puisque  $F_{ij} = 1$ , on a aussi que :  $F_{ji} = 1/2$ . En effet, la surface de l'hémisphère vaut le double de celle du disque de sa base.

Comme plus haut, cette propriété peut être vérifiée par simple inspection de la matrice des facteurs de vue. De plus, si tous les éléments ont la même aire, la propriété se traduit simplement par le fait que la matrice des facteurs de vue est symétrique.

La propriété de réciprocity peut aussi être vérifiée en résolvant les équations d'importance. En désignant par  $A$  la matrice unicolonne dont les composantes sont les aires des éléments, comme les radiosités sont constantes par élément, la puissance dissipée par les parois de la scène se calcule simplement par le produit :

$$p = B^T A \quad (20)$$

Cette relation se transforme en :

$$p = B^T A = (M^{-1}E)^T A = E^T (M^{-1})^T A \quad (21)$$

On définit la matrice unicolonne d'importance  $X$ , telle que :

$$(M^{-1})^T A = X \quad (22)$$

$X$  est donc solution de :

$$M^T X = A \quad (23)$$

Ce sont les équations d'importance. Ce système d'équations où la matrice des coefficients est la transposée de (15) constitue l'adjoint des équations de radiosité. Les grandeurs  $A$  et  $X$  sont des surfaces qui sont donc mesurées en  $m^2$ .

En résumé, la puissance peut se calculer de deux manières :

$$\begin{aligned} p &= B^T A \\ &= E^T X \end{aligned} \quad (24)$$

Désignons par  $w$  la puissance émise par l'ensemble des sources.

$$w = E^T A \quad (25)$$

**Dans une enceinte fermée**, si tous les **coefficients de réflexion sont identiques**, on réécrit l'équation (14) sous forme condensée :

$$B_i = E_i + \rho \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j \quad (26)$$

Comme les aires des éléments sont définies par  $A_p$  on a :

$$\sum_{i=1}^n B_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i + \rho \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j \right) A_i \quad (27)$$

Par la relation de réciprocité (19) :

$$\sum_{i=1}^n B_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i + \rho \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n \frac{A_j F_{ji}}{A_i} B_j \right) A_i \quad (28)$$

Le terme  $A_i$  peut sortir de la somme intérieure et donc :

$$\sum_{i=1}^n B_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i + \rho \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n A_j F_{ji} B_j \right) \quad (29)$$

Selon la condition de fermeture (17), comme l'indice  $i$  du second terme du membre de droite ne porte que sur un terme, on peut intervertir les sommes :

$$\sum_{i=1}^n B_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i + \rho \sum_{j=1}^n A_j B_j \quad (30)$$

On obtient donc finalement le résultat escompté :

$$(1-\rho)\sum_{i=1}^n B_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^n B_i A_i = \frac{\sum_{i=1}^n E_i A_i}{(1-\rho)}$$

D'après (24) et (25) :

$$p_{exact} = \frac{w}{(1-\rho)} \quad ; \quad w = E^T A \quad (32)$$

On arrive à la même conclusion par un raisonnement physique simple<sup>32</sup>.

L'expression (32) se calcule sans résoudre le système d'équations (14) puisque les termes  $E$ ,  $A$  et  $\rho$  sont les données du problème à résoudre.

Le numérateur est composé des seconds membres de l'équation de radiosité et de l'équation d'importance; le dénominateur est calculé à partir de l'unique coefficient de réflexion des éléments de la scène. Quand on résout les équations de radiosité, on obtient la même solution à condition que les facteurs de forme soient calculés exactement. Cependant, comme ce n'est en général pas possible, la comparaison de la solution des équations de radiosité et du résultat de (32) donne une indication utile sur l'erreur commise lors du calcul de ces facteurs de vue.

De (24) et (32), on déduit la précision de la puissance irradiée :

$$\text{Précision} = \frac{p}{p_{exact}} = (1-\rho) \frac{B^T A}{E^T A} \quad (33)$$

Nous venons d'introduire la définition classique de facteur de vue (16). Cette entité est constituée d'une intégrale double qui ne peut se calculer analytiquement que dans un petit nombre de situations très particulières<sup>33</sup>.

Par contre, l'intégrale intérieure définit un *facteur de vue différentiel ou facteur de vue ponctuel*. Celui-ci est beaucoup plus facile à calculer. Le facteur de vue ponctuel d'un élément  $A_j$  vu du point  $X_i$  appartenant à l'élément  $A_i$  est donné par :

$$F_{X_i, A_j} = \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} V(x, y) dA_j = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_{X_i-A_j}} \cos \theta_i V(x, y) d\omega \quad (34)$$

Pour une surface polygonale  $P, Q, R, \dots$ , Lambert<sup>34</sup> a proposé une formule qui est exacte en l'absence d'obstacles ( $V = 1$ ) :

<sup>32</sup> « Urban outlines 2D abstraction for flexible and comprehensive analysis of thermal exchanges », Benoit Beckers, Cisbat 2011, Lausanne, Switzerland, 14-16 September 2011, <http://cisbat.epfl.ch>

<sup>33</sup> <http://www.me.utexas.edu/~howell/tablecon.html>. A catalog of radiation heat transfer configuration factors. Reference is also made to: « Thermal Radiation Heat Transfer », John R. Howell, Robert Siegel and M. Pinar Menguc, 5th ed., Taylor and Francis/CRC, New York, 2010.

<sup>34</sup>« Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae », Johann Heinrich Lambert (1760), German translation by E. Anding in Ostwald's Klassiker der Exakten Wissenschaften, Vol. 31-33, Leipzig, 1892. Cited by Peter Schröder & Pat Hanrahan, « A Closed Form Expression for the Form Factor between Two Polygons », Research Report CS-TR-404-93, January 1993

$$F_{dS-j} = \frac{1}{2\pi} \sum_j n \cdot g_j \quad (35)$$

Le vecteur  $n$  représente la normale à la surface supportant  $dS$  et pour laquelle on calcule le facteur de vue (Figure 20). Les vecteurs  $g_j$  sont normaux aux faces  $SPQ$ , etc. de la pyramide. Leurs modules sont égaux aux angles aux sommets  $\alpha, \beta, \dots$  des faces de la pyramide.

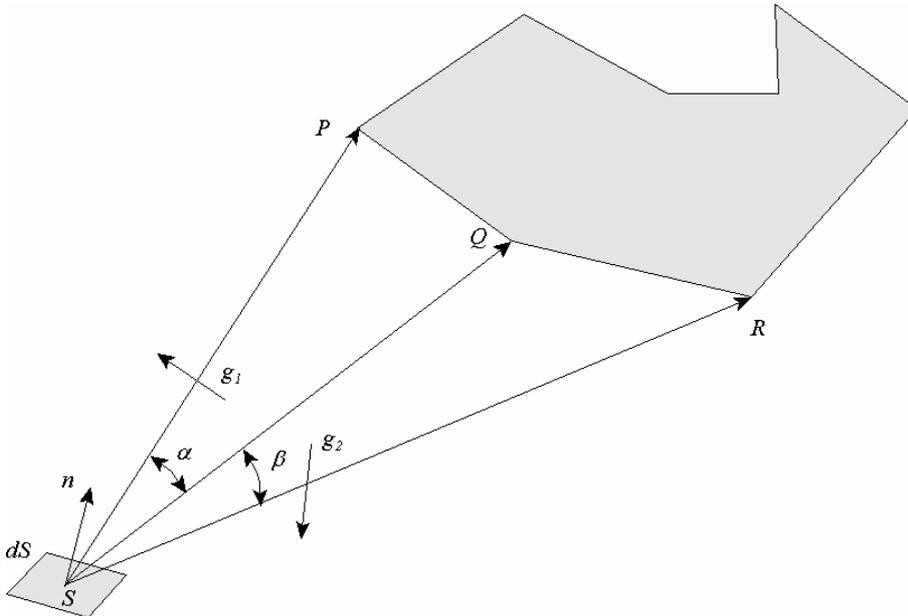


Figure 20 : Schéma géométrique de la formule de Lambert

Comme l'intégrale de surface de l'équation (34) est transformée en intégrale sur l'angle solide, on peut donc l'interpréter comme la projection orthogonale au point  $X_p$  sur le plan tangent à l'élément  $A_p$  de la projection de l'élément  $A_j$  sur l'hémisphère unitaire, divisée par la surface du cercle sous-tendu. Cette interprétation du facteur de vue est connue sous le nom d'analogie de Nusselt<sup>35</sup>.

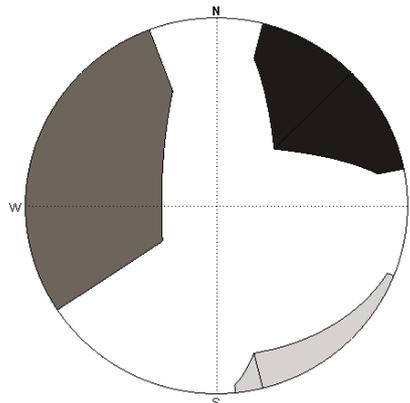


Figure 21 : Projection orthogonale de l'hémisphère

Si on est capable de projeter la scène sur l'hémisphère entourant un point, pour obtenir le facteur de vue, il suffit ensuite de le projeter orthogonalement sur sa base et de calculer les aires

<sup>35</sup> « Détermination graphique du rapport d'angle pour le rayonnement thermique », Wilhelm Nusselt, in B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, *Commentaires sur l'analogie de Nusselt*, Rapport Helio\_004\_fr, www.heliodon.net, 2009.

des éléments projetés. Ces aires rapportées à l'aire de la base de l'hémisphère sont les facteurs de vue ponctuels des éléments considérés (Figure 21).

Dans cette figure relative à la même scène que la Figure 14, on "voit" et on peut calculer les facteurs de vue de trois objets ainsi que celui du ciel.

En superposant sur ces objets le maillage utilisé pour la simulation et en répétant le calcul aux points d'intégration des éléments du maillage, on obtient tous les facteurs de vue nécessaires pour le calcul.

### *Illustrations en 2D*

Prenons l'exemple d'une cavité carrée de 3 m de côté (Figure 22). En divisant chacun des côtés par 3, on obtient un maillage de 12 éléments. On calcule le facteur de forme différentiel au centre de chacun de ces éléments. En considérant qu'on effectue une intégration de Gauss avec un seul point d'intégration (donc situé au centre de la maille), le facteur de forme peut être assimilé au facteur de forme différentiel.

Les conditions aux limites sont représentées à la Figure 22. La source (en rouge) est située au milieu du côté supérieur. Les côtés horizontaux dont la normale est dirigée vers le bas sont en bleu. Si la normale est dirigée vers le haut, ils sont représentés en gris. Les côtés verticaux sont représentés en orange.

Les résultats présentés à la Figure 23 sont les radiosités des 12 éléments pour un coefficient de réflexion de 0.5 et une source (exitance) de 1 Watt. La légende comporte tous les résultats du calcul selon les notations des formules (15) et (23).

Les indices de fermeture sont calculés comme suit. Pour chaque ligne de la matrice des facteurs de vue, on calcule la somme des colonnes. En principe, on doit obtenir une valeur égale à 1. Ce sera toujours le cas si l'enceinte est convexe et s'il n'y a pas d'obstacle. On répète ce calcul pour toutes les lignes de la matrice et on en calcule la moyenne, la valeur maximum et la valeur minimum des résultats par ligne. Ces trois valeurs doivent être égales à un. Comme attendu pour cette enceinte convexe, les conditions de fermeture sont parfaitement vérifiées.

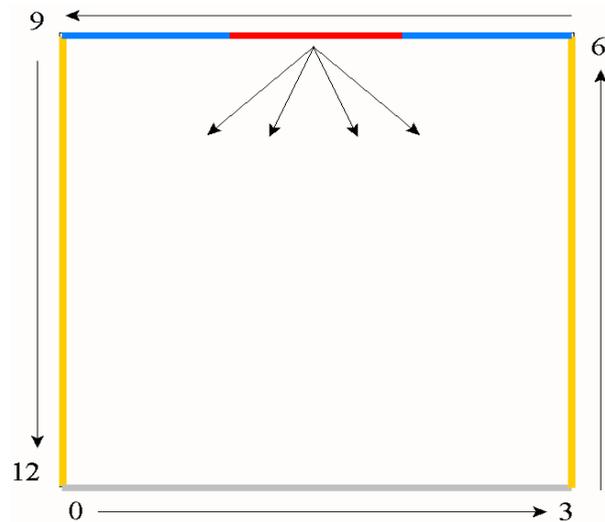


Figure 22 : Domaine carré

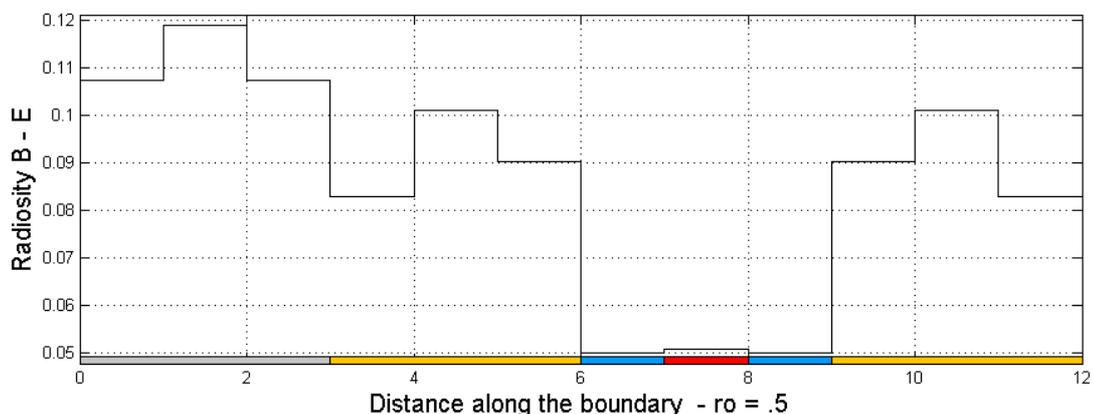


Figure 23 : Modèle à 12 éléments, puissance = 2.0328 W

Données et résultats pour le modèle à douze éléments :

<b>Données :</b>												
$E^T =$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$A^T =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Solutions pour chaque élément : radiosité et importance / longueur :</b>												
$(B-E)^T =$	0.1076	0.1190	0.1076	0.0828	0.1010	0.0903	0.0500	0.0506	0.0500	0.0903	0.1010	0.0828
$X^T =$	1.9836	2.0328	1.9836	1.9836	2.0328	1.9836	1.9836	2.0328	1.9836	1.9836	2.0328	1.9836

La solution des équations d'importance est illustrée à la figure suivante.

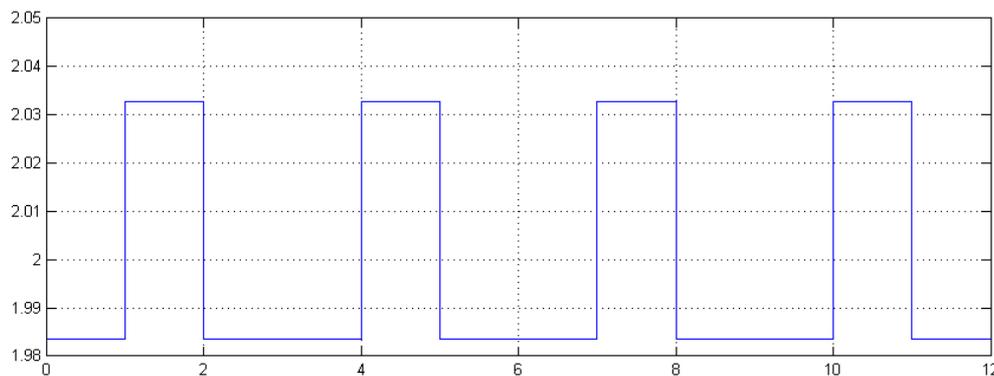


Figure 24 : 12 éléments, importance :  $X_i/A_i = 1 / (1-\rho) = 2$ , écart = 2.46 %

En augmentant le nombre d'éléments (Figure 25), on améliore la finesse de la représentation de la radiosité et la précision de la puissance radiative totale (21) en principe égale à celle de la formule (32).

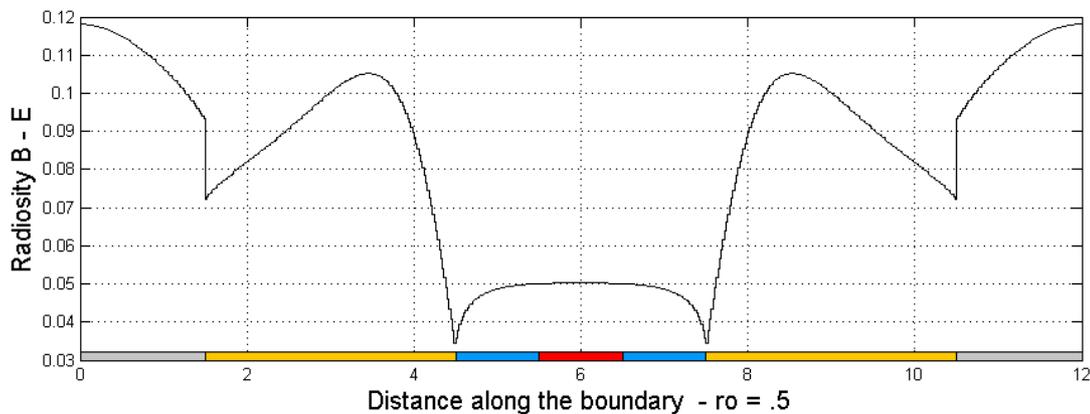


Figure 25 : 600 éléments, erreur sur la puissance = 0.1 %,

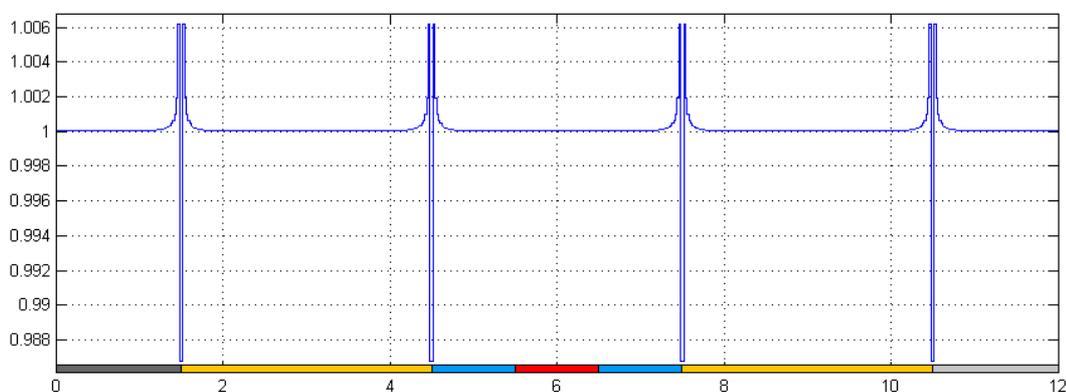


Figure 26 : 600 éléments, importance :  $(1-\rho) X_i/A_i$ , légère dégradation près des quatre sommets ( $\pm 2\%$ )

La Figure 26 montre l'évolution de la précision obtenue pour l'importance. Comme attendu, le résultat est égal à 1 sauf aux quatre coins du domaine où on observe une légère dégradation avec un écart inférieur à 2 %. Cette erreur est due au manque de précision du calcul des facteurs de vue des éléments de coin. Quand on réduit la taille des éléments, l'erreur reste constante, mais elle se concentre de plus en plus vers les coins et se limite aux seuls éléments voisins.

Si on reprend le calcul de la Figure 24 en améliorant la précision des facteurs de vue par l'utilisation de deux points d'intégration de Gauss, on obtient le résultat suivant.

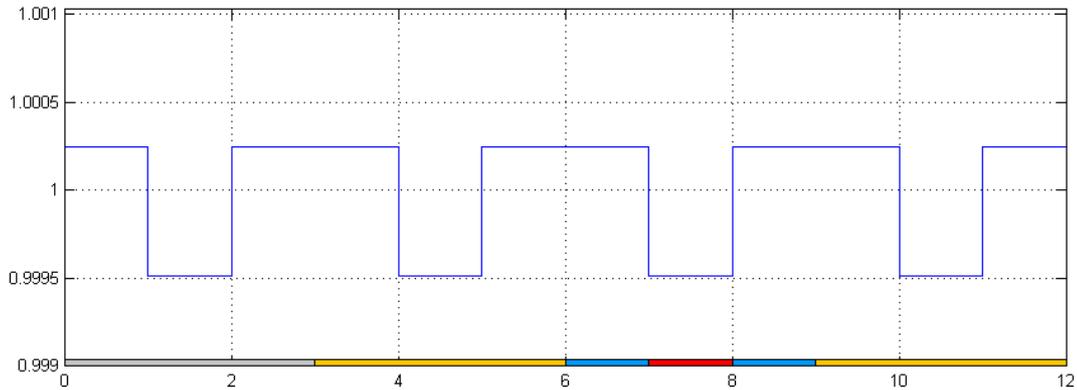


Figure 27: Importance  $(1-\rho) X_i/A_b$ , 12 éléments, 2 points de Gauss (écarts de 0.07 %)

Et avec trois points de Gauss, on arrive à une solution exacte.

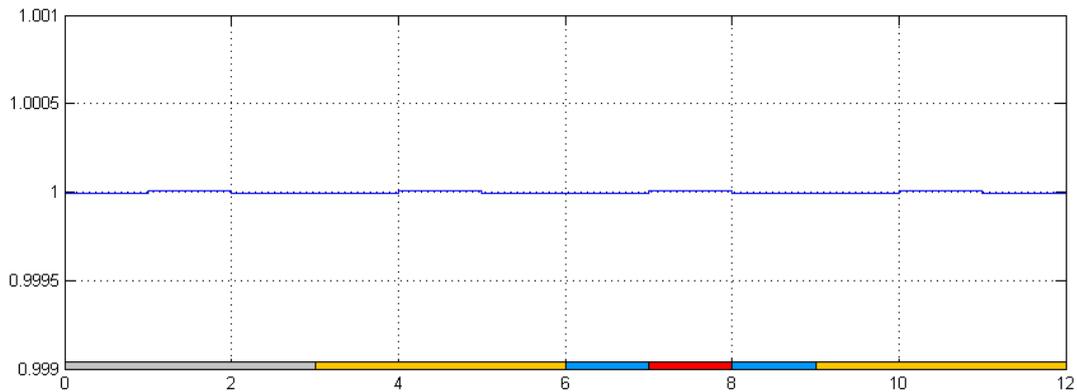


Figure 28 : Importance  $(1-\rho) X_i/A_b$ , 12 éléments, 2 points de Gauss (écarts de 0.001 %)

Les résultats complets avec trois points de Gauss sont repris à la Figure 29. On obtient une « solution exacte » pour cette discrétisation.

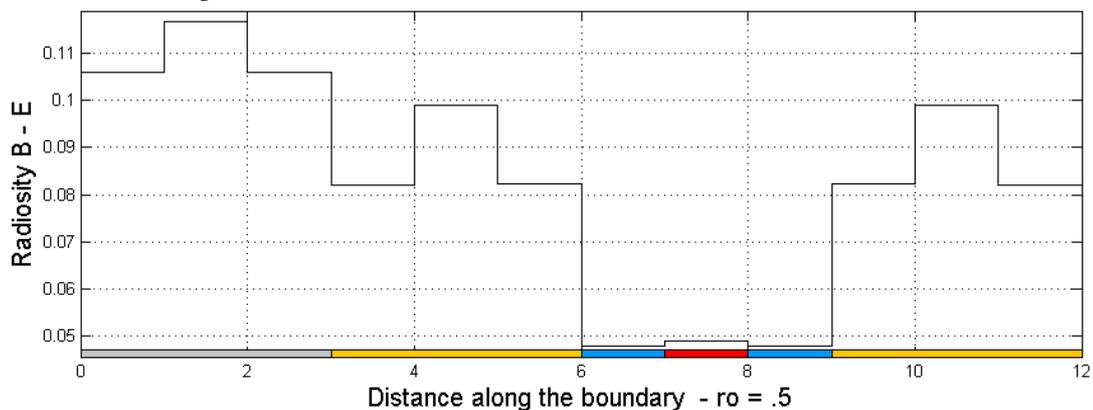


Figure 29 : 3 points de Gauss, 12 éléments, puissance = 2 Watt

Données et résultats pour le calcul avec trois points de Gauss :

<b>Données :</b>												
$E^T =$	0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0											
$A^T =$	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1											
<b>Solutions pour chaque élément : radiosité et importance / longueur :</b>												
$(B-E)^T =$	0.1059	0.1167	0.1059	0.0819	0.0990	0.0822	0.0480	1.0491	0.0480	0.0822	0.0990	0.0819
$X^T =$	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2											

Quand le nombre d'éléments augmente, un seul point de Gauss permet d'obtenir une précision satisfaisante ; la puissance et les indices de fermeture convergent vers leur valeur exacte (Figure 30). Dans ce graphique, l'origine est placée au milieu de la base. Le calcul des  $2400 \times 2400 = 5.76 \cdot 10^6$  coefficients de la matrice de radiosité est deux fois plus long que la résolution du système d'équations.

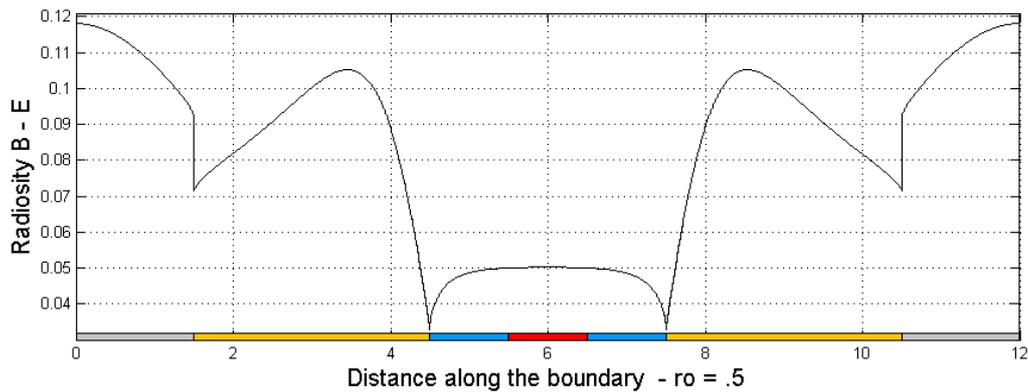


Figure 30 : 2400 éléments, puissance = 2 Watt

**Méthode de lancer de rayons**

Le tir est réalisé à partir du centre de chaque élément fini où on définit un hémisphère (demi-cercle en 2D) de rayon unitaire. On choisit  $N$  directions calculées à partir de fenêtres (ou cellules) d'égales dimensions disposées sur le cercle de base de l'hémisphère (diamètre du demi-cercle en 2D). Dans le tir déterministe, le rayon est calculé à partir des centres de ces segments considérés comme les projections orthogonales de fenêtres de l'hémisphère (cercle en 2D). Dans le tir de Monte-Carlo, on calcule la direction en prenant une position aléatoire dans chaque segment. Dans cette direction, on attribue un point au premier élément de la scène qui est rencontré. Chaque élément aura un facteur de vue égal au rapport entre le nombre d'interceptions qui le concernent et le nombre de tirs.

Dans les méthodes de tirs de rayons, la solution des tests de visibilité s'effectue en 3 dimensions pour chaque rayon tiré.

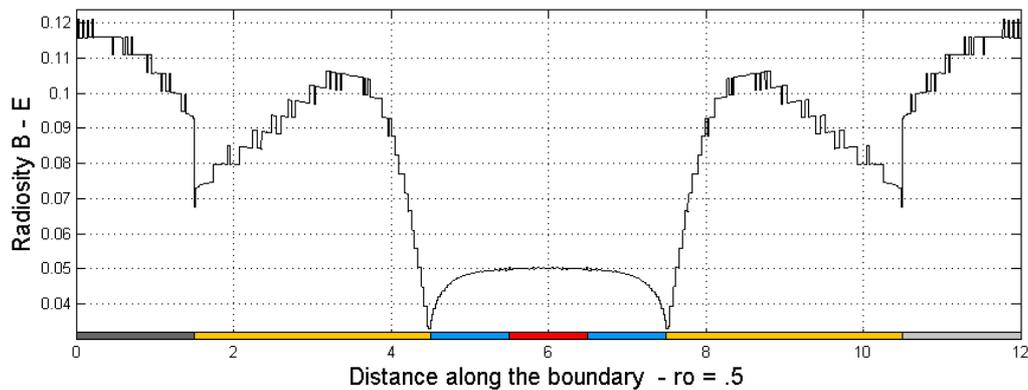


Figure 31 : Carré, 600 éléments, 100 rayons, puissance = 1.9971

Dans l'état actuel de l'algorithme et pour les tests réalisés, on ne voit pas d'avantage significatif à utiliser la méthode de Monte Carlo (méthode M.C.), (comparer la Figure 25 & la Figure 31). On voit cependant qu'en ne tirant que 100 rayons, c'est-à-dire beaucoup moins que le nombre d'éléments visibles à partir d'un point, on obtient une solution qui serait très utilisable moyennant l'utilisation d'une technique de lissage. Le résultat obtenu à la Figure 31 correspond aussi à une valeur de puissance très proche de la solution exacte. Dans les figures suivantes, on utilise la même discrétisation, mais on tire de plus en plus de rayons (100 : Figure 31, 500 : Figure 32, 5000 : Figure 34).

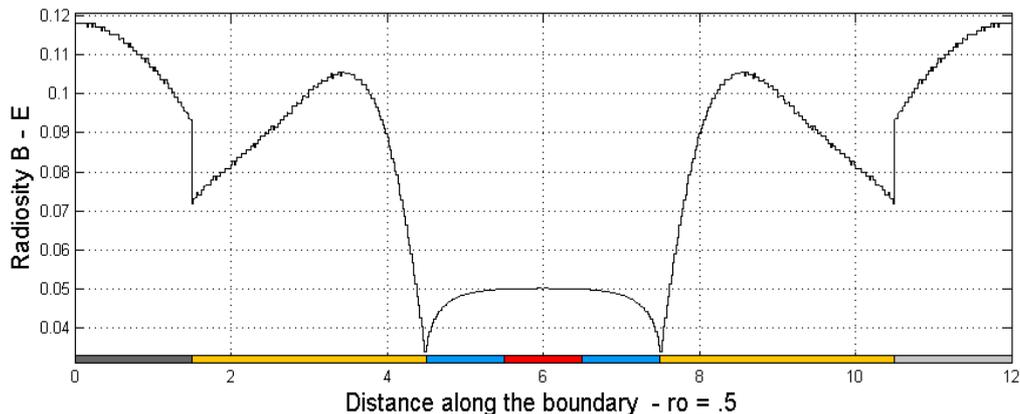


Figure 32 : Carré, 600 éléments, 500 rayons, puissance = 1.9992 W pour le tir déterministe et 2.0001 en M.C.

Avec 500 rayons, nombre à peine supérieur au nombre d'éléments visibles (450 éléments sont visibles depuis chaque point du contour), on obtient un résultat excellent ne présentant que de minuscules oscillations. Pour les tests effectués, il n'y a pas de différence significative entre le tir déterministe où on part des centres des cellules de la projection orthogonale du demi-cercle (hémisphère en 3D) et celle du tir de Monte-Carlo utilisant l'échantillonnage stratifié (tir à partir d'une position aléatoire dans les cellules de la projection orthogonale).

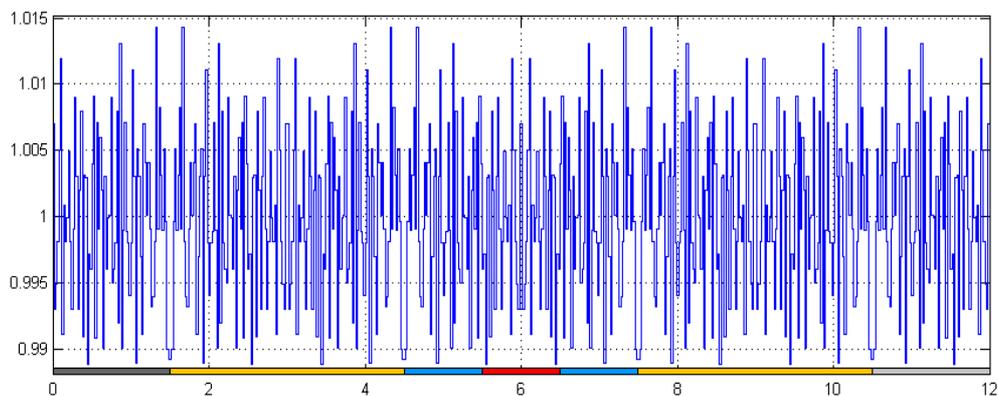


Figure 33 : Avec 500 rayons, pour le tir déterministe : écart d'importance de 2.54%, pour M.C. : 6 %

On observe simplement que, en accord avec la théorie, le tir déterministe offre une meilleure précision, mais que celle-ci est obtenue au prix de l'apparition d'artéfacts - non visibles dans l'exemple présenté - tels que le crénelage (« aliasing »).

Dans le graphique d'importance, le tir aléatoire présente des variations plus fortes que le tir déterministe, avec un écart maximum à la valeur attendue trois fois plus élevé.

Un dernier test a été réalisé avec un tir de 5000 rayons. Les deux résultats sont quasiment indiscernables, mais le temps de calcul, identique pour les deux tirs, devient prohibitif si on le compare au calcul réalisé avec la méthode exacte qui, pour rappel, consiste à calculer séparément

les facteurs de vue de tous les éléments de la scène. Notons que le graphique de la Figure 35 est quasiment identique à celui de la Figure 26

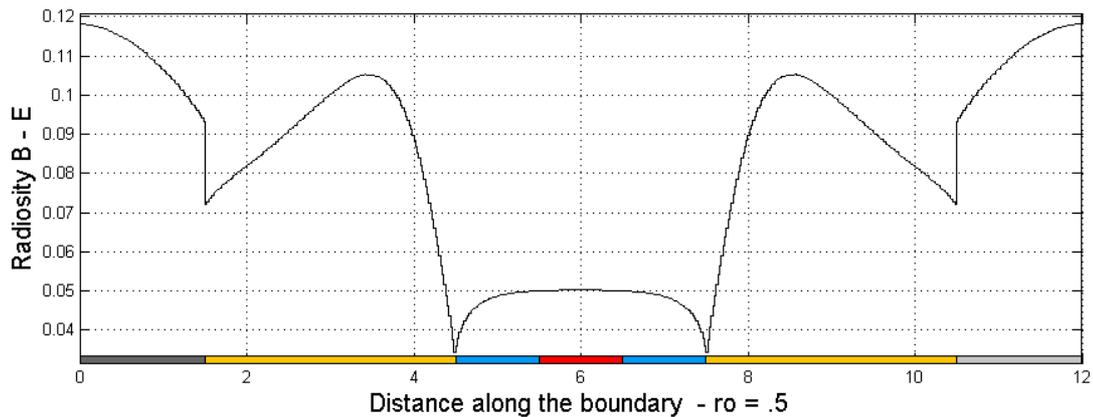


Figure 34 : Carré, 600 éléments, 5000 rayons,  $p = 2.0001$  Watt,  $p = 2.0001$  Watt

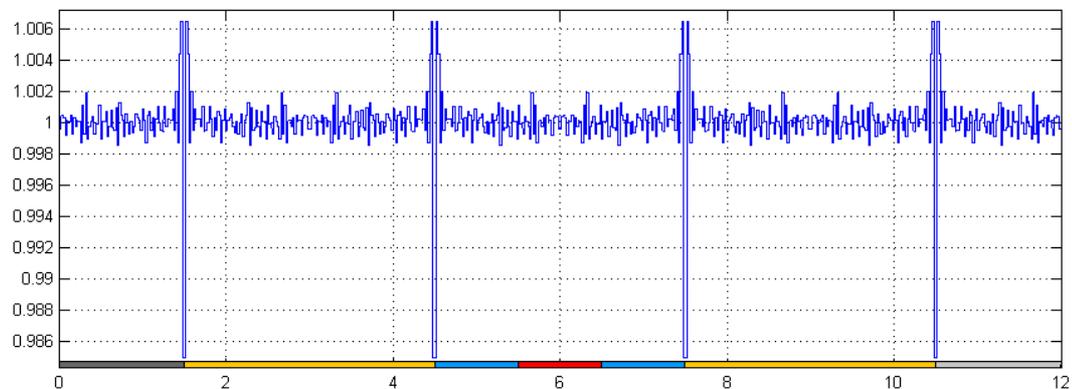


Figure 35 : Ecart 2.15 % au centre des cellules, 2.4 % en Monte Carlo

En conclusion de ces essais, comme attendu, le coût des tirs est le même pour la méthode déterministe et pour celle de Monte-Carlo utilisant l'échantillonnage stratifié. Un premier test qui devrait faire l'objet de vérifications futures indique que la génération des nombres aléatoires dans Matlab est nettement plus coûteuse pour une distribution normale que pour une distribution uniforme.

### ***Méthode de lancer de rayons ou méthode de projection***

Si on se limite au calcul des facteurs de vue, la différence fondamentale entre une méthode de lancer de rayon et une méthode de projection est que, dans la première, on doit résoudre le problème de visibilité à chaque rayon tandis que, dans la seconde, ce problème est résolu lors du calcul de la projection (de nombreuses techniques sont disponibles).

Dans la méthode de projection, le lancer de rayon est remplacé, une fois la projection effectuée, par une évaluation de la surface relative de chaque élément de la scène visible sur cette projection. Si on mémorise toutes les projections orthogonales des hémisphères de tous les points de calcul, on obtient une visualisation de tous les facteurs de vue de la discrétisation.

En remplaçant les projections orthogonales par des projections stéréographiques, on a la possibilité de simplifier considérablement les calculs, car les contours des éléments projetés sont formés uniquement de segments de droites et d'arcs de cercles<sup>36</sup>.

<sup>36</sup> « The universal projection for computing data carried on the hemisphere », B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Computer-Aided Design, Volume 43, Issue 2, Pages 219-226, February 2011.

En conclusion, utilisée de cette manière et à conditions d'optimiser les opérations de quadratures dans les projections stéréographiques, on disposerait d'une méthode rapide et très efficace de calcul des facteurs de vue et finalement de solution des équations de radiosité.

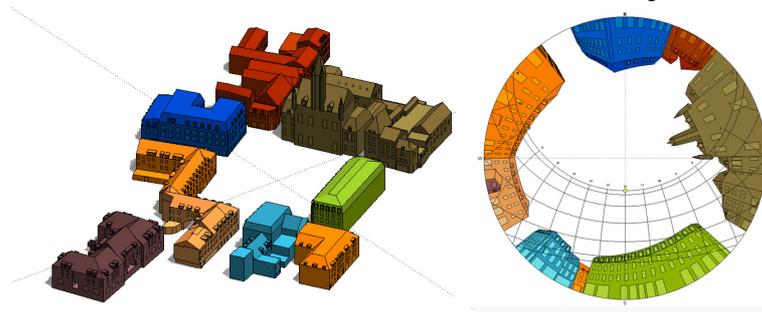


Figure 36 : Modèle GIS de la Grand-Place de Compiègne et stéréographie (t Héliodon 2)

### *1.3.3 L'accompagnement du projet*

Longtemps, les architectes se sont contentés, pour évoquer la protection solaire, de dessiner sur une coupe orientée du nord au sud les deux rayons extrêmes du midi solaire aux solstices d'hiver et d'été. Comme le soleil passe alors brièvement plein sud (plein nord dans l'hémisphère sud), le dessin est correct, et il montre comment le soleil brûlant de l'été est arrêté, tandis que celui de l'hiver, bienvenu, rentre profondément dans le bâtiment projeté. C'est du reste l'affirmation que Xénophon mettait déjà dans la bouche de Socrate, vers 400 avant JC. Cependant, il ne s'agit que d'un instantané, et le soleil d'été, un peu avant ou un peu après midi, peut très bien entrer par la fenêtre pour un temps et dans une quantité que seule l'expérience de l'architecte peut alors maîtriser.

Or, aujourd'hui, les étudiants d'architecture voyagent, travaillent sous de niveaux climats et doivent bien souvent prendre des décisions importantes sur des sujets qu'ils ne maîtrisent pas encore. De plus, les architectes feuilletent beaucoup les revues, et s'inspirent de belles réalisations étrangères, souvent sans prendre garde que celles-ci demeurent sous des latitudes très différentes. Ainsi, pour ne donner qu'un exemple, la mode des ouvertures zénithales imitées d'Alvar Aalto, architecte finlandais, a causé bien des surchauffes dans les vestibules et les cours couvertes de Barcelone, que le Soleil surplombe de beaucoup plus haut qu'il ne le fait à Helsinki...

C'est seulement au début des années 1930 que deux inventions sont apparues pour l'aide à la maîtrise des trajets solaires dans le projet d'architecture. L'héliodon est une table avec deux axes de rotation, sur laquelle on place une maquette sous une lampe fixe figurant le soleil ; les rotations de la table simulent les trajets solaires sous une latitude et pour une journée données. On peut photographier les ombres sur la maquette, mais on n'obtient, encore une fois, que des instantanés. Le diagramme solaire, en revanche, permet de synthétiser toute l'information annuelle (mais seulement pour un point). Il semble que l'on a d'abord utilisé la projection orthogonale. La projection stéréographique, plus facile à dessiner, n'est apparue qu'après-guerre (mais je n'en ai pas encore retrouvé l'origine précise). Ceci dit, l'héliodon et le diagramme solaire ont donné lieu à un très grand nombre d'exercices académiques, mais n'ont que très rarement franchi les portes des bureaux d'architecture.

A la fin des années 1990, la simulation numérique a commencé à se diffuser, mais surtout avec des logiciels de rendu réaliste qui ne donnent, eux aussi, que des instantanés. Les logiciels d'analyse ont, jusqu'à une date récente, été jugés trop difficiles à manipuler dans le projet.

Dans la première version du logiciel Héliodon (2003), apparaissaient déjà les deux représentations complémentaires : la vue en plan ombrée, spatiale mais instantanée, et la stéréographie, temporelle mais ponctuelle. L'idée principale du programme était de combiner ces 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. On arrive, en quelque sorte, à contrôler simultanément les cinq dimensions du problème de l'ensoleillement (les trois dimensions de l'espace, le temps de la journée et le temps de l'année).

Dans le logiciel Heliodon 2 (2006), entièrement reformulé, on a d'abord permis de jouer sur les propriétés de nouvelles projections (isochrone, équivalente, orthogonale), et d'en déduire trois quantités de conception ponctuelles : le nombre d'heures d'ensoleillement, l'angle solide sous lequel est vu le ciel (quantité attachée au volume), le Facteur de Vue du Ciel (quantité attachée à une surface). Avec ces trois quantités seulement, il est possible de déterminer des formes précises permettant, par exemple, d'éviter l'ensoleillement direct tout en maximisant l'ouverture au ciel, et donc l'entrée de lumière diffuse. Pour la plupart des projets, même complexes (ensembles de bureaux, hôpitaux, écoles, maisons conçues sur différents plans,...), ces trois quantités sont suffisantes. Bien sûr, il faut disposer ingénieusement les points d'études (pas forcément un seul point au centre de la pièce étudiée), mais ce travail lui-même oblige à mieux voir dans l'espace et dans le temps.

Nous avons ensuite ajouté des calculs sur des cartes et des diagrammes d'évolution (courbe de charge de l'ensoleillement sur une surface). Les premières devaient aider à la présentation finale du projet, et les seconds permettent de concentrer encore l'information, de manière à obtenir les diagrammes de contrôle les plus synthétiques. Or, dès que ces cartes ont été introduites, beaucoup d'utilisateurs ont entrepris de négliger la partie interactive du logiciel, et d'introduire directement des géométries complexes réalisées dans des programmes de CAO, qu'ils espéraient ainsi justifier sans effort, plutôt que de les contrôler et de les améliorer par itération dans Heliodon 2.

Ces observations conduisent à deux conclusions importantes sur l'aide à la conception.

1. Pour suivre le projet d'architecture, il est nécessaire de décomposer le plus possible le phénomène physique étudié. Les quantités de conception ainsi obtenues sont à l'inverse des quantités d'observation, toujours globalisantes. Ainsi, le Facteur de Lumière du Jour permet de qualifier à bon compte un projet, mais si l'on veut vraiment bien faire, il faut conduire un double processus itératif, d'abord sur la lumière directe, puis sur la lumière diffuse, qui seul permettra de trouver le bon compromis (il est bien connu que les protections solaires ont l'inconvénient de limiter la vue du ciel, et donc d'assombrir le local qu'elles protègent).
2. L'utilisateur doit être formé. C'est un problème sérieux à prendre en compte pour la diffusion du logiciel. La majorité des anciens étudiants formés à Heliodon 2 continuent de l'utiliser dans leur vie professionnelle, tandis que les utilisateurs non formés au logiciel ont beaucoup de mal à en saisir les potentialités, malgré l'existence d'un manuel très détaillé.

Les évolutions suivantes du logiciel l'ont porté peu à peu vers l'analyse, pour des utilisateurs ingénieurs, et vers l'échelle urbaine (prise en compte du relief, importation et prétraitement de géométries complexes, introduction des données climatiques en post-traitement pour l'obtention des apports solaires intégrés sur l'année, dimensionnement et orientation de panneaux solaires). Toutefois, dans ce logiciel et dans la suite COMRAD, nous essayerons de toujours préserver les qualités acquises avec l'aide au projet : limpidité des calculs, interactivité poussée le plus loin possible, qualité graphique et diagrammes synthétiques. En effet, même dans des travaux de recherche plus fondamentale, faciliter l'interprétation des résultats est un gain toujours appréciable, et parfois décisif.

## II Recherche théorique

### II.1 La géométrie sensible

Tous les jours, nous entendons des morceaux de musique apparemment très variés, dont l'ensemble a cependant été composé avec des règles invariables et très précises, celles du système tonal, déjà parfaitement établies à l'époque de Jean-Philippe Rameau. Or, ce système n'est pas le seul possible : d'autres époques, d'autres civilisations, ont connu des gammes et des règles différentes.

Le système tonal est construit sur des propriétés fortes de l'arithmétique, de la physique et de la physiologie : la quasi-fermeture de l'échelle des quintes au douzième intervalle, la structure harmonique des sons périodiques et l'aptitude particulière de l'oreille humaine à saisir cette structure. On peut pratiquement démontrer que ce système de composition est optimal par sa richesse expressive. Mais il a fallu plusieurs siècles pour que le public européen s'y forme, ce même public qui, aujourd'hui, n'entend que du bruit dans les œuvres qui se sont dégagées du système tonal et de sa hiérarchisation des notes. Cela montre bien qu'il y a eu une double modélisation (où *idéalisation*) du phénomène sonore et de son écoute.

De même, la perspective centrale, dont les règles géométriques n'ont été établies qu'en Occident et très tard, s'impose à nous comme une évidence, et il est vrai qu'elle est la seule à respecter l'ensemble exact des structures fondamentales de la vision : rapport anharmonique (cohérence de la scène sous différents points de vue), rapport harmonique (régularité), invariance des droites et des coniques. Cependant, l'Orient a longtemps préféré la projection parallèle. En regardant la suite des miniatures persanes médiévales de la BnF<sup>37</sup>, et en les comparant à quelques miniatures occidentales, on peut retrouver quelques un des éléments qui ont mené à un modèle visuel radicalement différent.



Figure 37

A gauche : peu après l'an mil, en Europe, quatre cavaliers sont dessinés sur un fond abstrait (mais avec un ciel) de quatre bandes colorées. C'est pratiquement plat, il n'y a que de très rares superpositions de figures.

A droite : Même composition en Perse, cinq cents ans plus tard. Ici, le fond est un paysage de roches et de fleurs, et quatre plans sont superposés : les cavaliers, la colline, les témoins (plus grands, même s'ils sont à l'arrière, car ce sont des prophètes), le ciel bleu.

<sup>37</sup> [mandragore.bnf.fr/html/accueil.html](http://mandragore.bnf.fr/html/accueil.html). Pour les références précises des illustrations de ce chapitre, voir "Geometria sensible", B. Beckers, [www.heliodon.net](http://www.heliodon.net).



Figure 38

A gauche : cent ans avant Brunelleschi, la perspective centrale est en marche dans les miniatures françaises; le fond est toujours abstrait (mais aussi réaliste), le pavement converge, et la figure génératrice de la perspective centrale, l'hexagone (trois directions dans l'espace, dont une disposée frontalement) s'inscrit dans la profondeur suggérée.

A droite : en Perse, la présence de l'hexagone ne change rien : toujours cette nature sinueuse...



Figure 39

A gauche : les constructions humaines sont ramenées à des éléments frontaux (non déformés) : des droites, des parallèles, le cercle et l'angle droit du rectangle de la Qa'ba. Ce sont, précisément, les figures archétypales de la vision humaine.

A droite : Dans la ville, ces figures dominent, toujours opposées à la nature sinueuse (ici, un arbre) ; on remarque que les figures géométriques appartiennent soit au plan horizontal (le sol), soit au plan vertical (le mur), et que ces deux plans sont comme dépliés (l'angle droit qui les unit est ramené à 180 degrés), de manière à ce qu'ils apparaissent simultanément frontaux dans l'image.

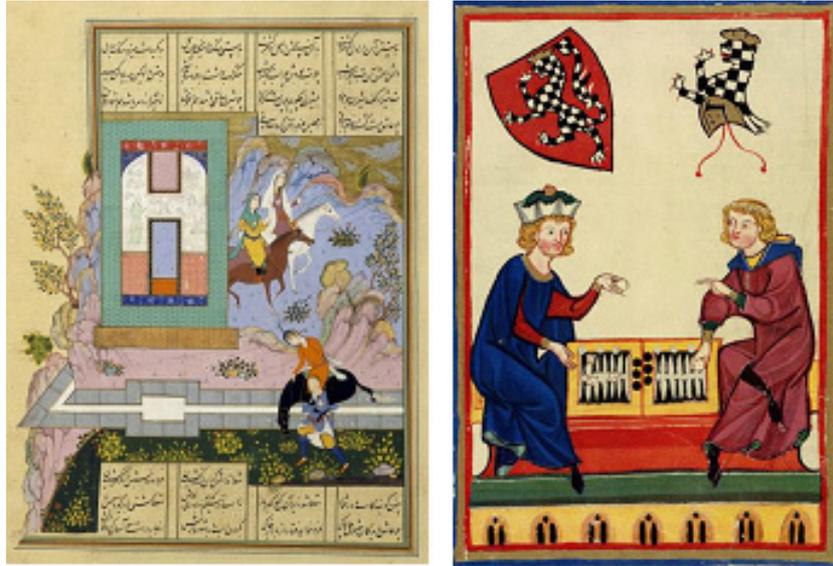


Figure 40

Or, le pliage (ou plutôt : le dépliage de la scène) est l'un des recours les plus anciens (on le trouve déjà, à Lascaux, dans les sabots et les cornes des animaux); il est d'ailleurs également très courant dans l'Europe médiévale. La projection n'est que l'un des trois recours de la géométrie pour passer de trois à deux dimensions. Le dépliage (le *développement*) en est un autre.



Figure 41

Donc, dans la miniature persane, le souhait de ne pas déformer les coniques et les rectangles, autant que faire se peut, amène à travailler sur ce qui sera l'épure de la méthode de Monge : un espace horizontal et un espace vertical qui, dans les intérieurs, sont clairement séparés par une ligne de terre. Pour chaque assiette du repas de la figure de droite, le peintre doit décider auquel des deux espaces elle appartient : elle sera vue de profil ou bien d'en haut.



Figure 42

A gauche, dans la plus ancienne des miniatures de la série, les deux droites de bout qui délimitent le sol sont convergentes. Cette innovation perspective n'est pas récompensée : à cause des conventions de la miniature persane, tous les personnages semblent flotter : ça ne marche pas du tout. On devra abandonner cette idée...

A droite : les miniaturistes persans utilisent souvent la *coupe* (ici pour montrer les sept dormants dans la caverne), le troisième recours de la géométrie pour passer du 3D au 2D, que les européens du Moyen Age semblent ignorer, ou s'interdire (je n'en ai pas retrouvé d'exemples).



Figure 43

A gauche : pour introduire de nouvelles directions dans l'épure, on peut marquer des obliques (ici, les battants de porte), et l'on est ainsi conduit tout naturellement vers l'axonométrie – la perspective parallèle.

A droite, une isométrie presque parfaite, qui s'intègre remarquablement bien au modèle oriental du regard.



Figure 44

A gauche : dans l'Inde des Moghols, une axonométrie oblique (perspective cavalière).

A droite ; le siège de Kandahar, où l'on retrouve des personnages aux dimensions accordées à leur importance hiérarchique ou scénique, qui entrent sans conflit dans l'espace axonométrique.

Finalement, les deux dernières images illustrent clairement la différence entre les deux modèles de la vision.



Figure 45

A droite : au XV<sup>ème</sup> siècle, la vision perspective européenne est parfaitement contrôlée, mais au prix d'un dallage régulier de la houle ; ainsi, « **les quantités et les distances ont concordable différence** »<sup>38</sup>.

A gauche : En revanche, la vision axonométrique, qui permet de maintenir une nature sinueuse, rend l'Orient maître des nuages et des tempêtes...

<sup>38</sup> « De Artificiali Perspectiva », Jean Pélerin dit Viator, (ca 1435-1524), édité à Toul par Pierre Jacobi (troisième édition, 1521), BnF, RES-V-169.

## II.2 Modélisation du regard

Que le regard balaie la scène, à la manière d'un radar ou d'un scanner, pour y prendre ses impressions, semble relever de la simple intuition. Les rayons euclidiens, cependant, ne sont pas des regards qui passent d'un objet à l'autre, mais plutôt les constituants d'un seul moment du regard arrêté sur un objet. Indénombrables, insaisissables et forcément inconscients, ils figurent un second balayage à l'intérieur du premier. C'est comme si le regard anticipait hors du temps ce qu'il fait manifestement dans le temps. Il s'agit donc d'abord d'une analogie. Or, ces rayons qui, selon Euclide, partent de l'œil, divergent et s'arrêtent aux objets, et qui sont donc intrinsèquement orientés, ne peuvent en réalité se concevoir que dans le temps. C'est pourquoi ils sont exclus de la Géométrie, selon l'injonction de Platon. Ils restent dans le temps, mais poussés à la limite du presque instantané, et le « truc » qui permet que ça marche, qui aurait certainement déplu à Platon, mais qu'Euclide est obligé d'introduire dans son modèle, c'est la persistance rétinienne : *aucun des objets vus ne se voit entièrement dans un même temps, mais il semble que oui parce que les rayons visuels se propagent rapidement* (Optique, proposition I). C'est aussi le problème – majeur – de l'obtention d'une image continue par un lancer de rayons discret.

L'optique d'Euclide est une modélisation du regard, comme la perspective centrale et l'axonométrie. Ces modèles ne sont pas complets, parce qu'ils évacuent complètement le problème de la couleur. Léonard de Vinci a suggéré le modèle de la perspective aérienne, ou atmosphérique, construite sur le contraste chaud-froid, qui n'est que l'un des sept contrastes de la couleur. L'optique de Newton construit un premier modèle physique et perceptif du contraste de la couleur en soi. L'Art de la Couleur de Johannes Itten constitue, à ce jour, le modèle perceptif le plus complet fondé sur les sept contrastes de la couleur.

Depuis quelques années, l'universalisation du système rouge-vert-bleu/cyan-jaune-magenta, qui permet de reproduire les couleurs sur les écrans et les imprimantes, a pu donner l'impression d'un progrès définitif dans le contrôle chromatique. Il n'en est rien : ce système ne peut permettre de reproduire tout ce que l'on peut voir, et, de plus, il fausse à sa manière l'équilibre des blancs, les complémentaires et les modèles culturels antérieurs.

Dans les exercices où les étudiants travaillent librement la couleur au pinceau, on reconnaît inmanquablement l'origine latino-américaine, asiatique ou européenne de chaque composition. Nous sommes tous héritiers de modèles du regard qui évoluent très lentement (particulièrement pour la couleur, qui semble aussi profondément ancrée dans ces modèles que la prononciation – l'accent – dans ceux du langage), et il est plus que probable que ces modèles survivront aux aléas de la technique actuelle.

Pour cette raison, la couleur est la limite de ce que j'ai expliqué dans la première partie de cet exposé. Il ne nous est pas possible de produire un outil numérique qui accompagne le projet d'architecture dans la dimension fréquentielle du rayonnement lumineux. Parce que l'architecture construite reçoit toutes les lumières et toutes les couleurs de la nature, et que nous ne savons pas les représenter.

Dans la troisième partie, j'exposerai nos recherches actuelles dans le domaine du rayonnement à l'échelle urbaine. Dans l'approche énergétique, à laquelle nous nous limitons pour le moment, où tout peut être traduit en pertes et gains exprimés en Joules, la couleur n'apparaît que de manière très simplifiée : la thermique peut seulement suggérer, par exemple, que les toits soient plus clairs et les murs plus obscurs. Les domaines de l'éclairage urbain et de l'acoustique urbaine seront laissés pour une autre occasion, car ils demandent de développer les modèles perceptifs bien au-delà de ce qui est ici suggéré.

Revenons cependant aux quatre méthodes décrites dans la partie précédente pour simuler le rayonnement, en nous demandant maintenant quels sont leurs avantages comparés quant à la modélisation du regard et à l'accompagnement du projet d'architecture. Ces méthodes sont en fait très proches les unes des autres, et souvent imbriquées dans les algorithmes, mais il est utile de préciser d'abord leurs spécificités propres.

### ***La méthode des rayons***

Elle est *a priori* la plus intuitive, et celle qui décrit le rayonnement de la manière la plus littérale et la plus complète. Il est facile de décomposer par l'imagination un front d'onde donné en une multitude de rayons; il suffit ensuite de suivre chacun d'eux jusqu'à l'éventuelle interception d'un récepteur. On peut combiner des rayons visuels et des rayons lumineux. Il n'y a pas de limitation sur les trois modèles – physique, géométrique et perceptif – qui demeurent clairement distingués. Si le tir est aléatoire, on a immédiatement une estimation de l'erreur (il suffit de procéder à plusieurs tirs, puis de comparer les résultats). Cependant, dès qu'il y a de la diffusion, laquelle exige, pour être bien décrite, de tirer à nouveau un grand nombre de rayons à chaque impact, la simulation devient extrêmement lente. Un autre inconvénient, beaucoup plus grave, est que l'on n'apprend rien de la simulation en elle-même : toutes les propriétés sont dispersées en une infinité de rayons, tous singuliers. Dans la pratique, le lancer de rayons devient vite une technique lourde et opaque, une manière de s'assurer du résultat en renonçant à toute compréhension plus globale, et donc à toute possibilité de mettre à profit les propriétés du système pour optimiser l'algorithme initial.

### ***La méthode des images***

Elle n'est utilisable que pour la réflexion spéculaire, et a donc un usage très limité dans le domaine de la lumière : étude des miroirs plans et courbes (la *dioptrique* d'Euclide) ainsi que de leurs combinaisons, avec quelques applications immédiates pour la conception de réflecteurs et de luminaires. A la différence de la méthode des rayons, elle conduit à s'interroger sur les propriétés du modèle géométrique (concavités et convexités, courbes accompagnatrices telles que l'orthotomique ou la caustique) et met directement en relation les théories du rayonnement géométrique et du signal. En revanche, c'est la plus mauvaise pour simuler des sources et des récepteurs complexes, et, par conséquent, pour aborder le modèle perceptif, en particulier dans ses aspects physiologiques liés à la sensibilité spatiale.

### ***La méthode des projections***

Elle applique à la lettre la formule de Léonard de Vinci : *l'univers entier rapporté à un œil, et cet œil à un point*. Elle est à la fois le principe de la méthode des rayons et, par l'analogie de Nusselt, de la radiosité. Elle s'identifie au modèle du regard développé par les perspectivistes, pour lesquels toute image est le résultat d'une double projection, de la lumière sur la scène, puis de la scène dans le regard. De fait, la photographie et le cinéma ne sont que de la projection. La méthode des rayons ne l'emporte *a priori* que pour l'analyse, lorsque l'œil est provisoirement exclu et que l'intérêt se porte sur la propagation de l'onde (rayons) ou sur l'interaction entre les surfaces de la scène (radiosité). En revanche, pour un espace que l'on peut connaître en quelques coups d'œil (un bâtiment, éventuellement décomposé en parties indépendantes du point de vue de la lumière, par exemple en étages), si l'on sait où situer les quelques points d'observation correspondants, alors les quelques projections associées donnent une connaissance directe, immédiate et synthétique de la configuration, et peuvent encore être réduites à une signature. Cependant, tous ces avantages se perdent si les interactions entre l'onde et la scène prennent le dessus (réflexions multiples), car la méthode des projections, c'est un peu comme si le modèle perceptif vampirisait les modèles physique et géométrique. Si la physique résiste, on est obligé de développer l'algorithme vers les rayons, et si c'est la géométrie, vers la radiosité.

## *La radiosité*

Cette méthode a une histoire courte et mouvementée : née dans la thermique, elle a connu la gloire dans le domaine de l'illumination globale (rendu réaliste), et revient maintenant vers des applications thermiques, en particulier à l'échelle urbaine. Pour le rendu, son principal défaut est de ne pouvoir traiter, en principe, que la réflexion parfaitement diffuse. C'est pourquoi on l'a bientôt hybridée avec la méthode des rayons, dans des algorithmes de plus en plus complexes, qui ont transformé les logiciels en des boîtes noires, dont l'utilisateur ne sait rien. Aussi, ces logiciels, merveilleux outils de représentation, sont-ils pratiquement inutiles pour l'aide au projet d'architecture, où il faut décomposer le rayonnement en quantités de conception que l'on doit pouvoir manipuler l'une après l'autre et interpréter sans ambiguïté. En revanche, ces mêmes logiciels ont un très grand potentiel didactique pour aborder les modèles perceptifs, car on y contrôle à la fois les propriétés optiques des lampes, des matériaux et des récepteurs. Avec une seule exception – mais de taille –, due au support informatique et donc actuellement indépassable : la couleur.

Cependant, ces applications ont fait oublier le caractère propre de la méthode initiale, telle qu'elle a été décrite ici dans sa pureté originelle. La radiosité procède en deux étapes : d'abord, la construction de la matrice des facteurs de vue, puis la résolution de l'équation intégrale, ramenée à un système linéaire et donc à l'inversion de la matrice. Celle-ci peut être très grande, en particulier dans les applications urbaines, mais elle est aussi, dans ce cas, très creuse (chaque surface voit très peu de surfaces). Donc, comme tout le monde en convient, l'essentiel est dans la détermination des facteurs de vue, qui sont des quantités purement géométriques, mais dont la définition est énergétiquement.

Que représente cette matrice ? La façon dont chaque élément du modèle géométrique préalablement maillé « voit » tous les autres. Dans cette étape, les sources (les lampes) n'ont pas encore été définies, puisqu'elles n'apparaissent, comme exitances, que dans le second membre de l'équation. Donc, la matrice représente en fait la ***prédisposition de l'espace à accueillir la lumière***. Elle décrit toutes les interactions possibles, avant même de savoir quelle sera l'excitation du système. Dans ce sens, la méthode de radiosité consiste à mener le plus loin possible un raisonnement purement géométrique, en rejetant la physique tout à la fin du processus.

Or, cet ordre correspond parfaitement au projet d'architecture, où l'on commence par raisonner sur l'emplacement disponible, l'utilisation prévue, la distribution des espaces tridimensionnels, avec beaucoup d'itérations. On pourrait alors comparer les différentes possibilités géométriques qui émergent sur leur capacité à distribuer la lumière, choisir celle qui offre le meilleur « espace de conception », puis, seulement, optimiser dans cet espace en jouant sur les différentes variables géométriques : la forme, les coefficients de réflexion, les ouvertures (éclairage), la position des lampes (éclairage), et enfin les propriétés des vitrages et des lampes (exitances).

Un tel logiciel, qui n'existe pas aujourd'hui, permettrait enfin de partir à la recherche des quelques modèles typologiques qui caractérisent l'illumination des bâtiments. Cette idée peut surprendre : devant la variété infinie des formes architecturales et de leur jeu avec la lumière, on pense d'abord qu'il est impossible de les réduire à quelques modèles typologiques, à l'exemple de ce qu'on a montré en acoustique des salles. Pourtant, un examen attentif des réalisations d'architectes contemporains particulièrement soucieux de travailler ce domaine du rayonnement montre, sans aucun doute, que de tels modèles existent.

C'est l'un des résultats qui ressort des travaux que j'ai dirigés en architecture à l'Université Polytechnique de Catalogne, et qui font l'objet du chapitre suivant.

## II.3 Le projet d'architecture<sup>39</sup>

### *L'architecture et la lumière*



Figure 46 : Claudia Ribera (2005), Maricela Bonilla (2005), Tannya Pico (2007)

Dans un bâtiment, la lumière naturelle entre généralement par des fenêtres latérales, de sorte que le champ lumineux se dégrade vers le centre ou le fond de la pièce. En revanche, la lumière artificielle est le plus souvent produite par une lampe centrale, et le champ se dégrade vers la périphérie. Dans la plupart des bâtiments, entre le jour et la nuit, le champ lumineux s'inverse donc complètement. Pour un étage du musée de Bregenz, Peter Zumthor a cherché à produire un effet différent : les murs sont complètement opaques, et il y a un faux plafond en verre dépoli, surmonté d'ouvertures invisibles depuis la salle. La lumière naturelle entre par ces ouvertures, et, subissant des réflexions entre le faux et le vrai plafond, pénètre progressivement et de manière diffuse dans la salle, qui se trouve ainsi éclairée depuis sa périphérie, par une lumière manifestement naturelle (lorsqu'un nuage passe devant le soleil, tout s'assombrit dans la salle, même si on n'y voit pas le ciel), alors qu'il n'y a pas de fenêtres. Le public du musée est troublé, ce qui montre bien qu'il y a un modèle typologique bien installé dans ses habitudes, et qu'on ne s'attend pas à ce que ce modèle presque omniprésent par ailleurs puisse être soudain contredit.

Actuellement, aucun logiciel d'aide au projet ne peut accompagner ce genre d'idées. Il faudrait appliquer une méthode de radiosité, qui permette de prédire la forme (celle choisie par l'architecte est très simple, parallélépipédique), puis de contrôler les transmissions et réflexions diffuses, comme décrit au chapitre précédent.

Les œuvres de Tadao Ando, James Turrell, Steven Holl, Jean Nouvel et Dani Freixes abordées par Maricela Bonilla dans « Voir, Regarder, Contempler » se prêtent mieux à une analyse par composante, ce qui a d'ailleurs motivé leur choix. Dans le cas de la Chapelle de la Lumière, de Tadao Ando, on peut vraiment reconstruire tout le projet à partir de la théorie des trois sources (principale, de renfort et de fond) des photographes, avec la difficulté ajoutée que le soleil, contrairement aux projecteurs, se déplace au long de la journée et de l'année, mais avec l'avantage préservé que dans une chapelle, comme au théâtre ou chez le photographe, on peut maintenir le public assis, et forcer son regard dans une direction donnée. Cette chapelle appartient donc entièrement, quant à son illumination, à un modèle précis de l'éclairage architectural que l'on pourrait appeler *scénographique*.

Plus tard, Tannya Pico, dans « La lumière, thème central de l'architecture » a pu bénéficier du logiciel Heliodon 2, ce qui lui a permis de réaliser une analyse très fine de plusieurs œuvres d'Alberto Campo Baeza, un architecte dont les idées sur la lumière volumique, oblique ou horizontale se prêtent particulièrement bien à une analyse par les méthodes de projection.

<sup>39</sup> Tous les travaux ici brièvement présentés sont accessibles, dans leur intégralité, sur le site [www.heliodon.net](http://www.heliodon.net).

## *Le modèle perceptif*



Figure 47 : Dalia González (2006), Erika García (2008), Karla Medina (2007)

Ces trois travaux partent d'une interrogation sur le modèle du regard, considéré comme posant un problème spécifique à leurs auteurs. Ici, l'analyse d'œuvres existantes est poursuivie par un long travail sur maquette, beaucoup plus personnel.

Le travail le plus abouti est celui que Dalia González a présenté dans « Les couleurs, lorsque le soleil entre ». L'année précédente, j'avais proposé aux étudiants un exercice approfondi sur la couleur, en leur demandant de commencer par peindre (l'échiquier des couleurs), puis de préciser, pour chacun, l'harmonie subjective de sa composition chromatique abstraite (analyse par contrastes), puis d'en tirer des perspectives, et finalement la maquette d'un projet. En reprenant cette idée sur un projet académique, mais réaliste (pour un emplacement concret à Chilpancingo, dans le sud du Mexique), l'auteur a finalement obtenu une composition très maîtrisée de l'espace, où les trajets solaires sont également contrôlés, de manière à ce que chaque photographie de la maquette corresponde à une situation réelle à une date précise. Le passage du temps et l'évolution de l'ambiance colorée au cours de la journée et de l'année sont donc réellement maîtrisés dans les trois dimensions de l'espace. Ce travail est devenu une référence pour tous les étudiants s'intéressant au thème de la couleur, pratiquement absent de l'enseignement traditionnel en architecture.

Dans « Intervention sur l'espace au moyen des ombres », Erika García s'est livrée à des expérimentations qui consistent à composer la scène par soustraction (les ombres) plutôt que par addition (les lampes), renversant les habitudes. Il est intéressant de relever que cette démarche rejoint des observations récentes dans les neurosciences. Certains neurones seraient ainsi activés par l'obscurité, ce qui remet en cause la définition négative de celle-ci, comme une absence de lumière.

Dans « Espaces libres, espaces obliques », Karla Medina s'est refusée à l'angle droit. En parcourant seulement les premiers chapitres de ce travail, qui montrent des peintures, des sculptures et des bâtiments où l'angle droit est absent, mais seulement lui, les lignes droites restant omniprésentes, on saisit à quel point l'angle de 90 degrés est un archétype du regard. Un parallèle s'impose entre ces œuvres et l'étape de la musique dodécaphonique au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Les surfaces courbes, comme la musique atonale, ne renient rien, elles complètent, elles varient, mais ne remettent pas en cause le modèle de perception dominant (l'espace orthogonal, le système tonal). Au contraire, conserver les principales caractéristiques du modèle, et n'en refuser que la clef-de-voute (l'affirmation de l'angle droit, celle de la tonique) conduisent à une remise en cause à la fois violente et enthousiasmante (tout redevient un jeu).

## Lumière et techniques



Figure 48 : Borja De Mesa (2008), Walter Libertino (2010), Rafael López (2007)

Ces travaux parlent des techniques développées dans les domaines de l'illumination globale et de la photographie numérique, et de leurs applications actuelles ou prévisibles au projet d'architecture.

Dans « Les maquettes impossibles », Borja de Mesa, architecte spécialisé dans les techniques de rendu, montre, non seulement que l'on peut aujourd'hui, dans un temps raisonnable, monter une scène virtuelle et en tirer des rendus qu'il n'est plus possible de distinguer des photographies, mais que des techniques de projection panoramique et de photographie de haute gamme dynamique (HDR, pour *High Dynamic Range*) peuvent être combinées avec des algorithmes de *photon mapping* incluant des techniques avancées de texturage pour créer des maquettes « impossibles » sur lesquelles sont prises des décisions formelles concernant le projet d'architecture, qu'on ne pourrait plus tirer des plans traditionnels de la CAO, à cause de la complexité des géométries.

Dans « Photoagnosis : lire une photographie pour comprendre la lumière », Walter Libertino a d'abord retracé l'histoire des lentilles *fish-eye* et de leurs applications pour contrôler les trajets solaires et la lumière du ciel. Des comparaisons entre mesures et simulations et la prise en compte des techniques HDR lui ont permis de préciser la part de la photographie dans une station de mesures météorologiques telle que celle qui est en construction au laboratoire Avenues-GSU<sup>40</sup>.

Dans « Simulation et représentation de la lumière dans le projet d'architecture », Raphael López avait travaillé, en particulier, sur l'ombrage en lumière diffuse comme apport d'information dans les vues en plan. Dans son travail, comme dans celui de Borja de Mesa, des œuvres de Tadao Ando ou de Dani Freixes, déjà étudiées dans des mémoires antérieurs, sont revisitées du point de vue de la représentation du champ lumineux.

<sup>40</sup> Station GISOL, Laboratoire Avenues - Génie des Systèmes Urbains, UTC, Compiègne. En 2010, Walter Libertino a réalisé un stage à Compiègne, sous ma direction, et a participé de manière importante aux activités du laboratoire, ainsi qu'à l'organisation du colloque SEUS.

## Quantités surfaciques et volumiques

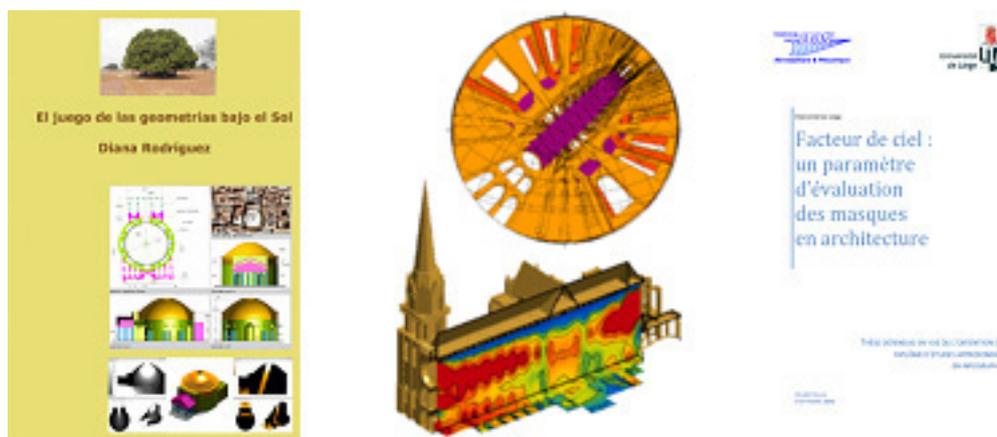


Figure 49 : Diana Rodríguez (2007), Carlos Villazón (2008), Olivier Colin (2008)

Ces travaux ont exploré les potentialités les plus avancées du logiciel « Heliodon 2 » et ont largement influencé ses derniers développements. En particulier, il s'agissait de s'interroger sur la pertinence d'étudier la lumière non seulement sur les surfaces, comme on le fait traditionnellement, mais aussi dans le volume : étudier le flux lumineux sur des coupes, simuler des capteurs sphériques, réfléchir à partir de l'angle solide qui soutient la vue du ciel.

Dans « Le jeu des géométries sous le soleil », Diana Rodríguez a aussi tenté de préciser le niveau de détail nécessaire pour le modèle géométrique<sup>41</sup>, sur des exemples historiques tels que le Parthénon d'Athènes et le Panthéon romain. L'architecture de Frank Lloyd Wright était également abordée, par l'étude d'une maison reconnue comme bâtiment précurseur de l'architecture bioclimatique.

La très belle église gothique de Santa María del Mar, à Barcelone, est jugée, par certains spécialistes du gothique catalan, plus lumineuse que la cathédrale de Chartres. Comment vérifier une telle assertion sans commettre de contre-sens ? Le ciel est généralement beaucoup plus lumineux en Catalogne qu'en Beauce, et les vitraux sont plus récents – et donc plus transparents – à Santa María qu'à Chartes. Nous avons choisi une quantité originale pour comparer de telles architectures : la proportion du volume intérieur d'où l'on peut voir plus de 5% du ciel. Cela avait l'avantage de neutraliser toutes les différences accidentelles et d'éviter les anachronismes.

Pour « La lumière et la géométrie dans les églises romanes et gothiques », Carlos Villazón a construit les modèles de différentes églises, et les a comparé dans Heliodon 2. En parallèle, pour sa thèse de DEA intitulée « Facteur de ciel : un paramètre d'évaluation des masques en architecture », Olivier Collin<sup>42</sup> a développé un outil logiciel complémentaire; les calculs montrent finalement que la cathédrale de Chartres est bien plus ouverte au ciel que l'église de Santa María del Mar. Le travail d'Olivier Collin a également porté sur la sensibilité de la ligne de ciel aux déplacements dans une vallée de montagne, une étape nécessaire pour une meilleure prise en compte du relief montagneux dans l'évaluation des apports solaires.

<sup>41</sup> Depuis septembre 2009, Diana Rodríguez développe une thèse sur le même sujet, mais à l'échelle urbaine, sous ma direction, au sein du laboratoire Avenues-Génie des Systèmes Urbains de l'UTC.

<sup>42</sup> Sous la direction de Pierre Beckers, à l'Université de Liège.

## L'échelle urbaine



Figure 50 : Bartolomeu Adailson(2007), Denisse Lecea (2010), Montse Puig (2011)

A la suite de Noel Almagro et de Leonidas Albano<sup>43</sup>, de nombreux architectes ont exploré les possibilités du logiciel Heliodon 2 à l'échelle urbaine. Deux thèses sont en cours à Barcelone<sup>44</sup>.

Pour « Analyse climatique de la ville équatoriale de Belém do Pará – Brésil », Bartolomeu Adailson a modélisé différents quartiers de Belém, ville proche de l'équateur, et y a montré l'importance de prendre en compte les trajets solaires, lesquels, contrairement à l'idée reçue, varient sensiblement à l'équateur. Le dimensionnement des grandes artères pour le trafic automobile, et l'absence presque totale de mobilier urbain, font de Belém une ville difficile pour les piétons. Dès que le soleil sort, la ville est comme gouvernée par les rares ombres, où se concentre l'activité.

Dans « Impact solaire à l'échelle urbaine », Denisse Lecea, qui a participé à l'élaboration du modèle 3D du centre-ville de Compiègne<sup>45</sup>, a utilisé ce dernier, avec différents niveaux de détails, pour proposer une méthode qui permette de quantifier l'impact d'un nouveau bâtiment sur son environnement urbain (potentiel photovoltaïque, apports solaires hivernaux, illumination des fenêtres, conditionnement des ambiances urbaines).

Dans « Analyse des nécessités solaires dans un processus de densification urbaine. Une expérience à Tokyo », Montse Puig a étudié l'évolution typique d'un îlot urbain de Tokyo, entre les années 1970 et 1990. C'est un premier exemple de modèle 3D urbain évolutif pour l'étude de l'ensoleillement. Les résultats sont très encourageants. On y voit que la densification, qui s'opère souvent à Tokyo par une division très fine des parcelles, en créant de nouveaux logements qui ne sont plus en contact direct avec la rue, et qu'il faut donc communiquer par de nouvelles ruelles, produit... une amélioration de l'illumination naturelle. Autrement dit, la densification de l'habitat à volume constant cause une augmentation des surfaces extérieures susceptibles d'être, même très brièvement, ensoleillées.

Les quantités de conception proposées par le logiciel Heliodon 2 sont donc suffisantes pour réaliser de premières études utiles à l'échelle du quartier.

<sup>43</sup> Tous deux ont participé à l'Atelier Recherche « La lumière naturelle dans les projets architecturaux et urbains », organisé à Compiègne en mai 2008 ([www.heliodon.net](http://www.heliodon.net)).

<sup>44</sup> Sous la direction d'Helena Coch, Université Polytechnique de Catalogne.

<sup>45</sup> Modèle GISOL de Compiègne, Laboratoire Avenues - Génie des Systèmes Urbains, UTC, Compiègne. En 2010, Denisse Lecea a réalisé un stage à Compiègne, sous ma direction, et a participé de manière importante aux activités du laboratoire, ainsi qu'à l'organisation du colloque SEUS.

## L'acoustique des salles



Figure 51 : Nicoletta Borgia (2005), Francesco Raffaele (2007), étudiants GM - GSU (2011)

« Le théâtre grec dessiné par son acoustique », de Nicoletta Borgia, a déjà été commenté dans la première partie de cet exposé, et a donné lieu à une communication en congrès<sup>46</sup>, reprise en annexe.

Dans « Le théâtre Goldoni de Livourne et l'acoustique des salles à l'italienne », Francesco Raffaele a repris l'étude de l'évolution du modèle circulaire, après sa réapparition à la Renaissance. Ce travail peut donc être considéré comme la suite de l'antérieur. Avec l'apparition de grandes salles couvertes et adaptées aux décors en perspective centrale sont apparus deux nouveaux phénomènes acoustiques – la réverbération et les focalisations – pratiquement absents du théâtre antique, et que les architectes ont tenté de prendre en compte dans leurs projets, ainsi que dans des traités spécifiques, nombreux jusqu'au début du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Dans « Etude acoustique du placement de grandes orgues dans l'abbatiale de Saint-Jean-aux-Bois », quatre étudiants<sup>47</sup> en second cycle des départements de Génie Mécanique et de Génie des Systèmes Urbains de l'UTC ont eu l'occasion de mesurer et de simuler l'acoustique d'une église, et donc de s'initier au modèle réverbérant.

### Conclusions

Pour la plupart, les travaux résumés dans ce chapitre ont eu pour auteurs de jeunes architectes, diplômés dans différentes écoles d'Europe et d'Amérique. En raisonnant sur les modèles géométriques ou sur les modèles visuels, sur les quantités d'observation et de conception, sur la simulation et sur les différentes échelles de l'architecture, ils ont montré comment l'approche du projet et celle de la modélisation peuvent s'articuler pour mieux contrôler le rapport entre la forme et le rayonnement.

L'ensemble de ces travaux propose une esquisse de ce que devrait être aujourd'hui la recherche liée à l'architecture. L'enthousiasme de ces étudiants, qui les a souvent portés bien au-delà du cadre de leurs études, montre qu'une telle forme de recherche est devenue possible, et souhaitée. Son avenir dépend, en grande partie, du développement de logiciels spécifiques, en particulier pour le projet urbain, où la physique devient plus difficile à contrôler, et la géométrie plus lourde à modéliser.

<sup>46</sup> « The Acoustic Model of the Greek Theatre », B. Beckers, N. Borgia, in "Protection of Historical Buildings" - PROHITECH 2009 (Rome), volume 2, Taylor & Francis Group, pp. 1115-20, ISBN: 978-0-415-55803-7, juin 2009.

<sup>47</sup> L'un d'eux, Philippe Miville-Deschênes, commence un stage en laboratoire en septembre 2011, afin de développer ce sujet.

## III Nouveaux développements

### III.1 Physique et géométrie urbaine

#### III.1.1 L'édifice environné

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu rayonne de l'énergie. La surface du soleil, assimilable à un corps noir de température approchant les 5800 degrés Kelvin, émet 99% de son rayonnement en-dessous de 4 microns de longueur d'onde, tandis que la terre, ainsi que l'atmosphère, dont les températures avoisinent les 250 – 300 K seulement, émettent 99% de leur rayonnement au-dessus de 4 microns<sup>48</sup>. Le rayonnement solaire (ondes courtes) et le rayonnement terrestre (ondes longues) sont donc pratiquement découplés.

En ondes courtes, la seule source naturelle est en conséquence le soleil, qui diffuse dans le ciel (source secondaire), et dont les rayons peuvent être transmis, réfléchis ou absorbés par les surfaces composant la scène étudiée. A chaque état du ciel – lequel dépend principalement de la limpidité de l'atmosphère, de la position du soleil et de la distribution des nuages éventuels – correspond un équilibre radiatif qui se réalise de façon instantanée, sans participation des températures, puisque les objets de la scène n'émettent que dans les longues ondes. Si la réflexion peut être supposée parfaitement diffuse, les méthodes de radiosité s'appliquent sans difficulté. Si l'on souhaite définir des propriétés optiques plus variées (BRDF), les méthodes de lancer de rayon, lentes mais beaucoup plus souples, peuvent être préférées.

En milieu urbain, chaque édifice est environné d'autres bâtiments, et les emplacements encore libres sont fortement contraints par le voisinage d'objets qui masquent une partie du ciel et donc, occasionnellement, le soleil, et qui peuvent aussi, en fonction de la clarté de leurs surfaces, de leur orientation et de leur propre environnement, réfléchir la lumière apportée par le soleil, le ciel ou d'autres objets. Ce voisinage a une influence considérable sur *la vue* (pourra-t-on voir un peu de ciel par la fenêtre, quelles perspectives s'offriront-elles au regard?), sur *l'illumination naturelle* (la quantité de lumière atteignant chaque fenêtre à tout moment) et sur *les apports solaires* (la quantité de rayonnement solaire atteignant chaque façade à tout moment), voire sur *le gisement solaire* pour la production d'électricité (solaire photovoltaïque) et d'eau chaude (solaire thermique).

Sous les climats tempérés du nord de l'Europe, en particulier, les progrès considérables dans l'isolation des bâtiments et les rendements des équipements ont eu pour conséquence une importance accrue des quantités d'intérêt liées au rayonnement solaire : le contrôle des apports solaires devient déterminant pour limiter les besoins de chauffage, éviter la climatisation, et atteindre, grâce aux énergies renouvelables, des bâtiments à énergie positive. Dans ces derniers, la proportion des consommations d'électricité dévolue à l'éclairage devient considérable, voire prépondérante. Un éclairage naturel optimal devient alors, tout simplement, indispensable.

Dans la pratique, les bureaux d'architectes et d'ingénieurs ne parviennent que très rarement à modéliser correctement la situation; ils n'ont donc pas les moyens d'évaluer le rayonnement solaire avec la précision requise par les enjeux d'aujourd'hui. En se déplaçant à peine à l'intérieur d'un bâtiment (peut-être seulement de quelques dizaines de centimètres), la vue offerte par une fenêtre peut changer radicalement : de là, on ne voyait guère que la façade bordant l'autre côté d'une ruelle étroite, et d'ici, en revanche, la vue s'étend jusqu'à un horizon (la *ligne de ciel*) formé de monuments lointains, de collines et de montagnes. Le repérage et la modélisation de cet environnement sont des opérations trop coûteuses que pour être répétées à chaque projet.

La solution serait de disposer pour chaque ville d'une maquette numérique, mise à jour régulièrement, et réutilisable pour chaque nouveau projet. Les progrès récents dans ce domaine sont spectaculaires, mais ils sont principalement orientés vers le rendu réaliste, et les données en

<sup>48</sup> « A first Course in Atmospheric Radiation », Grant W. Petty, Sundog Publishing, 2006.

nuages de points comme les surfaces texturées ne sont pas utilisables directement pour la simulation physique. La reconnaissance automatique de formes doit encore progresser, et les modèles utilisés restent, aujourd'hui, réalisés – ou du moins longuement corrigés – à la main.

Pour bien définir le modèle géométrique, son échelle, son niveau de détail, sa frontière, il convient de valider les choix par une étude de sensibilité sur les quantités d'intérêt du problème<sup>49</sup>. Il serait judicieux de proposer un modèle qui serve à l'ensemble des simulations physiques, pour mieux justifier le temps investi, mais aussi pour rendre plus cohérente l'étude des couplages à différents niveaux : couplages physiques (par exemple, rayonnement / convection / évapotranspiration), couplages des perceptions (notion d'*ambiance*), interactions plus larges dans une approche systémique des flux et des réseaux (par exemple : thermique/énergétique/mobilité).

Une fois ce modèle disponible, on peut connaître les contraintes de la ville sur l'emplacement du futur bâtiment – ou sur le bâtiment existant –, mais aussi l'impact de ce bâtiment sur son environnement. On peut ainsi optimiser la forme dès le projet, de manière à léser le moins possible les édifices voisins, quant au gisement solaire, aux apports solaires hivernaux, à l'éclairage ou aux vues. Ces *études d'impact* devraient permettre de faire évoluer *l'urbanisme réglementaire*, dans le sens de *la ville durable*.

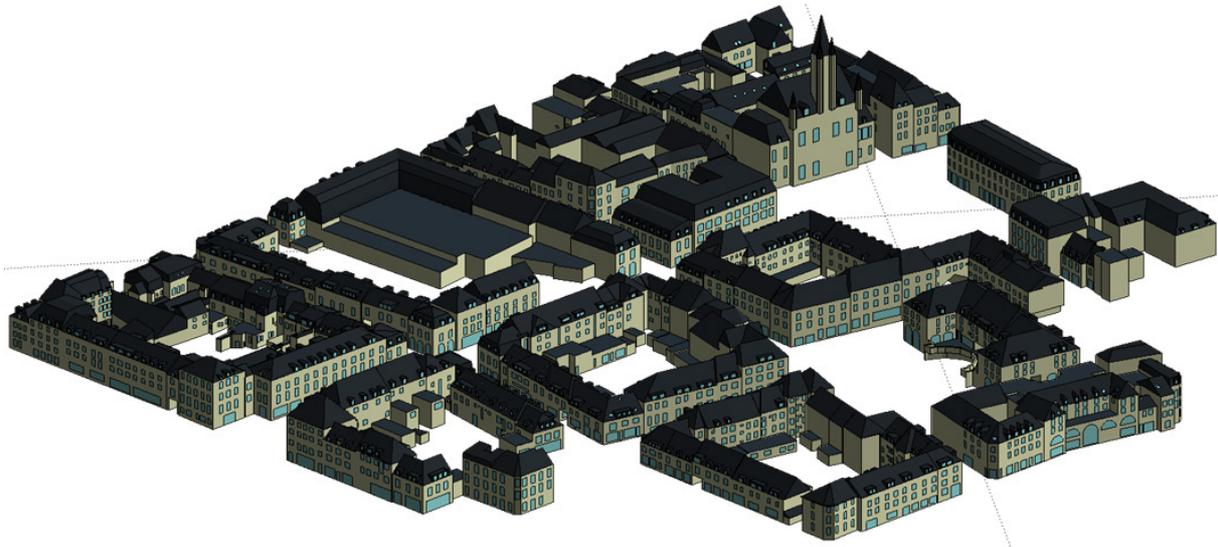


Figure 52 : Modèle GIS du centre-ville de Compiègne

### III.1.2 Le ciel et ses nuages

Dans le domaine du rayonnement, on travaille avec deux sortes de grandeurs : hémisphériques (intégrées sur un plan orienté) et directionnelles. L'irradiance et la radiosité (en  $W m^{-2}$ ) sont hémisphériques, tandis que l'intensité radiante (en  $W sr^{-1}$ ) et la radiance (en  $W m^{-2} sr^{-1}$ ) sont directionnelles. L'irradiance (ce qui arrive sur la surface) et la radiosité (ce qui en part) sont distinguées pour des raisons pratiques, mais il s'agit bien sûr d'une seule et même grandeur physique. Cela permet de noter, par exemple, qu'un satellite ne peut mesurer la radiosité d'une surface terrestre (ce qui part de la surface dans toutes les directions), mais seulement la radiance émise par cette surface dans sa direction. Si la réflexion est parfaitement diffuse, une relation simple relie la radiosité et la radiance, et si le coefficient de réflexion est connu, on déduit l'irradiance (ce qui est reçu par cette surface) de la radiosité, et celle-ci de la radiance mesurée par le satellite.

On entend par *albédo* une valeur unique, moyennée, des coefficients d'absorption de la scène, généralement pour les ondes courtes ou la lumière visible. C'est parce que l'on connaît l'albédo de l'océan, de la banquise, des déserts ou des forêts de conifères que l'on peut déduire de

<sup>49</sup> Une thèse est en cours à ce sujet, depuis septembre 2009, par Diana Rodríguez.

la télémessure une évaluation de l'irradiance. Cette notion, déjà malaisée pour des surfaces à-peu-près uniformes (ainsi, une étendue d'eau absorbe presque entièrement l'incidence normale, et devient un très bon réflecteur, spéculaire, pour l'incidence rasante...) est encore plus périlleuse appliquée à un tissu urbain : l'albédo de la ville varie fortement en fonction de la hauteur angulaire du soleil et de celle du détecteur.

Les stations de mesure au sol paraissent donc avantageées, puisqu'elles peuvent mesurer directement l'irradiance, au moyen d'un appareil appelé *pyranomètre*. Si cet appareil est muni d'un anneau ou d'une boule qui suit le soleil pour le cacher au capteur, celui-ci ne mesure plus que la composante diffuse (le ciel). Un autre appareil, le *pyrhéliomètre*, suit le soleil en ne mesurant que la composante directe. La séparation du direct et du diffus est évidemment très utile pour aborder les situations architecturales et urbaines.

Cependant, les appareils de précision sont coûteux et récents. De larges parties du globe sont mal maillées. Pour les latitudes tempérées, on considère que les stations au sol prennent l'avantage sur les mesures par satellite géostationnaire lorsque la maille du réseau est inférieure à 50 kilomètres (ce qui est à-peu-près le cas de la France). Beaucoup plus rares sont les stations où des mesures séparées des composantes directe et diffuse sont réalisées. L'accumulation de longues périodes de mesure, nécessaire pour obtenir des « années standard », reste exceptionnelle.

Des sites internet libres ou commerciaux proposent aujourd'hui des données d'irradiation pour n'importe quelle localisation du globe, en combinant les données terrestres et satellitaires disponibles.

L'œil humain ne perçoit qu'une petite moitié du rayonnement solaire, qu'il filtre avec une courbe de sensibilité  $V(\lambda)$  dont le maximum se trouve à 555 nanomètres et les seuils vers 400 nanomètres (violet) et 700 nanomètres (rouge). Le flux lumineux (exprimé en lumens) est le flux radiant (en Watts) pondéré par la courbe  $V(\lambda)$ . Les autres grandeurs photométriques sont équivalentes aux grandeurs radiométriques pareillement pondérées : l'illuminance et la luminosité (en lumens  $m^{-2}$  ou *lux*) sont hémisphériques, tandis que l'intensité lumineuse (en lumens  $sr^{-1}$  ou *candelas*) et la luminance (en lumens  $m^{-2} sr^{-1}$  ou *candelas  $m^{-2}$* ) sont directionnelles.

En traversant l'atmosphère, le spectre du rayonnement solaire est modifié, en fonction de la hauteur angulaire du soleil (qui apparaît rougeâtre lorsqu'il est proche de l'horizon) et de la présence de nuages (variation de la température de couleur). Cependant, la proportion de lumière visible reste assez constante et, en première approximation, on peut estimer que 1 W correspond à 110 lumens (ou : 1  $W m^{-2}$  correspond à 110 lux).

Longtemps, la recherche est restée divisée entre le domaine thermique et celui de la lumière naturelle. En thermique, on est passé du plan horizontal au plan incliné (en attribuant une valeur unique d'albédo au sol apparaissant devant lui), toujours dans un espace dégagé, de manière à préciser le gisement solaire. Les modèles de la composante diffuse du ciel bleu ont ajouté à la voûte isotrope une couronne autour du soleil et une autre autour de l'horizon. Cependant, dans un milieu urbain où les bâtiments ont des hauteurs différentes, il est prévisible que la généralisation des installations solaires introduira des ombrages et des réflexions variées, et que l'on sera obligé de prendre entièrement en compte la géométrie. En particulier, l'ombrage d'un panneau photovoltaïque, même partiel et temporaire, a des conséquences importantes et non-linéaires sur son rendement, bien étudiées par les électriciens, mais non encore intégrées à l'échelle urbaine. Si l'on y ajoute l'incertitude quant au vieillissement des cellules, on obtient un rendement réel largement inférieur à celui d'une installation idéale, mais qu'on est encore loin de savoir calculer.

Dans le domaine de la lumière naturelle, on a voulu pouvoir descendre des toits dans la ville, et rentrer dans les bâtiments, d'où l'on ne voit plus que de petits morceaux de ciel très variés (plutôt proches du zénith dans les rues, sur les places et sous les fenêtres zénithales, et plutôt proches de l'horizon depuis les fenêtres pratiquées dans les parois verticales). La non-uniformité du ciel, et donc la variation de la radiance sur une voûte céleste discrétisée en 145 carreaux, doit donc être prise en compte. La Commission Internationale de l'Éclairage a proposé 15 modèles de

ciel (depuis le ciel bleu jusqu'au ciel très couvert), et les scanners de ciel ont permis à quelques laboratoires dans le monde d'obtenir une cartographie du ciel (en général, sur les 145 carreaux du maillage de Tregenza), mais avec de nouvelles difficultés techniques et de coût. Il apparaît clairement que la sensibilité au modèle de ciel augmente fortement lorsque la quantité de ciel visible diminue<sup>50</sup>.

Or, dans un bâtiment, il n'est pas rare d'avoir des valeurs de Facteur de Vue du Ciel de l'ordre de un ou deux pourcents, et ces valeurs ne sont aucunement négligeables. Ainsi, pour un ciel nuageux produisant une illuminance de 20 000 lux sur une surface horizontale dégagée, une surface intérieure caractérisée par un FVC de seulement 2% recevra environ 400 lux, ce qui permet de travailler sans éclairage.

Nous avons récemment développé le modèle très simple d'un bureau typiquement urbain : un parallélépipède, avec une seule fenêtre donnant au nord, et une longue façade de l'autre côté de la rue<sup>51</sup>. Le bureau, où le soleil n'entre jamais, ne reçoit donc que de la lumière diffuse : réflexions du soleil et du ciel sur la façade, ciel directement visible tout près de la fenêtre, et réflexions internes calculée par une méthode de radiosité quasi-analytique. Nous n'avons encore utilisé qu'un ciel isotrope, mais en comparant deux localisations à la même latitude (Limoges et Ottawa, 45°N), avec donc les mêmes trajets solaires, ne différant que par la répartition saisonnière du couvert nuageux (Ottawa est plus ensoleillée en hiver que Limoges), on arrive à des résultats très différents. La quantité retenue est le nombre d'heures où l'illuminance d'un plan horizontal intérieur dépasse la valeur de 400 lux. Autour du solstice d'hiver, on obtient des différences dépassant 20 % au milieu de la pièce.

Dans le domaine thermique, on peut se passer complètement du modèle perceptif (si l'on étudie des panneaux solaires), ou au moins le reléguer très en aval de l'étude (l'obtention des températures surfaciques et volumiques permettant, *in fine*, d'évaluer le confort thermique). Dans le domaine visuel, on est en revanche directement confronté au modèle perceptif, à la sensibilité redoutable du regard humain. La configuration urbaine, en ménageant des espaces variés avec une participation du ciel qui peut se réduire considérablement sans jamais devenir négligeable, rend extrêmement difficile de seulement évaluer les erreurs (sur la mesure, le modèle de ciel, la géométrie, le calcul, l'évaluation des conditions de confort) et l'accroissement de l'incertitude<sup>52</sup>, lorsque l'on passe des toits dégagés aux lieux les plus contraints par l'architecture, ceux-là même où se développe l'essentiel de l'activité humaine.

Il devient donc indispensable de travailler conjointement sur les modèles géométrique, physique et perspectif, tout en ayant une idée suffisante du type de propriété que l'on s'attend à dégager.

### **III.1.3 L'exploration par l'optimisation**

A l'échelle de l'aménagement urbain, les bâtiments ne sont plus guère connus que par leur aspect extérieur (façades, toits, fenêtres), leur histoire (date de construction) et leur fonction (commerce, bureaux, logement). Il est nécessaire de respecter ce changement d'échelle qui correspond à la fois à de nouveaux acteurs, de nouvelles formes de décision et, surtout, une autre conception de la durée. En effet, le temps se dilate avec l'espace : les équipements ont une durée de vie d'une quinzaine d'années, les bâtiments sont là pour au moins cent ans (avec, toutefois, de très fortes disparités dans le monde), le tracé de la ville peut subsister trois siècles, mille ans, ou deux mille ans.

En France, les villes sont plus anciennes que les villages. Dix-neuf des vingt-et-une grandes villes de la métropole remontent – au moins – à l'empire romain (les deux exceptions,

---

<sup>50</sup> « Standard Skies for Maritime Climates », P. R. Tregenza, *Lighting Res. Technol.* 31(3), pp. 97-106, 1999.

<sup>51</sup> « Analysis of Clouds Distribution Effect on Daylighting in Urban Environment », T. Vermeulen, L. Merino, B. Beckers, 2011 IET International Conference on Smart and Sustainable City, Shanghai, China, July 6-8, 2011.

<sup>52</sup> Une thèse est en cours à ce sujet, depuis novembre 2009, par Luis Merino.

médiévales, sont Lille et Montpellier), tandis que les villages sont une création des débuts de l'ère capétienne (X<sup>ème</sup> siècle). Jusqu'à l'ère industrielle, les villes avaient une fonction primordiale – la défense – qui a complètement disparu aujourd'hui : les murailles ont pratiquement toutes été jetées bas, comme ont disparu les grands marchés couverts et les nombreux ateliers d'artisans. De nombreux quartiers historiques n'ont plus aucun des édifices que leur nom figure (quartiers gothiques ou aztèques, vieille ville Tang, la place Saint-Lambert à Liège...) et, pourtant, ils sont encore cela, parce qu'une ville, ce n'est pas une collection de bâtiments, ni même un tracé, mais un **systeme** qui est tout entier dans ses relations. Tant que celles-ci demeurent – même modifiées, même largement réorientées –, l'essentiel est préservé (les lettrés chinois se sont fait très tôt une idée particulièrement précise à ce sujet).

Pour caractériser de tels systèmes et tenter de les comparer, on a proposé quelques paramètres (nombre d'habitants, densité, compacité,...) qui ne sont pas même des quantités d'observation (on ne peut ni vraiment les mesurer, ni les mettre clairement en relation avec un modèle physique de l'urbain), et dont on ne peut finalement retenir que l'extrême résistance des villes à se laisser quantifier.

Au moins, nous avons un modèle typologique – mais un seul – qui répond vraiment bien à la description esquissée au premier chapitre : s'inscrire dans un cadre historique, mais le déborder, suivre un faisceau d'intentions, montrer un lien précis avec la physique du rayonnement, présenter des solutions optimales. Il s'agit de la **ville en damier**, souvent coloniale (Ostie, première colonie de Rome, les bastides du sud de la France, et beaucoup plus tard, du sud de l'Espagne,...), qui se laisse décrire par quelques **variables de conception** (paramètres géométriques formant un ensemble complet, et permettant ainsi d'obtenir un modèle 3D paramétré, condition nécessaire pour l'optimisation).

En particulier, l'Espagne et le Portugal ont parsemé l'Amérique de villes en damier, pour des raisons d'ordre (efficacité militaire et civile), d'idéologie (se distinguer des musulmans) et d'organisation (pour les processions massives qui rythment la vie coloniale à l'ère baroque).

En général, le damier est orienté selon les équinoxes (les points cardinaux) ou les solstices (pour certaines villes plus anciennes), et les exceptions sont dues à l'orographie (alignement sur le littoral, l'axe d'une vallée,...). Dessiné entre 1855 et 1863, le plan Cerdà de l'Eixample, agrandissement de Barcelone, occupe une place charnière entre la tradition et la modernité. Ses axes, à 45 degrés des directions cardinales (les trois avenues exceptionnelles sont la Diagonale, la Méridienne et la Parallèle) auraient également pu s'expliquer par le relief du territoire, mais Ildefons Cerdà les justifie par une meilleure distribution de l'énergie solaire sur les façades, dans une **perspective hygiéniste** qui sera le principal argument relatif aux trajets solaires de l'urbanisme réglementaire naissant : aucun recoin de la ville ne doit être laissé dans une ombre perpétuelle qui favorise les miasmes et la mauvaise vie<sup>53</sup>.

Cependant, ce choix a été fortement critiqué par la suite, en particulier depuis l'**approche bioclimatique** de l'architecture, où la ventilation traversante (fortement favorisée par l'orientation nord-sud) joue un rôle central, pour le climat méditerranéen, dans les conditions de confort thermique avec, plus récemment, l'intérêt résultant d'éviter la climatisation. De nombreuses études ont été produites sur l'Eixample. Il faut remarquer que l'optimisation multicritères échoue dans ce genre de problème, parce qu'une légère modification dans les critères et leur hiérarchie entraîne un déplacement très fort des optimums du système. Une réponse plus convaincante viendra de simulations sur une seule quantité – probablement une énergie –, ce qui implique une modélisation multi-physique rigoureuse, encore largement hors de

---

<sup>53</sup> De très nombreuses références traitent des théories qui ont accompagné le développement urbain, depuis l'hygiénisme jusqu'au développement durable, en passant par l'écologie urbaine. Je rappellerai seulement ici : « Design with climate », Victor Olgay, Princeton University Press, 1963; « Lectures de villes – Formes et temps », Marcel Roncayolo, éd. Parenthèses, 2011; « Ecologies urbaines », sous la direction d'Olivier Coutard et Jean-Pierre Lévy, éd. Economica, 2010.

portée pour l'échelle urbaine, malgré quelques premières tentatives dans ce sens, qui semblent plutôt encourageantes.

Mais l'étude de l'Eixample offre un autre intérêt. De même que le Paris haussmannien, il est construit peu avant l'apparition d'un équipement qui va bouleverser l'urbanisme : l'ascenseur. Cerdà et Haussmann doivent encore se limiter à des immeubles de quatre ou cinq étages (seulement trois dans le premier plan de Cerdà, critiqué pour cela par les investisseurs), alors que, quelques décennies plus tard, des tours de plusieurs dizaines d'étages s'élèvent dans les métropoles d'Amérique, où les plus riches abandonnent les rez-de-chaussée pour habiter au plus près du ciel. Il est donc pertinent de s'interroger sur l'évolution des plans antérieurs. Or, des études ont montré que le damier de Cerdà, où les parcelles carrées ont 113 mètres de côté (133,3 mètres en comptant les rues), ne peut guère être optimisé sur la quantité d'heures d'ensoleillement disponible dans les logements au solstice d'hiver (c'est la quantité reconnue par la réglementation thermique actuelle en Catalogne). En effet, si on abaisse les bâtiments sud de chaque parcelle (pour augmenter l'accès solaire) tout en haussant les bâtiments nord (pour maintenir le volume total, et donc le nombre d'habitants), cette hausse masque la parcelle située au nord de la première, de manière que les gains s'annulent presque totalement. Pour atteindre un gain notable, il faut travailler sur de « super-parcelles » d'au-moins 200 mètres de côté. C'est ce qu'avait préconisé Le Corbusier lors de sa visite à Barcelone dans les années 1920, qui a connu un début de réalisation au début de la République (une super-parcelle a été construite), puis l'abandon lors de la guerre civile.

La théorie du Corbusier (rassembler l'habitat dans des tours élevées et bien séparées les unes des autres pour optimiser l'ensoleillement et la vue) a été extrêmement critiquée par la suite, mais c'est la seule qui puisse, à ma connaissance, être comparée, pour l'échelle urbaine, aux solutions de l'acoustique des salles (contrôler le rayonnement par la forme), et elle suffit à donner un premier argument pour justifier l'emploi de méthodes d'optimisation appliquées aux formes urbaines : nous connaissons au moins un exemple ou deux variables géométriques – la dimension de la maille d'un plan en damier et la hauteur des bâtiments – peuvent mener à des solutions maximisant une quantité d'intérêt bien définie – le nombre d'heures d'ensoleillement hivernal.

En optimisation, les différentes quantités d'intérêt deviennent soit des contraintes soit la fonction objectif, lesquelles sont exprimées en termes de variables de conception (grandeurs géométriques), qui elles-mêmes ont des restrictions, lesquelles, ajoutées aux contraintes, définissent l'espace de conception.

L'optimisation doit permettre de tester un très grand nombre de configurations et d'explorer les solutions, de manière à détecter des propriétés – par exemple, les valeurs limite des fonctions objectif pour un espace de conception donné, et la sensibilité des optimums à la définition de l'espace de conception –, et à mieux comprendre la distribution de l'ensoleillement sur l'urbain et ses implications thermiques et visuelles. Si le problème d'optimisation est très contraint, ou s'il n'est pas formulé de manière adéquate, il est possible qu'on ne puisse pas trouver de solution. Dans ce cas, il faut reformuler le problème, en relaxant éventuellement certaines contraintes, afin d'élargir l'espace de conception. Ce processus reflète bien les négociations nécessaires pour introduire de nouvelles conceptions.

## III.2 Les échanges radiatifs

### III.2.1 L'articulation des recherches

Aujourd'hui, *l'énergie solaire à l'échelle urbaine* est un domaine de recherche pour des physiciens, des ingénieurs, des géographes et des architectes, qui ont des approches très variées. Pour faire le point sur ces recherches, et surtout pour mieux comprendre leur articulation – ou leur défaut d'articulation –, j'ai organisé en mai 2010 un colloque international sur le sujet, avec quatorze intervenants choisis à partir de leurs publications récentes, sur quatre thèmes qui devaient permettre de parcourir l'ensemble du problème : les données d'irradiation, la physique urbaine, la modélisation numérique et l'urbanisme réglementaire<sup>54</sup>. Cette organisation s'est révélée très utile, et elle est reprise telle quelle pour un livre collectif en voie de finalisation.

L'articulation entre les mesures par satellite et les mesures au sol est un premier problème, qui concerne des spécialistes de la météorologie et de l'imagerie. Les progrès des optiques embarquées, l'augmentation du nombre de bandes de fréquences étudiées et la couverture complète de la surface terrestre, avec un coût très faible par rapport aux réseaux terrestres, donne aux satellites un grand potentiel pour couvrir bientôt l'essentiel des besoins de données d'irradiation. Cependant, les satellites géostationnaires, les plus utilisés, sont nécessairement situés à près de 36 000 kilomètres au-dessus de l'équateur, ce qui limite leur résolution pour les hautes latitudes.

Les résolutions actuelles sont encore loin d'atteindre les dimensions propres de l'urbain. A l'échelle territoriale, cependant, des méthodes mettant en relation ces données d'irradiation avec une cartographie du relief permettent de « désagréger les pixels » et d'obtenir une résolution beaucoup plus fine, qui tient compte de la répartition de l'irradiation sur les reliefs du territoire. L'étape suivante sera d'appliquer de telles méthodes aux géométries urbaines. Un modèle 3D de la ville permettra de mieux évaluer son albédo, et donc de mieux interpréter les données satellitaires, puis de mieux distribuer celles-ci sur les surfaces urbaines, d'enclencher un processus itératif d'amélioration des données, permettant finalement la réalisation de simulations beaucoup plus précises. Dans le futur, on pourrait imaginer d'obtenir des données et des simulations « en temps réels » permettant d'adapter continuellement les villes au forçage climatique à court et moyen terme, de manière à optimiser leur réponse et celle de leurs réseaux (énergies renouvelables, transports, protections amovibles,...).

La physique urbaine, née dans le sillage de la physique environnementale, garde comme référence principale les travaux de Tim Oke, et plus particulièrement ceux qui concernent l'Ilot de Chaleur Urbain<sup>55</sup>. Il a été difficile de dépasser les méthodes à zéro dimension proposées à cette époque, par manque de moyens de simulation, mais aussi à cause de la difficulté de réaliser des mesures dans les villes. Certaines recherches se sont alors limitées au « canyon urbain », considéré comme une configuration déterminante de la spécificité du climat urbain, mais aussi plus simple à modéliser et à mesurer. Ces dernières années, des campagnes de mesures plus ambitieuses – mais encore trop limitées dans l'espace et dans le temps – ont permis de créer des cas test qui montrent une remarquable adéquation avec les simulations<sup>56</sup>. L'arrivée des modélisations 4D – au moins à l'échelle du quartier – laisse présager, dans un futur proche, des progrès importants dans la connaissance des climats urbains<sup>57</sup>.

---

<sup>54</sup> L'ensemble des présentations, ainsi que les résumés, sont accessibles sur le site [www.utc.fr/seus](http://www.utc.fr/seus)

<sup>55</sup> « Boundary Layer Climates », T. R. Oke, second edition (1987), Routledge.

<sup>56</sup> « High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseille city center during the UBL-ESCOMPTE campaign », Aurélien Hénon, Patrice G. Mestayer, Dominique Groleau, James Voogt, Building and Environment 46 (2011) 1747e1764.

<sup>57</sup> « Computer Modelling for Sustainable Urban Design », Darren Robinson, Erthscan, 2011.

La modélisation numérique a déjà commencé son passage de l'échelle architecturale à l'échelle urbaine, à la fois dans le domaine thermique et dans celui du contrôle de la lumière naturelle. Pour le rayonnement, le logiciel « Radiance » demeure la principale référence, mais des algorithmes spécifiques à l'échelle urbaine ont été développés récemment (en particulier, pour le calcul de la radiosité). Les méthodes d'optimisation commencent à être appliquées à la thermique urbaine.

L'urbanisme réglementaire, les politiques urbaines et l'aménagement urbain durable sont l'objectif de toutes les démarches antérieures : il s'agit de garantir un accès au soleil et au ciel pour les bâtiments et les habitants des grandes villes, tout en améliorant des bilans que l'on peut exprimer en énergies (primaires, finales, grises, renouvelables), en équivalent CO<sub>2</sub>, ou par des quantités exprimant le confort thermique ou la qualité des ambiances.

L'articulation entre la physique urbaine et la réglementation fait aujourd'hui défaut. C'est le point principal sur lequel la recherche doit progresser. La difficulté est dans la nature systémique des problèmes concernés. La « ville durable » se compose-t-elle de « bâtiments durables » ?

### **III.2.2 L'articulation des échelles**

A la suite des climatologues et des météorologues, on reconnaît en général quatre échelles spatiales dans le plan horizontal : l'échelle *macro* (>100 km), celle du Jet Stream et des ouragans; l'échelle *méso* (10 km – 200 km), celle des vents locaux, des orages et des grands cumulus; l'échelle *locale / urbaine* (100 m – 50 km), celle des tornades et des petits cumulus; l'échelle *micro* (1 cm – 1 km), celle des tourbillons de poussière et des turbulences à petite échelle<sup>58</sup>.

Ces échelles sont en relation avec d'autres, qui correspondent aux variations verticales de l'atmosphère : la troposphère, la couche limite urbaine, la canopée urbaine, ... L'ensemble de ces échelles permet d'étudier et de modéliser le climat. La forme des bâtiments individuels n'intervient qu'à l'échelle micro. Pour l'échelle locale, comme pour la canopée urbaine, la ville entière est ramenée à une simple silhouette, ou à une notion globale, celle de *rugosité*.

Cela montre d'abord qu'on ne peut pas dessiner une ville avec les vents. L'aérodynamique donne certes quelques caractéristiques à prendre en compte, le respect desquelles peut être déterminant pour le rendement d'équipements spécifiques (les éoliennes) et pour éviter quelques désagréments touchant au confort urbain (les grandes avenues glaciales où le vent s'engouffre, les ruelles trop fermées ou l'air stagne), mais ce n'est pas dans cette physique-là que l'on trouvera des arguments suffisamment discriminants que pour comparer deux projets d'aménagement ou d'architecture dans toutes leurs possibilités géométriques.

En revanche, la physique du rayonnement, dont l'interaction avec la ville est beaucoup plus locale, suggère une définition différente des échelles à considérer.

- **L'échelle micro** : celle du bâtiment et du projet d'architecture ;
- **L'échelle méso** : celle de la ville et du projet d'urbanisme ;
- **L'échelle macro** : celle du territoire environnant la ville et du projet d'aménagement territorial.

Ces échelles ont comme premier avantage de correspondre à des pratiques bien identifiées (l'architecture, l'urbanisme et la géographie), et de distinguer clairement les aspects réglementaires. Elles ont leurs propres paramètres, et ne se recouvrent qu'à des interfaces bien définies, où se jouent justement les articulations entre les pratiques et les possibilités de la physique.

---

<sup>58</sup> « Urban Microclimate- Designing the Spaces Between Buildings », Evyatar Erell, David Pearlmutter & Terry Williamson, Erthscan, 2011.

Entre le bâtiment et la ville, il y a l'enveloppe, où l'on peut distinguer les toits des façades, et surtout les fenêtrages, qui appartiennent autant à l'urbain qu'à l'architecture.

Entre la ville et son territoire, les rues deviennent des routes, le tissu du bâti se relâche, les cours d'eau ont des stations d'épuration qui se situent soit en amont, soit en aval. Mais, pour le rayonnement, l'interface se réduit pratiquement au relief, et celui-ci à une ligne d'horizon.

De la pièce où vous vous trouvez (échelle micro), vous voyez par la fenêtre s'échelonner les constructions humaines (échelle méso) et, par derrière ou dans les intervalles, des collines, des montagnes ou la plaine infinie, l'océan (échelle macro). Vous percevez cet ensemble comme dans le modèle axonométrique des miniatures orientales : l'angle droit, les droites – obliques et parallèles – de la ville s'opposent à cette nature certes aménagée, et tout aussi humaine, mais qui reste largement hors de portée – fût-ce seulement par la taille imposante de ses monuments sinueux – du contrôle absolu que présente la ville dans ses figures archétypales.

La ville – l'échelle intermédiaire – devient donc elle-même une interface entre le bâtiment et le territoire et, selon qu'elle se développe en spirale (Paris), en damier (Barcelone) ou en escaliers (Gênes), il semble bien que des possibilités particulières s'offrent ou se refusent au rayonnement acoustique, thermique et lumineux.

Notre définition des échelles et de leurs articulations nous engage donc naturellement dans une logique de conception, et ce n'est pas le moindre de ses avantages.

A l'échelle macro, c'est d'abord comme si nous recherchions l'emplacement idéal pour la ville. Les variables géométriques sont la latitude (qui définit les trajets solaires), puis les coordonnées géographiques complètes (qui donnent la proximité aux océans et aux montagnes, et donc le climat), l'altitude (et donc l'atténuation atmosphérique, la distribution du couvert nuageux), et finalement le relief et les cours d'eau (qui proposent éventuellement des axes et des contraintes pour l'orientation et l'étalement de la ville).

En se déplaçant dans la ville, même s'il s'agit d'une mégapole, les coordonnées géographiques sont constantes, tandis que l'altitude et la ligne de ciel varient, généralement, très lentement. Pour un bâtiment donné, en revanche, l'interface urbaine, ainsi conditionnée, cache et réfléchit, absorbe et réémet les énergies radiantes avec une grande variété. Ce qui était continu devient discret; ainsi, le soleil peut disparaître brusquement derrière l'une des arrêtes droites de la silhouette urbaine, et son diamètre apparent n'adoucit que d'une brève pénombre les lignes dures de ses ombres.

On a donc un cheminement habituel qui conduit l'information utile sur les données climatiques depuis l'échelle du territoire jusqu'à celle du bâtiment. Mais aujourd'hui, une autre question se pose. Puisque l'ensemble des bâtiments et des infrastructures couvre désormais quelques pourcents de la surface terrestre, ne serait-il pas possible que des modifications apportées rapidement à une grande partie de ces objets influence à son tour le climat ?

Jusqu'ici, nous avons des exemples militaires (le nucléaire, l'incendie de champs pétrolifères) et surtout industriels : localement, les pluies acides et, globalement, le trou dans la couche d'ozone : l'utilisation, surtout dans les pays développés du nord, de petites quantités de CFC réparties dans un très grand nombre de frigidaire et d'aérosols finit par produire, aux antipodes, un effet climatique mesurable.

La physique environnementale s'est précisément développée autour de ces problèmes. Elle se demande aujourd'hui dans quelle mesure la concentration dans le milieu urbain de nouveaux équipements (la climatisation, par exemple) et de nouvelles techniques constructives (l'isolation par l'extérieur) peut modifier le climat urbain, et dans quelle mesure de telles modifications peuvent en entraîner d'autres, à plus grande échelle.

Cela devient, précisément, un problème de *modélisation multiéchelle*. Non seulement les trois échelles peuvent être parcourues dans les deux sens, mais à chacune correspond un modèle physique différent, qui tient de la nature de cette échelle. Le modèle physique du rayonnement tient de la *projection* à l'échelle du bâtiment; à celle de la ville, où ce sont les interactions entre

les différents objets qui comptent, il tient de la **radiosité**, à celle du territoire, où la ville n'apparaît plus que comme une surface rugueuse (aux vents, mais aussi aux ondes), il tient de la **rugosité**.

Pour préciser les quantités d'échange entre les échelles, il nous faut maintenant introduire la notion de température.

### **III.2.3 Le rayonnement thermique**

D'après la loi de Stefan-Boltzmann, l'émissivité d'un *corps noir* est égale à  $\sigma T^4$ , où  $T$  est la température de surface du corps et  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann, égale  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Le spectre du rayonnement de ce corps ne dépend donc que de sa température de surface. Par extension, un corps gris émet un rayonnement inférieur, mais proportionnel à celui du corps noir, égal à  $\epsilon \sigma T^4$ , où  $\epsilon$  est l'émissivité, qui peut varier entre 0 et 1.

La plupart des matériaux terrestres ne se comportent comme des corps noirs ou des corps gris que dans des plages de fréquence limitées. Ainsi, pour ne donner qu'un exemple, la neige réfléchit presque entièrement les ondes courtes, mais absorbe presque parfaitement le rayonnement thermique, pour lequel elle est, pratiquement, un corps noir.

Si ces comportements très variés sont bien connus des spécialistes, il n'en va pas de même pour les architectes. Les thermographies par caméra infrarouge, aériennes ou satellitaires surprennent souvent, et il est difficile de les interpréter, d'autant qu'elles dépendent du comportement des habitants ; un toit froid peut être le signe d'une très bonne isolation, ou de l'absence de chauffage. Contrairement à la lumière visible, l'image thermique n'est pas le résultat d'un équilibre radiatif immédiat : une surface longtemps exposée au rayonnement solaire sera plus chaude la nuit qu'une autre restée dans l'ombre, et cela en fonction de l'inertie thermique, qui peut elle aussi varier considérablement.

Un premier objectif de la modélisation numérique pourrait être de produire du rendu réaliste dans différentes bandes de fréquence de l'infrarouge, ne serait-ce que dans un but didactique. Il faudra également préciser dans ce spectre invisible, mais sensible, les quantités pertinentes pour la conception. Tout indique que le Facteur de Vue du Ciel  $a_v$ , comme dans le visible diffus, un rôle prépondérant.

Dans les longues ondes, où le soleil ne participe pas, le ciel est généralement considéré isotrope. L'atmosphère rayonne dans ces fréquences de l'énergie qu'elle a reçue dans les ondes courtes du soleil, et dans les ondes longues du rayonnement terrestre. Connaissant l'émissivité de la voûte céleste, on peut lui attribuer pour des bandes de fréquences déterminées, une « température de surface » équivalente, selon la loi de Stefan-Boltzmann (même si l'atmosphère ne se comporte guère comme un corps noir ou gris). La présence de nuages est très importante (on sait qu'un ciel étoilé est bien plus froid qu'un ciel nuageux). Cependant, nous ne disposons pas encore des séries statistiques disponibles pour le rayonnement solaire, et cette méconnaissance des données d'entrée reste l'obstacle majeur pour la modélisation numérique.

L'exploration approfondie du rayonnement thermique devrait être une priorité pour la recherche liée aux projets architecturaux et urbains<sup>59</sup>. Elle recèle des quantités de conception qu'il faut pouvoir lier à celles que nous connaissons dans le domaine du rayonnement solaire. Il semble que l'on puisse, dans un premier temps, réduire à des formules simples les couplages principaux (conduction et convection), mais si ce n'était pas pertinent, ce ne serait pas si déroutant de commencer par modéliser une ville sans atmosphère, une station spatiale ou lunaire, sur laquelle nous apprendrions déjà beaucoup de choses. De fait, les méthodes aujourd'hui les plus avancées ont été développées pour l'étude thermique des satellites. On y a d'abord produit des modèles basés sur une théorie des nœuds thermiques, mais, alors que ces théories restent omniprésentes dans le domaine du bâtiment (TRNSYS) et de l'urbain

---

<sup>59</sup> Une thèse en CIFRE devrait débiter fin 2011 sur ce sujet, par Raphaël Nahon.

(CITYSIM<sup>60</sup>), des méthodes 4D rigoureuses (basées sur les éléments finis) commencent à fonctionner dans le domaine satellitaire, pour des géométries de plusieurs dizaines de milliers de surfaces.

Or, un autre avantage que l'on trouvera à mieux modéliser le rayonnement thermique sera de préciser le niveau de détail du modèle de CAO et du modèle de calcul. Jusqu'ici, nous n'avons parlé, de manière générale, que du modèle géométrique, un modèle de CAO défini en fonction du modèle physique qui lui sera appliqué. Dans cette étape, le modèle de CAO, éventuellement modifié (par exemple par un niveau de détail dynamique), doit encore être maillé pour le calcul. Cette subdivision des surfaces est nécessaire, en particulier pour le calcul des facteurs de vue. Jusqu'ici, il semble que ce soit le même maillage qui ait été utilisé par la suite pour le calcul en ondes longues. Or, les ondes courtes sont beaucoup plus exigeantes, parce qu'aux facteurs de vue s'ajoute la ligne d'ombre que produit l'ensoleillement direct. Selon le type d'étude, il faut être plus ou moins précis (le rendu réaliste est très exigeant, mais, pour le calcul thermique, il semble que la radiosité distribue très vite correctement les énergies, et que la condition de fermeture, qui est plus vite atteinte, soit beaucoup plus significative que la condition de réciprocité). Il est possible qu'il convienne de relâcher le maillage pour les ondes longues. Mieux cerner ces questions de convergence et de précision est le premier avantage attendu d'un logiciel entièrement dédié à la simulation des échanges radiatifs à l'échelle urbaine.

---

<sup>60</sup> « CITYSIM: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning », D. Robinson, F. Haldi, J. Kämpf, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed, U. Wilke, Eleventh International IBPSA Conference, Building simulation (2009), pp 1083-1090.

### III.3 Typologie urbaine

#### III.3.1 Smart or sustainable?

*« L'architecture de la Ville Générique est, par définition, belle. Construite à une vitesse incroyable et conçue à un rythme plus incroyable encore, il y a en moyenne 27 versions malheureuses pour chaque édifice réalisé, mais ce n'est pas le terme adéquat. Les projets se préparent dans ces 100 000 bureaux d'architecture desquels personne n'a jamais entendu parler, tous vibrants d'une inspiration innovatrice. Soi-disant plus modestes que leurs collègues bien connus, ces bureaux sont liés par une conscience collective qu'il y a quelque-chose qui va mal dans l'architecture, qui ne pourra être rectifié qu'au moyen de leurs efforts. Le pouvoir des chiffres leur accorde une splendide et brillante arrogance. Ils sont les seuls à projeter sans vaciller. De mille-et-une sources, avec une précision sauvage, ils réunissent plus de richesses que n'en a jamais possédées aucun génie. En moyenne, leur éducation a coûté 30 000 dollars, sans compter les voyages et le logement. 23% ont blanchi sous le barnais dans les universités nord-américaines de la Ivy League, où ils ont été en contact – durant des périodes très courtes, il faut le reconnaître – avec l'élite bien payée de l'autre profession, l'« officielle ». On peut en déduire qu'un investissement combiné total de 300 milliards de dollars en formation à l'architecture (30 000 dollars [coût moyen] × 100 [nombre moyen de travailleurs par bureau] × 100 000 [nombre de bureaux dans le monde entier]) travaille et produit des Villes Génériques à tout moment »*

Rem Koolhaas<sup>61</sup>

Les chiffres avancés par Rem Koolhaas sont peut-être exagérés, mais l'esprit de ces dizaines de milliers de bureaux de par le monde, leur production de la « ville générique », comme de l'« espace-poubelle »<sup>62</sup>, est bien le sort qui attend le plus grand nombre des étudiants en architecture à leur entrée dans la vie professionnelle. Dans ces bureaux, la seule forme de calcul qui soit réellement appréciée est celle qui permet de respecter – ou de contourner habilement – les réglementations, naguère locales, mais elles aussi en très rapide voie de mondialisation.

Face à ce processus, les réalisations de l'architecture bioclimatique sont restées extrêmement rares, et souvent contradictoires (par exemple, à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, des maisons isolées, alors même que l'étalement urbain devenait un problème environnemental majeur). Au moment où, dans cette filière, l'utopie marque le pas et où l'urbain s'impose, que disent les pionniers ? Que la norme LEED « donne des points aux bâtiments où la climatisation est bien dimensionnée, mais n'en donne pas à ceux qui, par leur forme adéquate, se passent de climatisation ». Peut-être les ingénieurs auteurs de cette norme sont-ils « à la solde des lobbies équipementiers », peut-être ces mêmes ingénieurs ne veulent-ils pas entendre qu'il est peu raisonnable de dimensionner un bâtiment qui durera au moins un siècle à partir d'équipements dont la durée de vie moyenne est d'environ quinze ans ? Sans doute, mais la cause immédiate se trouve – et les architectes en sont responsables autant que les ingénieurs et les physiciens – dans l'usage presque exclusif des méthodes de calcul à dimension zéro, lesquelles, par définition, excluent la géométrie.

C'est un problème ancien, qui tient aux spécificités de la production réglementaire, et à la nécessité de pouvoir trancher, y-compris devant les tribunaux, entre les bonnes et les mauvaises pratiques, lesquelles doivent donc pouvoir être distinguées de manière indiscutable. Ainsi, dans le domaine de l'illumination, l'œil voit des luminances, mais la réglementation ne voit, elle, que des illuminances, parce que ces dernières seules sont quantifiables et entièrement imputables à l'architecte.

Pour empêcher l'inflation de la réglementation, il faut pouvoir démontrer autrement que par des feuilles de calcul la pertinence du projet. Or, alors même que la recherche liée à l'architecture reste trop faible, et surtout trop peu soutenue par la profession, le passage à l'échelle urbaine soulève de nouvelles difficultés.

<sup>61</sup> « The Generic City », Rem Koolhaas, édition espagnole, Gustavo Gili, 2008.

<sup>62</sup> « Junkspace », Rem Koolhaas, édition espagnole, Gustavo Gili, 2008.

A nouveau, l'architecture, et maintenant l'urbanisme, se voient imposer des méthodes et des quantités définies hors d'elles, dans des disciplines, telles que la physique environnementale et les sciences de l'atmosphère, où la recherche est autrement plus dynamique. Un bon exemple est celui de l'Ilot de Chaleur Urbain, quantité très discutable, puisqu'elle compare la ville à la campagne, et conduit, pour les climats tempérés, à poser l'imperméabilisation du sol – différence principale entre ces deux milieux – comme caractéristique dominante et problématique de l'urbain. Planter des arbres et agrandir les parcs est ainsi devenu un dogme pour bien des politiques urbaines, comme si la ville idéale devait retourner à l'état de nature. Une démarche beaucoup plus urbaine, et sans doute beaucoup plus instructive, serait de comparer la température de l'air – ou d'autres quantités pertinentes – non pas entre la ville et son environnement (ce qui pose d'ailleurs des problèmes d'ordre méthodologique pratiquement insolubles), mais entre deux états d'un même ensemble urbain, année après année. Cette démarche évolutive, où le système est exploré de l'intérieur, ne sera possible que par la simulation, vu l'extrême difficulté de maintenir longtemps des capteurs *in situ* (et des échafaudages encombrants, pour les situer et les protéger).

Or, tandis que la définition même de la « ville durable » (*sustainable city*) connaît de telles difficultés, apparaît déjà une contreproposition, celle de la « ville intelligente » (*smart city*). A l'échelle du bâtiment, les architectes avaient réussi à dépasser ce dilemme, en démontrant que, dans tous les cas, un bâtiment doit être durable *avant* d'être intelligent, c'est-à-dire que l'optimisation de la forme doit précéder celle des équipements. Or, à l'échelle urbaine, ce n'est plus aussi évident, parce que la ville n'est pas un objet, mais un système. Les réseaux divers (transports, électricité, information,...) sont consubstantiels à la ville, et il est très difficile d'établir les priorités, de déterminer dans quel ordre les opérations doivent être menées pour améliorer l'existant.

Pour aborder ce genre de problème, il faut pouvoir quantifier les différents flux d'énergie, et apporter en outre une estimation de l'incertitude et de l'erreur sur les résultats. L'étape de la quantification est désormais incontournable.

### **III.3.2 L'évolution des villes**

La « Ville Générique », telle que la décrit Rem Koolhaas et telle que nous la voyons croître à grande vitesse en Asie, en Amérique, en Afrique et même en Europe, n'est pas conçue pour durer, elle abandonne ce qui ne sert plus et laisse s'élever n'importe quoi d'autre à sa place. Et si, pourtant, ces périphéries nouvelles, le tracé de leurs rues et leur progression implacable sur tout ce qui hier encore n'était pas de la ville, allait durer, comme ont duré les tracés des ingénieurs romains ou chinois, pour des siècles et des millénaires ?

Dans l'histoire des villes, l'abandon des sites urbains est extrêmement rare, si l'on excepte seulement ceux des forêts tropicales. Même la régression des villes de l'Europe romaine après la chute de l'empire d'occident est aujourd'hui fortement nuancée par l'archéologie<sup>63</sup>. Pour penser la ville, il faut d'abord accepter que le temps des aménagements et celui des typologies urbaines sont, tous simplement, incommensurables.

Le rayonnement seul, dont les lois physiques sont immuables, a préoccupé le genre humain depuis ces tout premiers agencements de parallélépipèdes imbriqués, dans le Croissant Fertile, si serrés que les seules ouvertures, pour les habitants et la lumière, étaient des trappes dans les toits en terrasses. Si nous pouvions suivre l'évolution géométrique de l'une de ces villes, année après année, dans les millénaires qui conduisent à nos jours, en y calculant quelques indicateurs liés au rayonnement, nous pourrions voir l'ensemble des possibilités, des intentions, des typologies et, pour chaque changement, quantifier les gains et les pertes.

Malgré les difficultés liées à la reconstitution, mais aussi à la taille d'un modèle géométrique évolutif, certaines expériences commencent à voir le jour. Ainsi, un modèle de Cluny

---

<sup>63</sup> « L'Europe de l'an mil », sous la direction de Pierre Riché, éditions du zodiaque, 2001.

au Moyen Âge permet de mieux comprendre l'importance des différents bâtiments dans leur environnement construit, en particulier à partir de ce que l'on pouvait voir depuis les fenêtres<sup>64</sup>. Ces modèles ont des applications purement visuelles, mais le regard, c'est déjà du rayonnement. Le travail que nous avons réalisé sur l'acoustique des théâtres antiques donne les variables géométriques essentielles pour l'acoustique (inclinaisons des gradins, hauteur et profondeur de la scène, d'où l'on déduit l'angle d'incidence des rayons directs et des deux réflexions) et donc, à la fois, des indications permettant de reconstituer l'évolution de ces théâtres, d'en décrire clairement la signature acoustique (tout le public dans le champ réfléchi, extrême faiblesse des réflexions latérales), de bien cerner le modèle typologique circulaire, de quantifier ses évolutions et ses avatars et, finalement, de donner un guide valable pour des projets actuels (par exemple, pour ces places publiques en gradins, toujours à la mode, mais, généralement, incorrectes du point de vue de l'acoustique).

L'identification des modèles typologiques urbains sera beaucoup plus difficile. L'existence même de signatures dans les différents domaines du rayonnement n'est pas certaine pour des systèmes complexes où la notion d'optimum est elle-même sujette à caution. Il faudra donc progresser pas à pas.

Par rapport aux domaines de la mécanique ou du génie civil, les modèles géométriques urbains ont ceci de particulier que l'on part d'un modèle existant, qu'il est difficile, voire impossible, de décrire exactement, même en se limitant à la seule géométrie.

Il faut donc prévoir, dès le stade initial de la simulation, des méthodes pour compléter et corriger les données de description du modèle. Il faut vérifier quel est le degré de précision requis pour que le modèle géométrique reproduise fidèlement le *comportement radiatif* du quartier de la ville. Pour ce faire, il faut répertorier et décrire précisément les quantités d'analyse et de conception. Il faut aussi s'intéresser à des modèles géométriques élaborés pour simuler d'autres phénomènes physiques, et voir dans quelle mesure et à quel prix ils peuvent être adaptés pour les études de rayonnement.

Une autre difficulté particulière des simulations urbaines est la possibilité d'extension du modèle (la dimension de la ville évolue). Il faut donc prévoir des procédures de création ou de reproduction de quartiers urbains où, dans un premier temps<sup>65</sup>, on respecte la physionomie de l'existant, et, dans un second temps, son comportement radiatif et thermique. Cela permettra de réaliser des simulations où l'on pourra tenir compte de l'expansion de la ville, et examiner la possibilité d'étendre une agglomération dans de nouvelles implantations. Un autre intérêt de ces méthodes est qu'elles permettraient d'idéaliser des comportements nouveaux tout en créant des maquettes numériques plus réalistes et moins schématiques que celles qui sont souvent utilisées dans le cadre académique.

Une étude détaillée de quartiers de ville de types ou d'époques différents devrait aider à les caractériser et ensuite à les combiner pour former des entités plus importantes. Tout cela doit se réaliser en tenant compte de la topographie. Il faut, en effet, vérifier qu'une certaine typologie est compatible ou non avec les caractéristiques topographiques envisagées.

A l'exemple des modèles climatiques évolutifs, on pourrait enfin imaginer d'étudier le passé pour extrapoler l'avenir selon des scénarios plausibles et bien caractérisés, ce qui devrait conduire, comme en acoustique des salles, à définir les quelques modèles typologiques qui reprennent l'ensemble des possibilités pratiquées.

---

<sup>64</sup> « Apports de la 3D et de la Réalité Virtuelle en milieu urbain », Jean-François Coulais, Innovations numériques au service de la ville durable - Vers la ville intelligente, 5<sup>ème</sup> édition Ville numérique, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), Paris, 4 mai 2011.

<sup>65</sup> « Interactive design of urban spaces using geometrical and behavioral modelling », ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2009, Volume 28 Issue 5, December 2009

### *III.3.3 Les logiciels*

Cet exposé est d'abord celui d'une *vision personnelle* au sujet d'un problème très vaste, sur lequel j'ai travaillé depuis plus de quinze ans, dans différentes situations, avec des approches variées et complémentaires. C'est aussi celui d'un *programme* pour une équipe désormais constituée, dont les effectifs – collègues, doctorants, étudiants de troisième cycle – devraient se maintenir au-dessus de la dizaine, avec le renouvellement que cela impose.

Pour aborder le rayonnement dans les projets architecturaux et urbains, il est nécessaire de travailler simultanément sur les aspects physiques, géométriques et perceptifs. Il faut aussi développer une connaissance du bâtiment et de la ville, d'ordre typologique, et cette typologie doit être articulée avec les aspects précédents. Il faut donc bien poser les modèles (au sens de l'ingénieur) sans jamais oublier le projet (au sens de l'architecte). La qualité de la modélisation, et des simulations résultantes, repose essentiellement sur un choix pertinent des quantités à calculer.

Même s'il reste beaucoup de travail à faire, je pense que nous avons acquis une maturité suffisante, dans les modèles physiques, géométriques et perceptifs, qui devrait nous permettre de développer rapidement nos collaborations, et de participer efficacement, en tant qu'équipe, à des projets de recherche et d'expertise à différents niveaux (du local à l'international).

Nous avons fait le pari d'aborder directement l'échelle urbaine par la voie du développement numérique et de l'optimisation. Les difficultés techniques – la taille du modèle géométrique et des matrices – ne sont plus aujourd'hui rédhibitoires. Le rayonnement est un bon point d'entrée : il est très exigeant pour la géométrie (nous pouvons espérer un effet d'entraînement sur un secteur SIG et CAO en rapide développement), très flexible par rapport au changement d'échelles (il devrait donc permettre d'obtenir rapidement une première référence pour la physique urbaine multiéchelle), et toujours en rapport direct avec l'approche du projet (des applications convaincantes à l'aménagement urbain sont attendues à moyen terme).

Comme équipe universitaire, le premier défi que nous avons à relever est celui du développement de logiciels. L'expérience que j'ai acquise auprès des utilisateurs potentiels est certainement un atout, mais il nous faut maintenant créer un noyau plus stable et plus fourni de développeurs, ce qui ne devrait pas être impossible dans une Université de Technologie.

Dans le domaine de l'aménagement urbain, il nous faut créer à la fois l'offre et la demande. Nous pouvons nous appuyer sur de grands programmes de recherche nationaux et européens, qui vont dans ce sens, mais c'est l'évolution de l'urbanisme réglementaire qui sera la clef de la réussite. La France a quelques atouts historiques dans ce domaine, et elle affiche aujourd'hui des ambitions claires. C'est un avantage indéniable, mais seulement si nous sommes capables de maintenir un esprit international, et de nous alimenter d'autres cultures urbaines.

Le dernier défi est celui de la recherche liée à l'architecture, qui reste partout trop faible, et trop peu soutenue par la profession. L'architecture est toujours en danger d'être submergée par des développements produits ailleurs. Par exemple : le rendu réaliste, dont la diffusion grandissante dans les bureaux d'architecture aboutit maintenant à des bâtiments réels qui imitent les rendus. Ce genre d'inversion irrationnelle – d'où la physique et les enjeux quantifiables sont totalement exclus, au profit de la seule apparence – est révélatrice d'une activité aliénée, qui a perdu jusqu'à l'exigence même de développer ses propres outils. La réponse ne peut se trouver que dans les universités. La reconfiguration des écoles d'architecture (réunies au génie civil, à l'urbanisme ou à la géographie, ou bien chapeautées par de nouvelles structures développant des ambitions de recherche plus dynamiques), et la création de nouvelles entités, telles que le Génie des Systèmes Urbains, sont des signaux très positifs, dont il nous faudra apprendre à tirer profit.

C'est à ces trois défis que devra répondre le programme COMRAD, qui occupera l'essentiel de notre temps dans les prochaines années : développer à un bon rythme du logiciel utile au projet, susciter la demande des villes et des acteurs de l'urbain pour une meilleure quantification du développement durable, participer à l'affirmation d'une recherche ambitieuse, multiéchelle, multiphysique, liée à l'architecture et au projet urbain.

## Annexes

### A.1 Curriculum Vitae détaillé

#### DONNÉES PERSONNELLES

Nom et prénoms : BECKERS, Benoit Pierre Louis  
Nationalité : Belge et Français  
Naissance : 04/06/1969, Liège (Belgique)  
Adresse privée : Rue Vivanel, 39 60200 Compiègne (France)  
Adresse à l'UTC : Génie des Systèmes Urbains  
Centre Pierre Guillaumat BP 60319  
60203 Compiègne cedex - France

Tél. 00 33 (0)3 44234406      *courriel* : benoit.beckers@utc.fr  
00 33 (0)6 73478267      *Site Internet* : www.heliodon.net

#### **Sommaire :**

1. Titres académiques		p. 71
2. Activités de formation et perfectionnement	(1987-2002)	p. 72
3. Enseignement et recherche en Espagne	(2002-2007)	p. 73
4. Enseignement et recherche en France	(depuis 2008)	p. 77
5. Publications et conférences		p. 82
6. Collaborations universitaires et industrielles		p. 87

## 1. TITRES ACADÉMIQUES

---

### 1.1.

Titre: Docteur de l'Université Polytechnique de Catalogne  
Organisme: Ecole Technique Supérieure d'Architecture de Barcelone  
Date d'obtention: Juin 2005  
Titre de la thèse: « Geometría sensible ».  
Qualification: Sobresaliente « *Cum Laude* » à l'unanimité.  
Mention Docteur Européen.

### 1.2.

Diplôme: Premier prix de solfège supérieur  
Organisme: Conservatoire Royal de Musique de Wallonie (Liège).  
Date d'obtention: Juillet 1992

### 1.3.

Diplôme: Ingénieur civil électricien (électronique physique)  
Organisme: Université de Liège (ULg, Belgique).  
Date d'obtention: Juillet 1992

Langues : Français et espagnol (langues maternelles)  
Anglais et italien (parlés et écrits)  
Catalan et arabe (notions)

## **2. ACTIVITÉS DE FORMATION ET DE PERFECTIONNEMENT**

---

### **2.1. En Belgique (1987-1992)**

Bourse Fernand Pisart (prix décerné à des étudiants ingénieurs de l'Université de Liège, récompensant un projet personnel). 1989.

Étudiant moniteur (cours de Mécanique Statistique, Professeur Kartheuser), au Département de Physique de la Faculté des Sciences (ULg). 1991-92.

“Acoustique des salles: étude de l’aspect temporel”, Travail de fin d’études réalisé dans le Département d’Acoustique de la Faculté des Sciences Appliquées de l’Université de Liège. 1992.

*Étude et développement du programme informatique de lancer de rayons “Salrev” (Université de Liège), programme pour l’acoustique des salles basé sur les intégrales de Monte-Carlo. Comparaison d’échogrammes simulés et mesurés.*

Assistant volontaire au service “Electroacoustique, acoustique appliquée et éclairage” de la Faculté des Sciences Appliquées (ULg), charge à temps partiel non rémunérée. 1994 et 1995.

### **2.2. En Espagne (1993-2002)**

Formation doctorale à l’Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone). 1994.

Bourse de stage COMETT n° 93/17, AUEF Wallonie-Bruxelles, avec l’entreprise “dB acústica numérica SA” (Barcelone). Novembre 1993 – août 1994.

*Étude du programme informatique de lancer de rayons “Epidauré<sup>®</sup>” (CSTB, St Martin d’Hères, Isère, France), mis à disposition par l’entreprise.*

Bourse du CGRI (Commissariat Général aux Relations Internationales, Belgique), obtenue dans le cadre des accords culturels Espagne-Belgique, et octroyée par le Département des Relations Culturelles et Scientifiques du Ministère Espagnol des Affaires Etrangères. Septembre 1994 – mars 1997.

*Développement d’un programme informatique original de lancer de rayons pour l’acoustique des salles capable de traiter des surfaces quadriques non discrétisées et basé sur les principes de la géométrie constructive ; création d’une interface permettant de produire des images de rendu réaliste avec le programme Povray<sup>®</sup>.*

Interventions régulières dans différents bureaux d’architecture, en qualité de spécialiste en acoustique architecturale et illumination, 1997-2007.

### **3. ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE EN ESPAGNE (2002-2007)**

---

Professeur de 3<sup>ème</sup> cycle, Fondation de l'Université Polytechnique de Catalogne, depuis septembre 2002.

Ce troisième cycle s'adresse à des étudiants diplômés, presque toujours des architectes ; il se réalise en deux ans, une année de cours et une année consacrée à la thèse de maîtrise.

#### **3.1 Enseignement**

---

Deux cours de 75 heures environ, avec pour chacun un public d'environ 30 étudiants.

##### **Master en Design d'Intérieurs [Md'I]**

Cours de « Perception », introduction à la perception des énergies dans les intérieurs (acoustique, éclairage naturel et artificiel, thermique), avec un accent particulier sur le thème de la couleur et sur celui des outils informatiques (propres et commerciaux), 2002-07.

##### **Master en Intégration des Energies Renouvelables à l'Architecture [MIDERA]**

Cours intensif sur les « méthodes géométriques pour la conception architecturale de l'éclairage et de l'acoustique », exposés théoriques, pratiques informatiques (outils 3D et logiciels propres), projet à réaliser par les étudiants, depuis 2004.

#### **3.2 Recherche**

---

##### **3.2.1 Recherche liée à l'enseignement**

Direction de mémoires de maîtrise pour le Md'I (Maîtrise en Design d'Intérieurs) et le MIDERA (Maîtrise en Intégration des Energies Renouvelables à l'Architecture) de la Fondation UPC, ainsi que pour le master AEM (Architecture, Energie, Environnement) de l'UPC, vingt-sept mémoires présentés:

“La luz como elemento de diseño en hoteles”, L. F. Ríos, Md'I, mars 2005.

“Ver, mirar, contemplar”, M. Bonilla, Md'I, octobre 2005.

“Poética y plástica en el espacio”, J. Hoyos, Md'I, octobre 2005.

“El teatro griego diseñado por su acústica”, N. Borgia, MIDERA, octobre 2005.

“La luz natural de Peter Zumthor”, C. Ribera, Md'I, novembre 2005.

“Los colores, cuando entra el sol”, D. González, Md'I, février 2006.

“Planta en el aire”, M. A. Valenzuela, Md'I, décembre 2006.

“Espacios oblicuos, espacios libres”, K. Medina, Md'I, mai 2007.

“El juego de las geometrías bajo el sol”, D. Rodríguez, MIDERA, octubre 2007.

“Análisis climático en la ciudad ecuatorial de Belén del Pará – Brasil”, A. Bartolomeu, MIDERA, octubre 2007.

“Luz natural, tema central de la Arquitectura; sobre la obra de Alberto Campo Baeza”, T. Pico, MIDERA, octubre 2007.

“Simulación y representación de la luz natural en el proyecto arquitectónico”, R. López, MIDERA, octubre 2007.

“Interacción entre la luz solar y la urbe construida por medio de pantallas verdes”, M. Gutiérrez, MIDERA, octubre 2007.

“El teatro Goldoni de Livorno y la acústica de salas a la italiana”, F. Raffaele, MIDERA, octubre 2007.

“Luz natural y geometría computacional”, R. Paullo, MIDERA, février 2008.

“Estudios de iluminación natural en Guatemala”, M. Ríos, MIDERA, février 2008.

“La intervención del espacio por medio de las sombras”, E. García, Md'I, mai 2008.

“Maquetas imposibles”, B. de Mesa, Md'I, mai 2008.

“La ventana: análisis y estrategias respecto a la energía solar”, A. Iturriaga, MIDERA, octubre 2008.

“Estudio de la luz y geometría en iglesias románicas y góticas”, C. Villazón, MIDERA, octubre 2008.

“Acústica y arquitectura: aplicaciones en Panamá”, C. Cucalón, MIDERA, mars 2009.

“Adaptación de la arquitectura a las latitudes”, A. Prieto, MIDERA, mars 2009.

“La accesibilidad solar como indicador ambiental de compacidad urbana”, J. Vásquez, AEM, septembre 2010.

“Fotoagnosis: leer una fotografía para comprender la luz”, G. W. Libertino, MIDERA, Septembre 2010.

“Impacto Solar en la Escala Urbana”, D. Lecea, MIDERA, Septembre 2010.

“Estudio solar de urbanizaciones de contenedores”, C. Betti, MIDERA, Septembre 2010.

“Análisis de la necesidad solar en una transformación urbana de densificación. Una experiencia en Tokio”, M. Puig, MIDERA, février 2011.

Une collaboration a été initiée en 2004 avec l'équipe de recherche "Arquitectura y Energía" du Département "Construcciones Arquitectónicas I" de l'École Technique Supérieure d'Architecture de Barcelone (voir le site [www.upc.edu/aie](http://www.upc.edu/aie)).

*Notes, rapports de travail :*

"Percepción", CD interactif d'acoustique, éclairage et couleur (Textes: B. Beckers, design: M. Bonilla y M. Cabrera), pour le Master en Design d'Intérieurs de la Fondation UPC. 2003.

“Apuntes sobre vínculos, texturas e iluminación solar en el entorno 3Dstudio”, B. Beckers & M. Cabrera (2004), [www.upc.edu/aie](http://www.upc.edu/aie).

### **3.2.2 Recherche appliquée**

En collaboration avec le Dr. Luc Masset, de l'Université de Liège, j'ai développé des outils de simulation, d'abord dans le domaine de l'acoustique et ensuite dans celui de l'illumination. Ces outils ont pour but de faciliter et d'améliorer le travail de conception. Un soin particulier a été apporté à leur interactivité et à la qualité des graphiques. Ces programmes ont été réalisés dans l'environnement Matlab<sup>®</sup>, mais ils contiennent également des séquences programmées en Fortran<sup>®</sup>.

Réalisation du logiciel "Radit2d" (B. Beckers & L. Masset) pour la conception acoustique en architecture (première version: 2002). Ce programme permet d'étudier l'acoustique d'un projet de salle dès ses premières ébauches.

Réalisation du logiciel "Heliodon" (B. Beckers & L. Masset) pour la conception architecturale avec la lumière solaire (première version: 2003).

Réalisation du logiciel "Heliodon 2" (B. Beckers & L. Masset) pour la conception architecturale avec la lumière du soleil et celle du ciel (première version: janvier 2006).

Ces logiciels ont été testés et utilisés par plus de 400 étudiants de troisième cycle à Barcelone.

#### *Manuels :*

"Manual de Radit2d", B. Beckers & M. Bonilla (2003), 71 pages, disponible sur : [www.upc.edu/aie/catala/soft/index.html](http://www.upc.edu/aie/catala/soft/index.html).

"Manual de Heliodon", B. Beckers & G. Moya (2004), 11 pages, disponible sur : [www.upc.edu/aie/catala/soft/index.html](http://www.upc.edu/aie/catala/soft/index.html).

### **3.2.3 Recherche théorique**

En architecture, les problèmes dont je m'occupe sont traditionnellement répartis entre les départements d'expression graphique (trajets solaires, projections géométriques, représentation de la couleur,...) et d'énergétique (acoustique, thermique, éclairage), voire négligés (théorie générale de la perception visuelle et sonore, acoustique des salles, la couleur dans l'espace et dans le temps).

Cependant, les progrès récents de l'informatique nous ont apporté de nombreux outils de simulation qui rendent de telles séparations obsolètes, et qui, pour être bien employés, requièrent de nouvelles connaissances, et de nouvelles formes d'enseignement.

Tous les sujets évoqués plus haut se rassemblent dans ce que je propose d'appeler la « géométrie sensible », c'est-à-dire une étude des formes qui ne se retranche ni du temps, ni de la couleur ou du son, et qui puisse servir de base aussi bien pour le projet d'architecture que pour la pensée algorithmique des ingénieurs et des physiciens.

Pour ma thèse de doctorat (“Geometría sensible”, Université Polytechnique de Catalogne, Barcelone, 2005), il m’est apparu essentiel d’en retrouver les précurseurs et d’en ébaucher l’histoire, pour mieux cerner et faire sentir ses enjeux et son actualité.

Résumé: La couleur est-elle un phénomène discret – comme les notes de la gamme musicale - ou continu - comme les formes visuelles ? Comment notre perception raccourcit-elle les distances, les intensités, voire les fréquences ? De telles questions se sont posées très tôt, en Europe et ailleurs, au moins depuis les présocratiques, et elles sont au fondement non seulement de nos idées esthétiques, mais aussi de nos mathématiques. L’optique d’Euclide, la théorie des proportions chez Aristote, Nicomaque ou Proclus, le développement médiéval de la polyphonie, les recherches perspectives de la Renaissance, les expériences de Newton, la géométrie projective et descriptive du XVII<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle, les polémiques du Bauhaus et celles de la musique contemporaine sont autant de moments importants sur lesquels ce travail s’appuie pour proposer une forme de raisonnement qui permette d’étudier précisément les coïncidences et les différences entre nos perceptions. Voir : [http://www.heliodon.net/downloads/Beckers2005Dt-Geometria\\_sensible.pdf](http://www.heliodon.net/downloads/Beckers2005Dt-Geometria_sensible.pdf)

Une telle démarche ne peut en aucun cas se retrancher de la recherche appliquée, dont sortent les outils nouveaux qui la précisent et l’illustrent, ni de l’approche didactique, puisque ce sont les étudiants qui, dans leurs projets et leurs recherches, la testent et en valident les meilleurs apports.

Les résultats que j’obtiens avec les étudiants sont très encourageants, et leurs travaux se trouvent profondément transformés, comme leur regard critique, par toutes ces nouvelles techniques, déjà très présentes dans les bureaux d’architecture, mais auxquelles mes travaux et mes cours offrent un cadre à la fois plus exigeant et plus enthousiasmant, à la recherche des formes propres de l’imagination contemporaine.

Après mon départ pour la France, j’ai conservé des activités importantes à Barcelone, avec une centaine d’heures de cours par an en maîtrise et en doctorat. Ceci me permet, chaque année, d’établir une relation soutenue avec une quarantaine de nouveaux étudiants, architectes diplômés issus des cultures latines d’Europe et d’Amérique. La venue de nombre d’entre eux pour des événements ponctuels, des stages master ou dans le cadre de la formation doctorale m’a permis de constituer un groupe de recherche et développement très dynamiques à Compiègne, où les architectes travaillent avec les ingénieurs, permettant d’affiner la qualité, la pertinence et la diffusion des méthodes et des programmes que nous produisons. Ainsi, les logiciels “Radit2d” et “Heliodon” sont aujourd’hui utilisés par d’anciens étudiants dans une dizaine d’universités et dans une centaine de bureaux d’architecture, particulièrement en Espagne, en Italie et dans l’ensemble de l’Amérique latine.

## 4. ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE EN FRANCE (depuis février 2008)

---

Depuis le 1<sup>er</sup> février 2008, Enseignant Chercheur Contractuel (ECC) à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) dans le département de Génie des Systèmes Urbains (GSU), équipe de recherche Avenues.

### 4.1 Enseignement

---

4.1.1 Professeur responsable de l'Unité de Valeur (UV) de printemps UB04 (« Ambiances et environnement lumineux »), 32h C + 2x32h TD, 48 étudiants de branche GSU (Printemps 2008, P. 2009, P. 2010, P. 2011).

4.1.2 Professeur responsable de l'UV d'automne UB10 (« Thermique urbaine »), 32h+2x32h, 48 étudiants de branche (Automne 2009, A. 2010).

Notes de cours (115 pages), B. Beckers, E. Antaluca, M. Le Chapellier & O. Jung.

4.1.3 Professeur intervenant dans l'UV d'automne UR04 (« Outils pour le projet »), 4h+2x4h, 48 étudiants de branche (A. 2008, A. 2009).

4.1.4 Correspondant pour le département au jury des « IR » (initiation à la recherche), 2008-2010.

4.1.5 Direction d'IR et de TX (études expérimentales) ; suivi d'étudiants en stage en entreprise.

Printemps 2008 :	2 Tx	3 IR		3 stagiaires
Automne 2008 :	3 Tx	1 IR		7 stagiaires
Printemps 2009 :		1 IR	1 PR <sup>(1)</sup>	3 stagiaires
Automne 2009 :	1 Tx	1 IR		5 stagiaires
Printemps 2010 :	3 Tx	1 IR	1 AP <sup>(2)</sup>	5 stagiaires
Automne 2010 :	2 Tx		1 PR <sup>(3)</sup>	5 stagiaires
Printemps 2011 :			1 PR <sup>(4)</sup>	5 stagiaires

<sup>(1)</sup> Projet « Gisol1 » (réalisation d'un modèle 3D de Compiègne pour y étudier la radiation solaire et la lumière naturelle, avec N. Molines, 13 étudiants), printemps 2009.

<sup>(2)</sup> Atelier Projet « Etude du gisement solaire de la ville de Compiègne » (étude réalisée en partenariat avec la ville de Compiègne, avec 25 étudiants), B. Beckers, E. Antaluca, B. Akinoglu.

<sup>(3)</sup> Projet « COMRAD 1 » (première ébauche du logiciel COMRAD pour le calcul des échanges radiatifs en milieu urbain, avec E. Antaluca et un étudiant GSU en « parcours recherche »), automne 2010.

<sup>(4)</sup> Etude acoustique de l'installation de grandes orgues à l'église de Saint-Jean-aux-bois, avec J.M. Ville (Génie Mécanique, UTC) et quatre étudiants, printemps 2011.

## **4.2 Recherche**

---

Domaines de recherche et d'expertise : énergétique urbaine; rayonnement solaire et lumière naturelle dans les projets architecturaux et urbains; méthodes géométriques de simulation numérique; perception des ondes dans leur environnement physique et culturel.

### **4.2.1 Activités au sein de l'équipe Avenues**

Membre de l'équipe de recherche « Avenues », du département GSU, responsable de la communication (sous la direction du Professeur J-L Batoz).

Organisateur de l'Atelier Recherche International « La lumière naturelle dans les projets architecturaux et urbains », avec douze intervenants (venus d'Espagne, de Belgique, de France et de Suisse) et cinquante participants, 16 mai 2008.

Organisateur du colloque International « Solar Energy at Urban Scale », avec quatorze intervenants (venus d'Europe, de Turquie, d'Israël et de Chine) et cinquante participants, 25-26 mai 2010.

Création du site [www.utc.fr/seus](http://www.utc.fr/seus), avec le programme, le livre des résumés et les quatorze présentations.

Organisateur du séminaire interne Roberval-Avenues « Optimisation du potentiel solaire urbain », avec 8 intervenants des deux laboratoires (4 EC, 4 doctorants) et quinze participants, 1<sup>er</sup> juin 2011.

Séminaire Avenues “Computational Cities: Geometrical Modeling for Urban Design and Simulation”, Professeur Daniel G. Aliaga, Purdue University (Etats-Unis), 3 juin 2011.

### **4.2.2 Animation d'un thème de recherche**

Animateur de l'un des deux thèmes de recherche de l'équipe Avenues, « Conception et optimisation énergétique des espaces bâtis » (6 enseignants chercheurs et 6 doctorants en 2011).

Réponse à l'appel à projets de recherche interne UTC « PPF Président », en tant que porteur du projet ESU (Energie et Systèmes Urbains) ; projet lauréat (janvier 2009). 50 000 euros.

Réponse au quatrième appel à projets de recherche de la Fondation Bâtiment Energie, en tant que porteur du projet REPA-F4 (Réhabilitation des Etablissements pour Personnes Agées et Facteur 4) ; projet lauréat (avril 2009). 260 000 euros (dont 115 000 euros pour l'UTC, monitoring et doctorat).

Accueil du professeur B. Akinoglu, de la Middle East Technical University (METU, Ankara, Turquie), Professeur invité à l'UTC, janvier-juillet 2010.

Accueil du professeur F. Monette, de l'École de Technologie Supérieure de Montréal (ÉTS Montréal, Canada), Professeur invité à l'UTC, août 2011-juillet 2012.

#### **4.2.3 Création et développement d'un groupe de recherche**

Accueil et intégration au groupe de recherche d'E. Antaluca, maître de conférences, novembre 2009.

Recrutement de deux doctorants par mes contacts latino-américains.

Codirection de thèses :

Diana Rodriguez (architecte mexicaine), avec une bourse du CONACYT- gouvernement français. Sujet de thèse : « La lumière naturelle dans le projet d'architecture : apport de la simulation et applications », depuis septembre 2009.

Encadrement : Pr. J-L Batoz (UTC, 10%) et B. Beckers (90%).

Luis Merino (ingénieur chilien), avec une bourse de l'Université de Concepción (Chili). Sujet de thèse : « Analyse et modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique et lumineuse des espaces bâtis », depuis novembre 2009.

Encadrement : Pr. C. Lemaitre (UTC, 10%) et B. Beckers (90%).

Elie Ghanassia (ingénieur français), en CIFRE à EDF R&D, département ENERBAT. Sujet de thèse : « Effets de la morphologie des bâtiments en zone urbaine sur le gisement physique en énergies renouvelables », depuis mars 2009.

Encadrement : Pr. M. Maizia (Université de Tours, 50%) et B. Beckers (50%).

Thibaut Vermeulen (ingénieur français), avec une bourse Collegium UTC-CNRS-Région. Sujet de thèse : « Modélisation et optimisation du potentiel solaire urbain », à partir d'octobre 2011.

Encadrement : Pr. P. Villon (laboratoire Roberval, 50%) et B. Beckers (50%).

Organisation et direction de stages en laboratoire :

Denisse Lecea, architecte, Université Polytechnique de Catalogne, stage pour le mémoire de maîtrise, printemps 2010.

Giuseppe Libertino, architecte, Université Polytechnique de Catalogne, stage pour le mémoire de maîtrise, printemps 2010.

Alejandra Pumar, étudiante architecte, Université de Ségovie, stage de projet de fin d'études, printemps 2010.

Raphaël Nahon, ingénieur, participation au projet REPA-F4, janvier 2011.

Thibaut Vermeulen, étudiant GSU en parcours recherche, UTC, stage de projet de fin d'études, printemps 2011.

Héctor Colonelli, architecte, boursier CONICYT-Ministère de l'Energie (Chili), stage professionnel de 6 mois, printemps 2011.

Alejandro Blanco Callejo, architecte, professeur de l'Université de Ségovie (Espagne), stage Erasmus de mobilité en doctorat (1 semaine), mai 2011.

Philippe Miville-Deschênes, étudiant ingénieur de l'École de Technologie Supérieure de Montréal, stage de 4 mois en acoustique des salles, automne 2011.

Laurent Chénard, étudiant en maîtrise de l'École de Technologie Supérieure de Montréal, stage de 6 mois pour la réalisation du mémoire (co-directeurs : Frédéric Monette et Benoit Beckers), automne 2011.

Développement de la plateforme « GISOL », pour la mesure du rayonnement solaire, l'évaluation du couvert nuageux et le calibrage des simulations numériques (station météo, 2009 ; pyranomètre et luxmètre de précision, 2010 ; caméra fish-eye, pyrgéomètre et mesure IR thermique, 2011).

Développement du logiciel COMRAD, moteur de radiosité pour la simulation des échanges radiatifs à l'échelle urbaine. COMRAD 2D (B. Beckers), COMRAD Ortho (B. Beckers & T. Vermeulen), COMRAD 3D (B. Beckers & E. Antaluca), depuis août 2010.

Dès le printemps 2010, le groupe de travail comprenait neuf personnes (deux enseignants chercheurs, un professeur invité, trois doctorants, trois étudiants master) ; des collaborations effectives en interne (en particulier, avec le professeur P. Villon, du laboratoire Roberval, UTC, pour le développement de méthodes numériques) ; participation active de tous les intégrants du groupe à la réussite du colloque SEUS (mai 2010).

### 4.3 Relations Internationales

---

Responsable des Relations Internationales pour le département GSU et pour l'équipe Avenues. A ce titre, participation au projet de montage d'un département GSU à l'Université de Viña del Mar (Chili), 2008.

Mission au Chili, 9 conférences données dans trois universités (Viña, Concepción, Bío-Bío), un rapport faisant état des nombreux contacts établis. Juillet-août 2008.

Mission au Québec, 22.5 heures de cours en tant que professeur collaborateur au département de Génie de la Construction de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) de Montréal ; contacts pour la recherche. Octobre 2008, novembre 2009, novembre 2010.

Mission à Barcelone, 75 heures de cours, professeur responsable du module 4 du Master IDERA (Fondation UPC) ; contacts pour la recherche. Depuis 2010, professeur invité au programme de doctorat « Architecture et Energie » du département « Constructions architecturales I » de l'ETSAB, UPC, 20 heures de cours. Janvier 2009, janvier 2010, janvier 2011.

Mission Chili-Equateur-Québec, cours et conférences; contacts pour la recherche. Avril 2009.

Mission en Chine, 4 visites d'universités (Xi'an, Hong Kong et Shanghai), participation à un séminaire et un congrès. Juin-juillet 2011.

Participation au montage du projet ARFITTEC (Argentine France Ingénieurs Technologie) ARF-10-03, « Coopération pour l'enseignement de haut niveau » entre l'UTC (départements de Génie des Procédés et de Génie des Systèmes Urbains), l'UNS (Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca) et l'UNCOMA (Universidad Nacional del Comahue, Neuquén), projet sélectionné pour 2011-2012.

Porteur du projet BRAFITTEC (Brésil France Ingénieurs Technologie) N10-04, « Le développement urbain durable : comparaison franco-brésilienne de la conception durable des villes et des quartiers » entre l'UTC (département de Génie des Systèmes Urbains), l'UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) et l'UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), projet sélectionné pour 2011-2012.

#### 4.4 Evaluations et jurys

---

Evaluateur au comité de présélection du prix Roberval pour l'enseignement supérieur, UTC, depuis 2008. Expert pour le prix Roberval, depuis 2010.

Reviewer pour les revues Elsevier « Building and Environment », depuis 2009, et « Energy Engineering », depuis 2011.

Expertise de projet de recherche pour le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada / Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (CRSNG / NSERC), depuis 2010.

Invité par l'ÉTS Montréal au jury de soutenance de maîtrise d'Amélie Parmentier (« Développement d'un outil d'aide à la décision pour atténuer les phénomènes d'îlots de chaleur en milieu urbain »), 9 avril 2010.

Expertise de projets de recherche pour l'Agence Nationale de la Recherche (ANR, France), depuis 2011.

Rapporteur pour la thèse de doctorat “Icada: hacia un indice de calidad acústica de la arquitectura interior”, Enrica d'Aula, UPC, Barcelone, 2011.

Membre du comité organisateur du congrès international « Smart and Sustainable City » (ICSSC 2011), Shanghai, 6-8 juillet 2011.

### 5. PUBLICATIONS ET CONFÉRENCES

---

#### 5.1 Revues internationales avec comité de lecture

---

**“Helping architects to design their personal daylight”**, B. Beckers & D. Rodríguez, WSEAS Transactions on environment and development, issue 7, volume 5, pp 467-477, ISSN: 1790-5079, juillet 2009.

**“Correlation between Measured and Calculated Solar Radiation Data in Compiègne, France”**, E. Antaluca, L. Merino & B. Beckers, WSEAS Transactions on environment and development, issue 6, volume 6, pp 478-487, ISSN: 1790-5079, juin 2010.

**“The universal projection for computing data carried on the hemisphere”**, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Computer-Aided Design (Elsevier, ISSN: 0010-4485), Volume 43, Issue 2, Pages 219-226, février 2011.

**“La modélisation 3D : une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme ? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments”**, A. Prévost, D. Rodríguez, N. Molines, B. Beckers, Revue Internationale de Géomatique (accepté en août 2011).

**“A general rule for circle and hemisphere partition into equal-area cells”**, B. Beckers & P. Beckers, Computational Geometry: theory and applications (Elsevier, ISSN: 0925-7721), 14 pages, (accepté).

## 5.2 Congrès internationaux avec actes

---

**“Descriptive Geometry Mutating to Design Tool”**, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences ICCES’05, ISBN: 0-9717880-0-6, Tech Science Press, pp. 76-81, Chennai et Jaipur, Inde, décembre 2005 (*catégorie: “keynote”*).

**“Enrichment of the visual experience by a wider choice of projections”**, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, The 11th International Conference on CSCW in Design, April 26-28 2007, Melbourne, Australia, in “Proceedings of the 2007 11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design”, IEEE Catalog Number: 07EX1675C, ISBN: 1-42440963-2, Library of Congress: 2007920353, pp. 355-360.

**“Una proyección sintética para el diseño arquitectónico con la luz del sol”**, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, 8° Congreso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica – CIBIM 8, ISBN 978-9972-2885-3-1, 9 pages, Cusco (Pérou), 23-25 octobre 2007.

**“Optimization of daylight in architectural and urban projects”**, B. Beckers & P. Beckers, Second International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, ASMDO, 6 pages, ISBN: 978-2-9529331-3-1, Gijón (Espagne), 2-5 septembre 2008.

**“Helping architects to design their personal daylight”**, B. Beckers & D. Rodríguez, International Conference on Sustainability in Science Engineering (SSE' 09), pp.158-162, ISBN: 978-960-474-080, Timisoara (Roumanie), mai 2009.

**“Las escalas de la luz”**, B. Beckers, 5° Congreso Internacional Ciudad Y Territorio Virtual, 14 pages, ISBN: 978-848157-550-7, Barcelone, juin 2009.

**“The Acoustic Model of the Greek Theatre”**, B. Beckers, N. Borgia, in “Protection of Historical Buildings” - PROHITECH 2009 (Rome), volume 2, Taylor & Francis Group, pp. 1115-20, ISBN: 978-0-415-55803-7, juin 2009.

**“Geometrical interpretation of sky light in architecture projects”**, B. Beckers, Conférence Internationale Scientifique pour le BATiment CISBAT 2009, Renewables in a changing climate – from nano to urban scale, pp. 231-236, proceedings EPFL, Lausanne, Suisse, septembre 2009.

**“Lutte aux îlots de chaleur : Évaluation des mesures favorables à une amélioration du milieu de vie urbain”**, A. Parmentier, F. Monette, B. Beckers & M. Glauss, Colloque Eau, Déchets et Développement Durable (e3d), Alexandrie, Egypte, 28-31 mars 2010.

**“Correlation between Measured and Calculated Solar Radiation Data in Compiègne, France”**, E. Antaluca, L. Merino, B. Beckers, WSEAS Energy and Environment Technologies and Equipment (EEETE '10), pp. 82-87, ISBN: 978-960-474-181-6, University Politehnica, Bucuresti (Roumanie), 20-22 avril 2010.

**“About solar energy simulation in the urban framework: The model of Compiègne”**, B. Beckers, D. Rodríguez, E. Antaluca & J.-L. Batoz, 3rd International Congress Bauhaus.SOLAR, Erfurt, 10-11 novembre 2010.

**“Optimiser l'efficacité énergétique du bâti et de la ville grâce à la modélisation 3D. Enjeux et perspectives d'application”**, A. Prévost, D. Rodríguez, N. Molines, B. Beckers & I. Caudron, 18 pages, Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale SAGEO'10, Toulouse, 17-19 Novembre 2010.

**“Solar Energy Inputs Estimation for Urban Scales Applications”**, L. Merino, E. Antaluca, B. Akinoglu, B. Beckers, 8th International Conference on System Simulation in Buildings SSB 2010, Liège, 13-15 Décembre 2010.

**“Analysis of Clouds Distribution Effect on Daylighting in Urban Environment”**, T. Vermeulen, L. Merino, B. Beckers, 2011 IET International Conference on Smart and Sustainable City, Shanghai, China, July 6-8, 2011.

**“Impact of solar energy on cities sustainability”**, B. Beckers, Architecture and sustainable Development, 27th International conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2011), Louvain-la-Neuve, 13-15 juillet 2011.

**“Urban outlines 2D abstraction for flexible and comprehensive analysis of thermal exchanges”**, B. Beckers, Conférence Internationale Scientifique pour le BATiment CISBAT 20011, EPFL, Lausanne, Suisse, septembre 2011.

**“Solar energy quantification for the whole French urban area”**, E. Ghanassia, M. H. Laurent, M. Maizia, B. Beckers, Conférence Internationale Scientifique pour le BATiment CISBAT 20011, EPFL, Lausanne, Suisse, septembre 2011.

### **5.3 Colloques internationaux sans actes**

---

**“L’architecture et la lumière”**, B. Beckers, atelier recherche international « La lumière naturelle dans les projets architecturaux et urbains », Université de Technologie de Compiègne, 16 mai 2008.

**“Modelling the city thermal behavior”**, P. Villon, E. Antaluca & B. Beckers, colloque international « Solar Energy at Urban Scale », Université de Technologie de Compiègne, 25-26 mai 2010.

### **5.4 Congrès nationaux et revues nationales**

---

**“El sonido lateral y el diseño de salas”**, F. Daumal & B. Beckers (publication du congrès “Tecniacústica”, La Coruña (Espagne) 1995, pp. 67-70, [<http://www.sea-acustica.es/publicaciones/4355fw014.pdf>]).

**“Hacia una acústica para la arquitectura”**, B. Beckers & R. Serra, Congreso ibérico de acústica “Tecniacústica”, Terrassa, octobre 2005. Revista de acústica, 36 (3-4) : 1-6. ISSN: 0210-3680.

**“La acústica diseñada desde su expresión gráfica”**, B. Beckers & H. Coch, Congreso ibérico de acústica “Tecniacústica”, Terrassa, octobre 2005. Revista de acústica, 36 (3-4) : 1-6. ISSN: 0210-3680.

**“Définition d’un modèle géométrique urbain pour la simulation du potentiel solaire”**, D. Rodríguez, A. Prévost, N. Molines, B. Beckers, colloque GIS Modélisation urbaine « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain », Marne la Vallée, 23-24 février 2011.

**“Evaluation du potentiel solaire urbain à l’échelle de la France”**, E. Ghanassia M-H. Laurent, M. Maizia, B. Beckers, colloque GIS Modélisation urbaine « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain », Marne la Vallée, 23-24 février 2011.

## 5.5 Livres

---

Collaboration au livre "*Communication graphique*", auteur: P. Beckers, les Éditions de l'Université de Liège (Belgique), 2003. ISBN: 2-930322-49-7.

*Editeur du livre « Solar Energy at Urban Scale », 15 auteurs (300 pages), ISTE-John Wiley & sons, mars 2012, avec introductions, conclusions et deux chapitres propres.*

## 5.6 Conférencier invité

---

**“Géométrie de la couleur”**, conférencier invité à l’assemblée générale du Département d’Aérospatiale et Mécanique de l’Université de Liège, décembre 2006.

**“Simulación de la luz natural en el proyecto de arquitectura”**, conférencier invité à l’École d’Architecture La Salle, Université Ramón Llull, Barcelone, mai 2007.

**“Geometría del color”**, conférence organisée par l’École Technique Supérieure d’Architecture du Vallés (Université Polytechnique de Catalogne), mai 2007.

**“Las escalas de la sombra”**, Conférencier invité à la séance solennelle de rentrée académique de la Faculté d’Architecture, Urbanisme et Géographie de l’Université de Concepción (Chili), 14 avril 2009.

**“Le bâtiment et la lumière; projets, contrôle et simulation”**, Conférencier invité par le Conseil de l’enveloppe du bâtiment du Québec (CEBQ), Montréal, 29 avril 2009.

**“La ville et la lumière; aspects thermiques, visuels et numériques”**, Conférencier invité par le Conseil de l’enveloppe du bâtiment du Québec (CEBQ), Montréal, 25 novembre 2009.

**“Réflexions sur la modélisation multi-échelles de la ville: état de l'art, défis et propositions”**, B. Beckers, Séminaire NAFEMS France - « Modélisation des Systèmes Complexes ; des composants au système, du système aux détails : le juste nécessaire en simulation ? », Paris, 9 décembre 2009.

**“Planification énergétique urbaine”**, B. Beckers, Innovations numériques au service de la ville durable - Vers la ville intelligente, 5<sup>ème</sup> édition Ville numérique, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), Paris, 4 mai 2011.

## 5.6 Rapports

---

Rapports présentés sur le site [www.heliodon.net](http://www.heliodon.net) :

**Nociones de acústica técnica**, B. Beckers, informe Acou\_001\_es, 2002.

**Le diagramme solaire**, B. Beckers, Rapport Helio\_001\_fr / **El diagrama solar**, Informe Helio\_001\_es, 2003.

**Approche géométrique et fréquentielle de la thermique du bâtiment**, B. Beckers & H. Arham, Rapport Helio\_002\_fr, 2005.

**Le modèle acoustique du théâtre grec**, B. Beckers & N. Borgia, rapport Acou\_002\_fr, 2006.

**The acoustic model of the Greek theatre**, report Acou\_002\_en, 2007.

**Une projection synthétique pour la conception architecturale avec la lumière du soleil**, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Rapport Helio\_003\_fr, 2008.

**Commentaires sur l'analogie de Nusselt**, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Rapport Helio\_004\_fr, 2009.

**Interpretación geométrica de la luz del cielo en el proyecto de arquitectura**, B. Beckers, Informe Helio\_005\_es. **Geometrical interpretation of sky light in architecture projects**, Report Helio\_005\_en, 2007.

**Les anomalies, l'équation de Kepler, la position du soleil**, B. Beckers & P. Beckers, Rapport Helio\_006\_fr, 2010.

**Comment calculer la déclinaison du soleil**, B. Beckers & P. Beckers, Rapport Helio\_007\_fr, 2010.

**Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère**, B. Beckers & P. Beckers, Rapport Helio\_008\_fr, 2011.

## 6. COLLABORATIONS UNIVERSITAIRES ET INDUSTRIELLES

---

### 6.1 Collaborations universitaires

---

6.1.1 Collaboration avec le Département d'Aérospatiale et Mécanique de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège (Belgique) dans les domaines de la géométrie descriptive, de la communication graphique et des méthodes géométriques de simulation numérique. Deux séjours ont permis d'échanger des connaissances de géométrie et de programmation (Matlab<sup>®</sup>, Autodesk Viz4<sup>®</sup>, Catia<sup>®</sup>, ...); juin - août 2003; juillet - août 2004.

En 2006-08, trois étudiants ont réalisé à Liège leur projet de master sur la programmation de fonctions nouvelles dans le logiciel Heliodon.

6.1.2 Direction de la ligne de recherches sur l'acoustique architecturale et l'illumination naturelle pour l'association PAUS (« projets d'architecture et développement durable »), émanation de l'Ecole d'Architecture du Vallès (UPC), de l'Ecole d'Architecture de La Salle (Barcelone), de la Cellule pour le Développement des Energies Renouvelables de la Mairie de Barcelone et de l'Ordre des Architectes de Barcelone. Mars 2007 – janvier 2008.

Dans ce cadre, participation à Construmat (Salon professionnel de la construction de Barcelone, le plus important en Espagne, avec environ 200 000 visiteurs tous les deux ans), dans le Pavillon des Énergies Renouvelables, monté par l'association PAUS, mai 2007.

6.1.3 Collaboration avec l'Ecole Technique Supérieure d'Architecture de Barcelone, avec des cours réguliers en maîtrise et en doctorat, suivi de thèses de maîtrise.

“Méthodes géométriques pour la conception architecturale de l'éclairage et de l'acoustique”, cours de maîtrise, 75 heures, depuis 2004.

“Introduction à l'acoustique des salles”, cours de doctorat, 20 heures, depuis 2010.

6.1.4 Collaboration avec le département de Génie de la Construction et le laboratoire STEPPE de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal. Dans ce cadre, participation régulière au cours de maîtrise « ENV 835 : Ecosystèmes Urbains » (15 heures/an).

6.1.5 Collaboration avec l'Université de Concepción (UdeC, Chili), avec les départements de génie mécanique (sur le projet REPA-F4), de génie de la construction (obtention d'une bourse de doctorat pour le professeur assistant Luis Merino, et direction de la thèse en cours), d'architecture, urbanisme et géographie.

Organisation du séjour à l'UTC du Professeur Cristian Cuevas (UdeC), dans le cadre du projet REPA-F4, 7-21 mai 2011.

6.1.6 Participation au montage du laboratoire COMPLEXCITY, entre les Universités de Technologie (UTC, UTT et UTBM) et l'Université de la ville de Shanghai.

## **6.2 Valorisation et transfert**

---

6.2.1 Réalisation d'une version commerciale du logiciel Heliodon 2<sup>TM</sup>, en juin 2009, à travers la structure UTeam (marque déposée en juin 2008 à l'INPI, B. Beckers & L. Masset, n° National : 08 3 583 163, publié au bulletin officiel de la propriété industrielle n°08/47 vol. II 21/11/08).

Rédaction d'un manuel complet du logiciel « Heliodon 2 » en français et en espagnol (B. Beckers, 40 pages, octobre 2008 et février 2009).

6.2.2 Création du site internet "<http://www.heliodon.net>" (janvier 2009).

Le site, rédigé en anglais, est organisé en trois parties : « Designing with daylight » (avec le logiciel *Heliodon 2*), « Architectural acoustics » (avec le logiciel *Radit2d*) et « Sensitive geometry » (avec ma thèse de doctorat).

Chaque partie contient des annonces sur les événements à venir et les mises à jour, de nombreux documents à télécharger (rapports du groupe de recherche, travaux d'étudiants et mémoires de maîtrise, articles scientifiques,...) et des liens vers des sites sélectionnés sur la qualité de leur contenu.

En septembre 2011, il avait reçu 23 300 visites.

6.2.3 Porteur du projet UNIT « Apports solaires dans les projets architecturaux urbains », prévoyant la création de vingt modules multimédia pour l'auto-apprentissage et l'enseignement à distance, depuis mai 2011.

## A.2 Présentation du choix d'articles

### *Acoustique des salles*

1. « Le modèle acoustique du théâtre grec », B. Beckers & N. Borgia, rapport Acou\_002\_fr, 2006.

Ce rapport a donné lieu à une communication en congrès : “The Acoustic Model of the Greek Theatre”, B. Beckers, N. Borgia, in “Protection of Historical Buildings” - PROHITECH 2009 (Rome), volume 2, Taylor & Francis Group, pp. 1115-20, ISBN: 978-0-415-55803-7, juin 2009.

### *Géométrie du rayonnement*

2. « Enrichment of the visual experience by a wider choice of projections », B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, The 11th International Conference on CSCW in Design, April 26-28 2007, Melbourne, Australia, in “Proceedings of the 2007 11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design”, pp. 355-360.

3. « The universal projection for computing data carried on the hemisphere », B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Computer-Aided Design, Volume 43, Issue 2, Pages 219-226, février 2011.

4. « A general rule for circle and hemisphere partition into equal-area cells », B. Beckers & P. Beckers, soumis à “Computational Geometry: theory and applications” en juillet 2010.

### *L'architecture et la lumière*

5. « Geometrical interpretation of sky light in architecture projects », B. Beckers, Report Helio\_005\_en, 2007.

Ce rapport a donné lieu à une communication en congrès : “Geometrical interpretation of sky light in architecture projects”, B. Beckers, Conférence Internationale Scientifique pour le BATiment CIBAT 2009, Renewables in a changing climate – from nano to urban scale, pp. 231-236, proceedings EPFL, Lausanne, Suisse, septembre 2009.

6. « Une projection synthétique pour la conception architecturale avec la lumière du soleil », B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, Rapport Helio\_003\_fr, 2008.

Ce rapport est la version française d'une communication à congrès : “Una proyección sintética para el diseño arquitectónico con la luz del sol”, B. Beckers, L. Masset & P. Beckers, 8° Congreso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica – CIBIM 8, Cusco (Pérou), 23-25 octobre 2007.

7. « Helping architects to design their personal daylight », B. Beckers & D. Rodríguez, WSEAS Transactions on environment and development, issue 7, volume 5, pp 467-477, juillet 2009.

### *Nouveaux développements*

8. « Solar Energy Inputs Estimation for Urban Scales Applications », L. Merino, E. Antaluca, B. Akinoglu, B. Beckers, 8th International Conference on System Simulation in Buildings SSB 2010, Liège, 13-15 décembre 2010.

9. « Evaluation du potentiel solaire urbain à l'échelle de la France », E. Ghanassia M-H. Laurent, M. Maïzia, B. Beckers, colloque GIS Modélisation urbaine « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain », Marne la Vallée, 23-24 février 2011.

10. « Analysis of Clouds Distribution Effect on Daylighting in Urban Environment », T. Vermeulen, L. Merino, B. Beckers, 2011 IET International Conference on Smart and Sustainable City, Shanghai, China, 6-8 juillet, 2011.

11. « Impact of solar energy on cities sustainability », B. Beckers, Architecture and sustainable Development, 27th International conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2011), Louvain-la-Neuve, 13-15 juillet 2011.

12. « La modélisation 3D : une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme ? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments », A. Prévost, D. Rodríguez, N. Molines, B. Beckers, Revue Internationale de Géomatique (accepté en août 2011).

*Programme des deux colloques et du livre*

13. Programme de l'atelier recherche international « La lumière naturelle dans les projets architecturaux et urbains », Université de Technologie de Compiègne, 16 mai 2008.

14. Programme du colloque international « Solar Energy at Urban Scale », Université de Technologie de Compiègne, 25-26 mai 2010.

15. Programme du livre « Solar Energy at Urban Scale », éd. ISTE/John Wiley & sons, en préparation.