Paramètres physiques des ambiances architecturales

Francis Miguet

▶ **To cite this version:**

Francis Miguet. Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Nantes, 2000. Français. NNT : . tel-00546996

HAL Id: tel-00546996

https://theses.hal.science/tel-00546996

Submitted on 15 Dec 2010

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

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

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITE DE NANTES

ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE NANTES

Année 2000

Thèse de doctorat

Discipline *Sciences de l'Ingénieur*

Spécialité *Architecture*

Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain

Présentée et soutenue publiquement
le 13 octobre 2000 à l'École d'Architecture de Nantes

par

Francis Miguet

directeur de thèse : Jean-Pierre PENEAU

jury composé de :

Francis ALLARD, Professeur à l'Université de La Rochelle – Rapporteur
Didier ARQUES, Professeur à l'Université de Marne la Vallée – Rapporteur
Jean-Jacques DELETRE, Professeur à l'École d'Architecture de Grenoble
Pierre-Yves NIZOU, Professeur à l'École Polytechnique de l'Université de Nantes
Bernard PAULE, Docteur ès Sciences Techniques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Jean-Pierre PENEAU, Professeur à l'École d'Architecture de Nantes

Paramètres physiques
des ambiances architecturales :

Un modèle numérique pour la simulation
de la lumière naturelle dans le projet urbain

Résumé

Parmi les diverses entités que l'architecte est amené à manipuler au cours du processus de conception, les « ambiances » constituent un domaine éminemment complexe, constitué des interactions que l'usager perçoit entre les phénomènes physiques et les formes de l'environnement construit. La lumière naturelle s'inscrit précisément dans ce cadre, où la variabilité individuelle vient s'ajouter à l'aspect dynamique des phénomènes.

Or s'il est manifeste que les architectes s'attachent de manière permanente au travail sur la forme, ils ne semblent pas toujours traiter avec la même rigueur la disponibilité en lumière naturelle et les interactions diffuses. La complexité des notions abordées et le manque d'outils de simulation en sont sans doute les raisons majeures.

Nous proposons donc, en nous appuyant sur des travaux préalables du laboratoire CERMA de l'École d'Architecture de Nantes, le développement d'un nouvel outil logiciel susceptible d'évaluer de manière performante la lumière naturelle au sein du projet architectural et urbain, à partir d'une maquette numérique tridimensionnelle de l'espace étudié. Si certains travaux concernant l'évaluation de la lumière naturelle dans les espaces intérieurs existent déjà, en revanche les espaces extérieurs restent, en dehors d'aspects relatifs à l'ensoleillement, rarement envisagés ; notre premier objectif est donc de considérer indifféremment espaces intérieurs et espaces extérieurs, et de les soumettre de manière globale aux conditions d'éclairement qui résultent de l'ensemble constitué du soleil et de la voûte céleste. Celles-ci sont basées sur des modèles de distribution statistiques.

Notre perception de la lumière provenant exclusivement de sa réflexion sur les matériaux, ceux-ci jouent un rôle essentiel dans les échanges entre les différentes surfaces de l'environnement. Le second objectif est donc de prendre en compte ces réflexions complexes, au travers de vitrages éventuellement. Il est atteint en adoptant un traitement informatique s'inspirant de la théorie des échanges radiatifs établie par les thermiciens il y a plus d'un demi-siècle, reprise et instrumentée dans des recherches plus récentes (années 80) sur l'image numérique.

En dernier lieu sont proposés quelques exemples d'application dans le domaine lumineux, mettant en évidence les potentialités d'analyse de l'outil développé ; ils sont complétés par les perspectives qu'offrent les modalités de traitement utilisées, notamment dans le champ de la micro-climatologie urbaine.

Abstract

Among the various entities which the architect is brought to handle during the design process, the « ambiances » constitute an eminently intricate field. It consists in the interactions that the user perceive between the physical phenomena and the forms of the built-up areas. The natural light lies precisely within this scope, where individual variability comes to be added to the dynamic aspect of the phenomena.

It is manifest that the architects stick in an obvious and permanent way to work on form; however they always do not seem to treat with the same rigour the availability in natural light and the diffuse interactions. The major reasons are undoubtedly the complexity of the concepts approached and a lack of simulation tools.

Thus we propose the development of a new software tool, based on a preliminary work of the laboratory CERMA of the School of Architecture of Nantes. It is likely to evaluate in a powerful way the natural light within the architectural and urban project, starting from a three-dimensional numerical model of the studied space. Some previous work concerning the evaluation of the natural light in interior spaces has already been made, but external spaces remain seldom considered, apart from solar aspects may be; our prime objective is thus to consider interior spaces and external spaces indifferently, and to submit them to the various conditions of insolation which result from both sun and sky. Those models are built with statistical distributions.

But our perception of the light comes exclusively from its reflexion on materials; so those play an essential part in the exchanges between the various surfaces of the environment. The second objective is thus to take into account these complex reflexions, even through glazings. It is reached by adopting a data-processing treatment taking the theory of the radiative exchanges as a starting point. It was established by the thermal engineers more than a half-century ago, “rediscovered” and instrumented in more recent research about digital imaging by the image synthesis community.

Lastly significant results are proposed; we have chosen some application examples in the luminous field, underlining the potentialities of analysis of the tool developed. They are supplemented by the prospects which the methods of treatment offer, particularly in the field of the urban microclimatology.

Sommaire

Chapitre 1.	**Introduction ; contexte de la recherche**	**5**
Chapitre 2.	**SOLENE : état de l'existant ; propositions de développement**	**17**
Chapitre 3.	**Aspects physiques**	**41**
Chapitre 4.	**Lumière et architecture : quelques repères historiques**	**55**
Chapitre 5.	**Évaluation de l'énergie lumineuse dans le projet architectural et urbain : état de l'art**	**71**
Chapitre 6.	**Le modèle d'éclairement développé pour SOLENE**	**143**
Chapitre 7.	**Mise en place d'un modèle de réflexion**	**227**
Chapitre 8.	**Instrumentation et traitement des vitrages**	**283**
Chapitre 9.	**Conclusions et perspectives**	**315**
Annexe 1.	**Grandeurs physiques utilisées ; définitions et unités**	**323**
Annexe 2.	**Programmes intégrés au logiciel SOLENE**	**339**
Annexe 3.	**Modèle ; modélisation et simulation numérique**	**343**
	Bibliographie	**347**
	Table des matières	**355**

« La lumière n'est pas une identité vague, que l'on considère comme certaine parce qu'elle est toujours présente (...)

Le soleil ne se lève pas en vain tous les jours. La lumière, au contraire, avec ou sans théorie corpusculaire, est quelque chose de concret, de précis, de certain. C'est une matière mesurable et quantifiable, comme le savent bien les physiciens mais semblent l'ignorer les architectes ». [A. C. Baeza] [1]

1 Introduction ; contexte de la recherche

1.1 Contexte

La crise pétrolière des années soixante-dix a conduit de nombreux acteurs de la construction à privilégier de toutes les manières possibles les gains énergétiques, notamment en favorisant au maximum la pénétration des rayons solaires à l'intérieur des locaux. Malheureusement ces problèmes d'ordre thermique ont eu tendance à mobiliser toutes les attentions, au dépend (au mépris ?) d'autres aspects relevant du confort des usagers. Parmi ceux-ci le confort visuel, où l'ardeur du soleil a entraîné de nombreux problèmes d'éblouissement, auxquels il a fallu remédier par des dispositifs d'occultation le plus souvent individuels (dispositifs mobiles tels que stores, rideaux, etc.). Les apports solaires exagérés ont également conduit à des phénomènes de surchauffe durant l'été (avec des remèdes identiques aux précédents), le tout complété par un vieillissement prématuré de certains matériaux sous l'abondance des rayons ultraviolets – et particulièrement celui des protections qui viennent d'être évoquées, menant ainsi à des façades peu harmonieuses...

Cette « réhabilitation » du soleil en tant que source d'énergie s'est d'abord faite au titre d'énergie de remplacement d'une énergie fossile devenue incertaine – sur le plan de la pérennité des ressources du sous-sol bien sûr, mais aussi et surtout en raison de l'état de dépendance économique auquel la majorité des pays de l'hémisphère nord se sont brutalement trouvés confrontés. Depuis une quinzaine d'années pourtant, une prise de conscience de la détérioration de l'environnement en général, et de l'environnement urbain en particulier, nourrie par quelques catastrophes écologiques de grande ampleur, a conduit à (vouloir) reconsidérer le rapport de l'homme à son environnement.

---

[1] Alberto Campo Baeza, architecte, dans un article intitulé *Architectura sine luce nulla architectura est*, paru dans Domus n° 760, mai 1994, p. 86.

Parmi les divers questionnements revient notamment celui concernant le « droit au soleil » ; or à la suite des avatars de la première époque, il s'agit de s'interroger cette fois plus sérieusement sur la manière de réguler ses apports dans les constructions, de manière à conjuguer meilleure qualité de confort avec économies d'énergie substantielles, en recherchant en particulier dans les locaux un équilibre entre éclairage naturel et artificiel. Même si l'on ne peut nier que de nombreuses actions vont dans ce sens, et plus globalement encore vers une meilleure prise en compte des aspects environnementaux en général, qu'elles soient collectives (au niveau mondial ou à l'échelle d'une nation), ou de plus petite envergure (à l'échelle d'une commune, d'un groupement associatif), voire même individuelle, il faut bien reconnaître que les objectifs sont encore bien loin d'être atteints. Ou bien les enjeux économiques à court terme ne plaident pas en faveur de solutions de longue haleine, ou bien les habitants des « pays en voie de développement » ne se sentent absolument pas concernés pas de telles préoccupations, les leurs demeurant essentiellement de l'ordre de la subsistance quotidienne.

Outre les aspects économiques, la disponibilité de cette énergie solaire[2] constitue un écueil majeur : si elle est effectivement présente en permanence à la surface terrestre (au même titre que le vent, les marées, etc.), sa disponibilité n'est pas nécessairement continue dans le temps ; si le bilan de cette énergie qui parvient en un site donné est relativement constant sur de longues périodes – c'est ainsi qu'il est possible de dresser des cartographies de la durée moyenne d'ensoleillement mensuel ou annuel (Fig. 1.) –, les fluctuations sur de courtes périodes peuvent être très importantes (Fig. 2.).

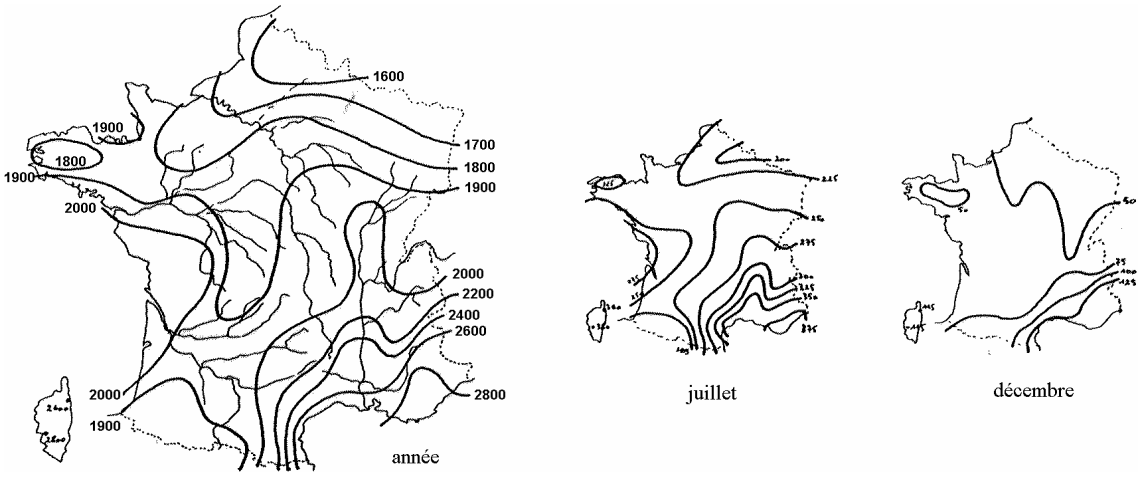


Fig. 1. A gauche cartographie de l'ensoleillement annuel moyen (en heures) sur le territoire français ; à droite le même type d'information mais pour deux mois particuliers de l'année (ces cartes sont quelque peu erronées dans la mesure où elles ne tiennent pas compte de l'altitude). À noter que les stations météorologiques sont susceptibles de fournir des données plus complètes (énergie, luminance, etc.) qu'une simple durée d'ensoleillement.

[2] On entend ici par énergie solaire d'une part l'énergie thermique dispensée par le soleil dans sa majeure partie, d'autre part l'énergie lumineuse, qui provient à la fois du soleil et de la voûte céleste – alors que le soleil constitue effectivement la seule et unique source d'énergie.

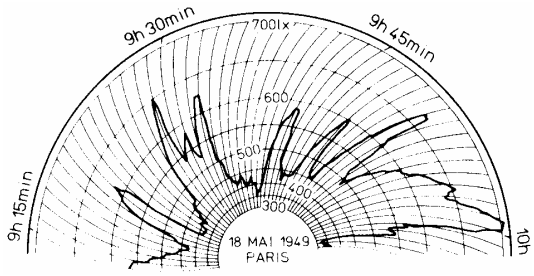


Fig. 2. Relevé montrant la variabilité importante (de 350 à 700 lux) du niveau d'éclairement dispensé par la voûte céleste sur une courte période de temps (3/4 heures) – sans soleil direct (d'après Techniques de l'Ingénieur, C 3 315-7).

Et s'il est manifeste que l'impact de l'énergie solaire sur l'environnement construit est considérable, il reste difficile à maîtriser précisément en raison de la variabilité importante de l'état du ciel : variabilité sur une journée, fluctuations saisonnières, changements plus ou moins importants et rapides selon le lieu géographique (importants et parfois soudains sur le littoral atlantique, en général plus lents et prévisibles dans l'est de la France ou les régions alpestres), « évènements » climatiques (orages, tempêtes), etc.

Dans l'environnement urbain, les éléments du bâti viennent modifier la pénétration de l'énergie solaire (énergie thermique et lumière) de deux manières radicalement différentes : d'une part en limitant son apport en réduisant les portions de ciel « visibles » (masques ou obstructions), d'autre part par réflexion de la lumière provenant à la fois du soleil et de la voûte céleste sur les prospects. Ce dernier aspect est souvent négligé ou tout simplement ignoré, alors que son importance peut devenir prépondérante dans certaines circonstances.

On verra dans la suite que la lumière naturelle est dispensée principalement par les parties hautes du ciel (région zénithale) ; dans une rue étroite donc, où la probabilité pour que l'ensoleillement direct vienne frapper les façades est déjà très faible (et plus encore en hiver sous nos latitudes), seul le sol de la rue bénéficiera réellement des apports lumineux de la voûte céleste – les façades du rez-de-chaussée beaucoup plus faiblement en raison de leur orientation vis à vis des portions de ciel qui les éclairent ; elles resteront donc relativement sombres, ne contribuant quasiment jamais, par réflexion, à accroître le niveau lumineux dans les parties intérieures. S'il s'agit de rues plus larges par contre, la lumière réfléchie sur les prospects peut alors devenir une véritable source de lumière pour les étages inférieurs ; l'effet est particulièrement sensible par temps ensoleillé ; il a même été montré que pour des climats ensoleillés, les apports dus à la lumière réfléchie peuvent être supérieurs à ceux en provenance directe de la voûte céleste (cas d'une façade nord qui reçoit la lumière réfléchie par une façade sud largement ensoleillée par exemple).

Enfin l'aspect spectral n'est pas à négliger, puisqu'il est maintenant bien connu que par ciel clair, les zones de ciel de faible altitude, voisines de l'horizon donc, sont de lumi-

nance plus importante que la région zénithale, car en général plus brumeuses ; les zones proches du zénith sont d'un bleu plus profond, donnant finalement une teinte plus « froide » à l'environnement, surtout en hiver.

1.2 Objet de la recherche

Ces quelques rappels à propos de situations urbaines typiques posent de manière évidente et immédiate le problème de la complexité des relations entre la morphologie de la ville et les conditions naturelles d'insolation (énergie solaire) et d'exposition lumineuse (voûte céleste) ; le problème est plus ardu encore s'il s'agit de les quantifier, d'identifier des typologies, et finalement de diagnostiquer, dans les phases amont du projet ou de l'aménagement, des situations susceptibles de nuire au confort des usagers. A noter que les relations en question pourront affecter aussi bien la disponibilité en lumière naturelle à l'intérieur des locaux que la perception qu'aura l'usager des espaces extérieurs ; dans la première hypothèse, les nombreux paramètres qui entrent en ligne de compte conduisent à une analyse et à des calculs en général assez fastidieux, et la seconde situation s'avère plus délicate encore à approfondir puisqu'elle repose sur des facteurs d'appréciation individuels, donc largement subjectifs.

On retrouve d'ailleurs cette interdépendance entre caractéristiques morphologiques des bâtiments et qualité des espaces urbains environnants dans d'autres domaines disciplinaires : celui de la micro-climatologie urbaine notamment (aspects thermiques, hygrométriques, aérodynamiques, etc.), de même que dans le champ de l'acoustique urbaine. Là encore, si les interactions entre la forme bâtie et l'environnement sont sans doute indiscutables, la manière souvent simpliste de les considérer vise le plus souvent au simple respect des aspects normatifs. Satisfaire aux exigences d'une norme n'implique cependant pas la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, de sorte que les solutions proposées risquent de devenir sources d'inconfort pour l'usager.

La complexité qui vient d'être évoquée, dans le domaine lumineux particulièrement, a amené les scientifiques à définir certaines méthodes d'analyse aux principes relativement simples (prise en compte immédiate d'abaques représentant les trajectoires apparentes du soleil), mais elles ne sont applicables qu'à condition de se placer dans des configurations très basiques également (géométries très simplifiées, restriction à des locaux rectangulaires pour les espaces intérieurs, ouvertures « standard », etc.) ; et malgré toutes ces simplifications, elles demeurent parfois encore assez lourdes à manipuler.

En revanche, le traitement des situations complexes reste problématique. Outre le fait d'ignorer purement et simplement ce type de configuration (!), il est peut paraître intéressant de les simplifier à l'extrême, de telle sorte que les méthodes précédentes puissent être applicables ; mais dans ce cas la plus grande incertitude plane sur la validité des résultats obtenus puisque de nombreux paramètres ont été négligés, voire omis. Une

autre voie est de les scinder en situations « simples » multiples, mais alors la méthode ne permet pas d'envisager les interactions susceptibles d'intervenir entre elles, niant par là-même tout phénomène d'interdépendance.

Il paraît donc évident que le contrôle de l'énergie solaire et de la lumière naturelle répond à un besoin – sinon à une attente – des architectes, des aménageurs et des techniciens du bâtiment ; il concerne également, sur un plan plus analytique cette fois, le scientifique, le chercheur, etc., en fait toute personne investie dans une problématique relative aux caractéristiques des matériaux[3] et/ou aux dispositifs susceptibles de permettre un meilleur contrôle de l'utilisation des énergies thermique et lumineuse au sein des bâtiments ou dans l'environnement urbain.

Mais, si comme on vient de le voir, les configurations extrêmement simples peuvent se satisfaire de méthodes d'évaluation rapides, une prise en compte sérieuse du rayonnement solaire et la disponibilité en lumière naturelle dans des zones urbaines à la morphologie tourmentée ou au relief perturbé nécessite des outils d'analyse beaucoup plus performants : c'est le cas par exemple pour des tissus complexes (tissu ancien notamment, en général sujet à réhabilitation, donc à interrogation, de la part du maître d'œuvre, sur la disponibilité en lumière naturelle à l'intérieur des locaux, souvent pauvre à l'origine), ou bien d'un relief urbain tourmenté, ou encore de dispositifs architecturaux que l'on peut qualifier « d'espaces intermédiaires », comme les arcades, galeries, prostyles, etc. ; leur comportement au titre d'écrans visuels et vis à vis de la lumière diffuse surtout est beaucoup moins simple qu'il n'y paraît en première analyse.

De plus, lorsque le lieu d'implantation est soumis à des conditions climatiques très changeantes, les variations saisonnières peuvent conduire à des solutions architecturales et constructives totalement contradictoires. C'est précisément le cas de nos régions tempérées, qui grossièrement recherchent les apports thermiques d'hiver mais doivent en revanche se protéger du rayonnement solaire de la saison chaude ; et c'est bien ce type de contradiction que n'ont pas su gérer les solutions issues de la crise pétrolière de la deuxième moitié des années soixante dix, en privilégiant exclusivement les apports solaires.

C'est pourquoi à l'heure actuelle il n'est plus possible de se satisfaire d'outils se bornant à vérifier les niveaux d'éclairement minima par exemple (afin de répondre aux normes imposées par la fonction du local), dans les conditions d'insolation les plus défavorables (ciel couvert très sombre). On sait fort bien maintenant que des conditions climatiques « opposées » aux précédentes – c'est-à-dire très favorables sur le plan de l'éclairement – risquent d'engendrer un inconfort nettement supérieur à la gêne qu'occasionnerait un éclairage naturel de faible niveau, à l'occurrence très faible. En effet elles risquent de mener aux problèmes déjà évoqués plus haut comme éblouissement, surchauffe thermi-

[3] Par exemple le type de réflexion (spéculaire, diffuse...), le facteur de réflexion s'il s'agit de matériaux opaques, le facteur solaire et le facteur de transmission lumineux des produits verriers, ou les cas encore plus complexes des matériaux semi-réfléchissants et translucides...

que, ou encore vieillissement prématuré de certains matériaux en raison de la grande quantité de rayons ultra-violets.

Cette nécessité d'outils performants se fait également fortement sentir dans le domaine de la préservation et de la restauration du patrimoine ; en effet, qu'il s'agisse d'apports en rayonnement solaire direct ou en lumière diffuse, la qualité de la lumière naturelle à l'intérieur de nombreux bâtiments historiques (temples, cathédrales, halls divers, etc.) a été souvent célébrée par les historiens, mais en dehors de descriptions plus ou moins élogieuses, il n'existe quasiment aucune mesure objective du caractère réel de cette lumière diffuse (spectre, intensité, etc.). La conséquence de cet état de fait est double : d'une part, la pertinence de ces effets ne peut être transmise, et d'autre part leurs aspects bénéfiques ne peuvent être appliqués à des constructions nouvelles. Il paraît donc intéressant de pouvoir simuler, à partir des différents types de données disponibles (dimensions des prises de jour, orientation de la construction, matériaux, etc.), la répartition de la lumière diffuse au sein de l'édifice.

De plus, les exemples de restaurations malheureuses de bâtiments historiques, au regard des aspects lumineux toujours, ne manquent guère... Nombre de réhabilitations ont été effectuées au mépris total de l'éclairage naturel, pour privilégier des systèmes artificiels permanents qui assurent peut-être une plus grande flexibilité quant à l'usage des lieux, mais qui sont susceptibles de générer, outre des inconvénients relevant directement du confort visuel, des problèmes de conservation (pérennité des peintures, des dorures, des sculptures...). Ces remarques sont sans doute un peu moins vraies maintenant dans la mesure où les principaux acteurs – direction du patrimoine, maîtres d'œuvre, etc. – ont commencé à prendre conscience de ces différents aspects, avec des bonheurs divers toutefois. Aussi une aide à la prise de décision dans le processus de réhabilitation ne peut être que bienvenue, et parfois même indispensable afin d'éviter certaines erreurs grossières.

Enfin les secteurs du diagnostic et de l'expertise sont eux aussi en demande d'outils d'évaluation, de vérification, et de corrections éventuelles dans les champs de l'ensoleillement et de la lumière naturelle ; leurs propos se bornent malheureusement bien souvent à un simple contrôle, par simulations numériques, du niveau d'éclairement des locaux et de son homogénéité, dans le seul but de satisfaire aux normes (d'un label de qualité environnementale par exemple).

Il apparaît donc clairement que la mise en œuvre de dispositifs instrumentaux plus performants dans les domaines de l'ensoleillement et de l'éclairement diffus devrait pouvoir contribuer à une meilleure connaissance des liens potentiels entre la morphologie du bâti et les caractéristiques ambiantales (extérieures et intérieures) qui en résultent, et permettre ainsi d'en dégager les invariants, ou au contraire les aspects singuliers, tous deux significatifs de la typologie urbaine.

Or, s'il existe à l'heure actuelle un assez grand nombre d'outils logiciels dans le domaine de l'éclairagisme, la plupart traitent avant tout de l'éclairage artificiel ; il en existe par contre très peu dans le domaine de l'éclairage naturel. Ils restent surtout développés et utilisés dans le monde de la recherche, précisément en raison des préoccupa-

tions relativement récentes portées à l'utilisation de la lumière du jour (à la fois pour des raisons d'économie et de « mise en scène » de cette lumière naturelle).

1.3 Objectifs

L'ensemble de ces constatations nous a finalement conduit, de manière assez logique d'ailleurs, à tenter de mettre au point un « outil » qui, au regard des problèmes d'ensoleillement et de lumière naturelle, soit susceptible de répondre aux diverses interrogations, aux manques et aux besoins qui viennent d'être évoqués. L'objectif est de dépasser les techniques d'évaluation rapide, en réalisant un ensemble de procédures d'investigation susceptibles d'assurer le traitement de situations complexes, tant sur le plan de la géométrie du site urbain étudié que sur celui des conditions d'insolation et d'éclairement. L'outil doit permettre à terme d'informer le concepteur sur l'impact d'une construction sur son environnement immédiat, compte tenu de sa morphologie et des matériaux utilisés, et donc de dégager des éléments relatifs au confort extérieur et intérieur, ou encore des solutions pertinentes au regard des économies d'énergie.

En outre il est possible d'espérer que le développement d'un tel outil au sein d'un laboratoire de recherche affilié à une école d'architecture permette un transfert plus aisé de certaines notions à caractère scientifique vers les étudiants architectes, en général assez « frileux » dans ces domaines (en France particulièrement). Le fait qu'il ait été développé, qu'il soit utilisé et enseigné par des architectes enseignant dans l'école permet sans doute de mettre beaucoup plus clairement en évidence l'intérêt d'un tel outil dans le domaine de la conception architecturale, mieux peut-être – et c'est évidemment à souhaiter – que ne saurait le faire une approche exclusivement scientifique et technique...

Un dernier objectif enfin, qui vient finalement en complément du précédent, concerne les aspects « ergonomiques » de l'outil. Nombre de codes de calcul à caractère scientifique, dans le domaine des structures notamment, restent difficiles d'abord pour l'architecte, en raison des connaissances préalables que leur utilisation suppose ; le problème se pose de manière identique ici, et c'est pourquoi, même si les aspects concernant la relation homme/machine sont en dehors de notre champ d'investigation, il est nécessaire de s'efforcer de rendre l'outil développé d'un abord et d'une utilisation aussi aisés que possible, toujours dans le sens de cette préoccupation relative au transfert des connaissances capitalisées par la recherche vers l'enseignement.

1.4 Méthodologie

Comme il vient d'être précisé, l'origine du présent travail de recherche est fondée sur le constat du besoin manifeste d'un outil performant dans le domaine de l'éclairement na-

turel, capable de prendre en compte les sources constituées par le soleil et le ciel, mais également celui en provenance, par réflexion, des différentes surfaces de l'urbain (le « diffus »). Il va s'appuyer et venir compléter un outil logiciel développé depuis plusieurs années déjà par une équipe du laboratoire CERMA de l'École d'Architecture de Nantes, logiciel dénommé SOLENE. Cet outil de simulation aux performances incontestables présentait pourtant l'inconvénient de se limiter aux aspects solaires essentiellement ; en revanche son potentiel était très important sur le plan de l'analyse des configurations architecturales ou urbaines au regard de leur condition d'ensoleillement, et notamment la possibilité de requêtes multiples (formulées par l'utilisateur) portant sur les résultats des simulations (constitués en fichiers de données) permettant d'établir des cartographies tridimensionnelles du site étudié : par exemple l'état d'ensoleillement d'un point à un instant donné, la durée d'ensoleillement de ce point sur un intervalle de temps, l'énergie solaire reçue par une façade, etc.

Le propos fut donc de poursuivre les investigations dans le champ de la lumière naturelle, aussi bien dans sa répartition et sa « provenance » depuis la voûte céleste que dans son interaction avec la surface des matériaux du bâti ; il s'agissait de s'appuyer en grande partie sur les procédures déjà développées dans le logiciel SOLENE et de profiter des performances de sa capacité d'analyse. Les nouvelles procédures mises en œuvre pour la prise en compte de l'ensemble de la voûte céleste ont également permis de reconsidérer d'une manière beaucoup plus fine les aspects relatifs à l'énergie provenant directement de l'astre solaire (puisqu'il s'agit en fait de la source d'énergie unique et « originelle »).

Ces développements se sont appuyés en premier lieu sur une bibliographie importante dans le domaine des formulations statistiques relatives aux conditions d'insolation, afin de dégager un modèle susceptible de prendre en compte l'ensemble des conditions de ciel – et de dépasser le simple cadre normatif. Ils ont également nécessité des investigations dans le champ des échanges énergétiques entre les surfaces, et plus particulièrement dans celui des images de synthèse calculées selon la méthode des « radiosités », technique développée par la communauté infographique pour le traitement des échanges lumineux entre surfaces diffuses. Cette méthode s'avère particulièrement adaptée au type de réflexion de la plupart des matériaux utilisés dans la construction (considérés comme lambertien) ; cette hypothèse simplificatrice pouvant susciter quelques réserves, des investigations complémentaires à propos des réflexions complexes survenant à la surface des matériaux réels ont d'ores et déjà été menées, conduisant, dans un avenir très proche, à l'implémentation de fonctions de réflexion bidirectionnelles.

Les conséquences des développements réalisés sur SOLENE dans le cadre de cette recherche ont finalement été plus importantes que prévues ; en effet ils ont décidé, dans le souci d'une plus grande facilité d'utilisation, du passage d'un environnement UNIX au système d'exploitation MS WINDOWS, de même qu'à une refonte totale de l'interface utilisateur. Au delà de ces aspects ergonomiques, le potentiel de l'outil se révèle lui aussi plus étendu que prévu, essentiellement en raison d'une conception à la base très « ouverte » : ainsi les procédures relevant de la géométrie projective peuvent être réutilisées

pour le traitement de problèmes d'intervisibilité, et certains programmes développés pour les aspects lumineux peuvent être appliqués, sans grandes modifications, au traitement de paramètres relevant d'autres champs disciplinaires...

1.5 Structuration du document

Le chapitre 1. [*Introduction*] se proposait de mettre rapidement en évidence, à partir de quelques exemples simples, les raisons qui ont présidé à la mise en œuvre de ce travail de recherche au sein du laboratoire CERMA. Il précisait son objet, les hypothèses retenues ainsi que la méthodologie utilisée, pour terminer par un bref résumé du contenu des chapitres et annexes qui suivent.

Le chapitre 2. [*SOLENE : état de l'existant, propositions de développement*] explicite les éléments constitutifs de l'ensemble logiciel sur lequel se sont appuyés les développements instrumentaux effectués. Il dresse un historique rapide du logiciel SOLENE et décrit les modes de fonctionnement généraux (relatifs à la simulation de l'ensoleillement) qui existaient lorsque la présente recherche a été initiée, ainsi que le potentiel et les limites de l'outil à cette époque également. En outre il indique la manière dont cette phase de développement du logiciel s'articule et s'intègre aux problématiques actuelles du laboratoire CERMA (thématiques de recherche, méthodologie). Il tente enfin de resituer cet outil – à caractère scientifique en premier lieu – parmi d'autres outils d'aide à la décision susceptibles de s'insérer au sein du processus de conception – outils utilisant des procédures radicalement différentes –, et donne quelques pistes quant aux différents axes de recherche susceptibles d'être intéressés par les potentialités d'un tel logiciel.

Le chapitre 3. [*Aspects physiques*] aborde de manière globale le problème de la disponibilité énergétique et lumineuse à la surface terrestre. En outre il en précise les aspects spectraux et donne quelques éléments à propos de la psychophysiologie de la vision humaine.

Le chapitre 4. [*Lumière et architecture : historique rapide*] fournit quelques repères historiques relatifs à la prise en compte de l'ensoleillement et de la lumière naturelle dispensée par la voûte céleste au sein d'un certain nombre de projets architecturaux ou dispositifs urbains particuliers. Son ambition se borne à citer les noms emblématiques et à sélectionner quelques réalisations qui affichent clairement une préoccupation bien réelle vis à vis des problèmes solaires et lumineux. Le choix des éléments présentés donne également une indication sur les types de configurations qui pourraient faire opportunément l'objet de simulations.

Le chapitre 5. [*Évaluation de l'énergie lumineuse dans le projet architectural et urbain : état de l'art*] brosse un panel de la plupart des méthodes, qu'elles soient de type graphique, analytique, informatique, etc., susceptibles d'intéresser l'ingénieur et/ou

l'architecte dans ses questionnements relatifs à la lumière naturelle. Elles concernent là encore l'ensoleillement ainsi que la disponibilité en lumière diffusée par la voûte céleste, qu'il s'agisse d'un lieu extérieur ou d'un espace intérieur. Une part importante est faite aux méthodes « informatiques », en tentant de dégager les spécificités, au regard des potentialités d'analyse, des différents logiciels présents sur le marché, qu'il s'agisse de logiciels issus de laboratoires de recherche ou strictement commerciaux.

Le chapitre 6. [*Le modèle d'éclairement développé pour SOLENE*] décrit les différents modèles géométriques et physiques permettant de décrire les conditions statistiques d'insolation, pour un observateur situé à la surface terrestre, en un lieu et à une date donnés. Il précise notre construction du modèle géométrique de ciel, son intégration à SOLENE ainsi que les modes de restitution visuelle mis en place. Il se poursuit par une revue des différents modèles statistiques permettant de définir les « conditions de ciel », et précise les éléments permettant de comprendre leur attendus et leur limites – et notamment celles qu'ils imposent aux logiciels qui les utilisent –, et enfin justifie le choix de l'un d'entre eux en regard de nos besoins. Le chapitre se termine par une description des fonctions et des modèles psycho-physiologiques qui permettent de transformer les grandeurs mesurées à la surface terrestre (de type énergétique) en grandeurs lumineuses.

Le chapitre 7. [*Mise en place d'un modèle de réflexion*] précise dans un premier temps la manière dont nous traitons l'énergie reçue de l'astre solaire et de la voûte céleste ; puis il aborde, dans un second temps, le mode de résolution théorique des échanges entre les différentes surfaces du bâti, et précise les différentes méthodes utilisées ; il justifie nos méthodes par rapport à d'autres techniques utilisées en imagerie de synthèse par exemple, en dégageant leurs spécificités. Le chapitre se termine par une présentation théorique relative aux phénomènes de réflexion et de transmission complexes qui se produisent à la surface des matériaux opaques et des produits verriers. Au moment de la rédaction de ces lignes, les éléments décrits ne sont pas totalement fonctionnels dans SOLENE, mais ils constituent une étape très prochaine dans le traitement des interactions lumière / matière.

Le chapitre 8. [*Instrumentation et traitement des vitrages*] affiche un double objectif : en premier lieu la mise en évidence, à partir de quelques configurations urbaines ou dispositifs architecturaux particuliers, de la pertinence des réponses apportées par la simulation numérique et des potentialités d'analyse de l'outil logiciel développé – on y retrouve certaines configurations exposées dans la partie historique. En outre une partie importante est consacrée aux vitrages, pour lesquels le mode de traitement que nous proposons dans SOLENE est libéré des contraintes qui marquent la plupart des autres produits logiciels. Un second objectif de ce chapitre consiste à démontrer l'intérêt que peuvent présenter des conditions d'insolation éloignées des deux situations normalisées par la Commission Internationale de l'Éclairage.

Le chapitre 9. [*Conclusion et perspectives*] met à nouveau en évidence l'intérêt de recourir à l'emploi d'un tel outil de simulation, tout en rappelant ses conditions d'utilisation et ses limites ; après un bref rappel des utilisations « périphériques » de SOLENE (au sens où elles n'étaient pas prévues dans le cadre de ce travail), il vient préciser les perspectives d'évolution à court et moyen terme du logiciel, notamment dans le trai-

tement des vitrages complexes, des transferts thermiques, ou encore de certains phénomènes acoustiques...

L'ensemble de ces chapitres est suivi de trois annexes et d'une bibliographie :

L'annexe 1. [*Les grandeurs physiques utilisées : définitions et unités*] présente l'ensemble des paramètres physiques utilisés dans la suite du document, leurs unités, et les relations qui existent entre eux. L'abondance de la littérature anglo-saxonne dans ces domaines ne fait qu'ajouter à la confusion, et le propos nécessite par conséquent une clarification quant à la terminologie utilisée dans les deux langues (où un même terme – luminance en l'occurrence – ne recouvre pas exactement les mêmes contenus dans les deux langues).

L'annexe 2. [*Codes implémentés au logiciel SOLENE*] décrit les programmes qui ont été développés au cours de cette recherche ; la plupart d'entre eux sont directement accessibles à partir de l'interface utilisateur réalisée dans l'environnement MS Windows, à l'exception des derniers développés – concernant les vitrages notamment –, qui ne le sont qu'en mode commande.

L'annexe 3. [*Modèle, modélisation et simulation numériques*] vient préciser la notion de modèle numérique, ses « dangers » – ou plus exactement les quelques précautions à observer lors de son utilisation. Sont également reproduits quelques réflexions d'un enseignant en école d'architecture, concernant l'ordinateur en tant qu'outil d'enseignement et de pratique du projet... (propos auxquels nous souscrivons totalement).

Enfin la [*Bibliographie*] propose une liste des ouvrages et articles consultés au cours de cette recherche. Ils sont référencés par ordre alphabétique du nom de l'(un des) auteur(s), sans distinction particulière du champ d'investigation concerné ; les ouvrages collectifs y sont listés séparément, de même que quelques sites *Internet* (uniquement les sites « fiables », car la liste pourrait être longue, mais rapidement caduque).

2 SOLENE : état de l'existant ; propositions de développement

SOLENE est constitué d'un ensemble de procédures de simulation qui permettent d'envisager, comme on le verra dans la suite, des simulations dans divers champs d'application : ils s'étendent de la visibilité mutuelle de fragments de l'urbain aux transferts radiatifs entre surfaces, en passant par la détermination de l'éclairement dans les espaces extérieurs ou à l'intérieur des locaux. Sont décrits dans la suite l'état existant du logiciel, ses manques et en conséquence les développements proposés.

2.1 Introduction

Constitué en association loi de 1901 au début des années soixante-dix et fondé par des enseignants de l'école d'architecture de Nantes (à l'époque UPA, unité pédagogique d'architecture), le CRMAA[4] s'est donné pour objectif « l'élaboration et le traitement d'informations à caractère bio-physique et bio-climatique utilisables dans les procédures de mise en forme architecturale », notamment par la construction d'outils de simulation (dans les domaines aérodynamique, thermique et solaire). Il a pris depuis lors la dénomination de CERMA[5], et constitue aujourd'hui l'un des centres de recherche de l'École d'Architecture de Nantes. Le CERMA est maintenant une unité affiliée au CNRS d'une part, et se trouve d'autre part associé au laboratoire CRESSON de l'École d'Architecture de Grenoble de manière à constituer une unité mixte de recherche (référencée UMR CNRS 1563) ; en outre le CERMA est en charge de la coordination de la Fédération de Recherche 73 du CNRS « Physique et images de la ville » qui regroupe 12 équipes de recherche de la Région des Pays de la Loire. Enfin une organisation conjointe des écoles d'architecture de Nantes et de Grenoble, par le biais des laboratoires CERMA et CRESSON, à laquelle vient s'ajouter l'Université de Nantes (École Polytechnique de l'Université de Nantes), a procédé à la mise en place d'une filière doctorale par la création, en 1992, du DEA *Ambiances Architecturales et Urbaines*, qui sera prochainement rattaché à l'École Doctorale (2000-2001). Il regroupe chaque année une trentaine d'étudiants, répartis sur les sites de Nantes et Grenoble, le site nantais affichant l'option thermique et énergétique, le site grenoblois l'option acoustique et éclairagisme ; le tronc commun de ce cursus est dispensé par téléenseignement.

---

[4] Centre de Recherche Méthodologiques d'Architecture et d'Aménagement.

[5] CEntre de Recherche Méthodologiques d'Architecture, École d'Architecture de Nantes, rue Massenet, 44300 Nantes.

A l'école de Nantes, l'objet des recherches du CERMA se situe essentiellement dans le champ des ambiances architecturales et urbaines, domaine aux multiples approches. Si le laboratoire a, dans les premiers temps, restreint son champ d'investigation aux paramètres physiques des ambiances, à leur modélisation et à leur simulation, les domaines traités se sont enrichis depuis quelques années, et peuvent de manière plus précise être déclinés en quatre thèmes principaux[6], classés ci-dessous selon leur chronologie d'apparition dans les problématiques du laboratoire :

- Modélisation et simulation des facteurs d'ambiance : il s'agit sans aucun doute du thème « fondateur », dont l'évolution au fil du temps a été considérable, principalement en raison des possibilités nouvelles offertes par l'informatique dans ces domaines. Les outils de simulation numérique développés ou acquis par le laboratoire (SOLENE, SIMULA, N3S, etc.) autorisent pêle-mêle la simulation de l'ensoleillement et des apports solaires, de l'accessibilité visuelle, des écoulements d'air, et permettent finalement une analyse beaucoup plus fine de la microclimatologie urbaine ; s'y ajoute bien sûr la simulation de l'éclairage naturel, aspect qui constitue précisément notre apport à l'édifice, notamment dans son aspect instrumental par la mise au point de procédures de calcul intégrées au logiciel SOLENE.

- Caractérisation d'exemple architecturaux et urbains par les facteurs d'ambiance : caractérisation des ambiances de réalisations architecturales de référence, de fragments et de tissus urbains, développement d'outils permettant cette caractérisation, etc. ;

- Facteurs d'ambiance et projet architectural et urbain : ajustement climatique dans les théories architecturales et urbaines, application de la modélisation déclarative à la conception des ambiances, etc. ;

- Les ambiances et le projet : théorie et méthodes interdisciplinaires ; le contenu de ce quatrième thème, relativement récent, a été défini au sein de l'unité mixte de recherche du CNRS 1563 regroupant le laboratoire CRESSON de l'Ecole d'Architecture de Grenoble et le CERMA. Son objectif global est de mettre au jour et d'organiser les connaissances scientifiques relativement à une théorie des ambiances architecturales et urbaines.

[6] Ces thèmes sont plus largement explicités et illustrés à l'adresse http://www.cerma.archi.fr

2.2 Historique d'un logiciel : *SOLENE*

2.2.1 Généralités

Dans la mesure où il concerne la conception et le développement d'instruments susceptibles de venir en aide à l'architecte dans les domaines de l'ajustement climatique et thermique, le présent travail s'inscrit plus particulièrement dans le premier des quatre thèmes listés ci-dessus (modélisation et simulation des facteurs d'ambiance). Cette instrumentation a eu, dès le début – et même si les moyens de calcul de l'époque étaient dérisoires comparés aux possibilités d'aujourd'hui –, recours aux méthodes de simulations numériques. Celles-ci étaient déjà susceptibles de traiter un grand nombre de données et de prendre en compte de manière simultanée de nombreux paramètres ; elles permettent actuellement d'offrir au concepteur, au regard des ambiances architecturales et urbaines, de meilleures possibilités d'optimisation et/ou de recherche durant le processus de conception. Dans le domaine de la simulation de l'ensoleillement et de l'éclairage naturel (qu'il s'agisse d'espaces intérieurs ou extérieurs), plusieurs générations d'outils se sont succédées pour aboutir aujourd'hui au logiciel SOLENE. Les recherches menées concernent la simulation proprement dite évidemment, mais aussi leurs modes de restitution et de représentation bidimensionnelle ou tridimensionnelle (on devrait plutôt parler de *cartographie*, puisqu'il n'est pas question ici de rendu « réaliste », mais de simulation basée sur des modèles physiques) ; la réflexion a été poussée vers les modes de représentation de phénomènes conjoints susceptibles d'affecter les ambiances urbaines (ensoleillement et flux aérodynamique par exemple).

Fig. 3. Couverture de la plaquette de présentation du logiciel SOLENE.

Depuis, le développement de la technologie informatique et la vitesse sans cesse croissante des moyens de calcul numérique ont permis d'effectuer des avancées significatives au regard de la complexité des problèmes traités d'une part, dans le mode et la qualité de la restitution d'autre part (les courbes bidimensionnelles, diagrammes et autres tableaux de chiffres ont été remplacés aujourd'hui par un univers graphique tridimensionnel avec interventions potentielles de l'utilisateur en temps réel).

2.2.2 Historique du développement

Même s'il n'y est que très brièvement résumé, il est indispensable d'évoquer ici l'historique de SOLENE afin de situer précisément la réflexion et le travail qui ont été menés au cours de la recherche présentée dans le présent rapport. Cet historique peut globalement se scinder en quatre périodes de développement successives, assez clairement identifiables :

- Les premiers développements logiciels datent de 1985 ; ils étaient écrits en FORTRAN et permettaient de réaliser un héliodon numérique (vue du soleil, avec élimination des faces cachées, d'une maquette numérique 3D totalement opaque) ; le potentiel des machines de l'époque limitait alors considérablement les applications opérationnelles d'un tel logiciel, qui n'était alors capable de traiter dans des temps « raisonnables » que des géométries très simplifiées, et ne proposait aucune restitution graphique.

- Une évolution significative a eu lieu en 1990, conjointement à l'acquisition par le laboratoire de stations de travail SUN (seules les stations de travail permettaient à cette époque de disposer d'un environnement graphique). Elle a consisté en une refonte totale du logiciel, sa réécriture en langage C[7], son recentrage vers des préoccupations exclusivement solaires, avec abandon des aspects de modélisation géométrique (même si SOLENE continuait à pouvoir générer des primitives élémentaires, la modélisation géométrique du site était alors entièrement confiée à un logiciel CAD externe – les primitives de SOLENE servant davantage pour des tests rapides ou dans un but didactique) ; le logiciel s'est également enrichi d'un module de visualisation propriétaire (dont l'objet n'est pas d'effectuer un « rendu », mais de présenter les résultats des simulations physiques) et d'une interface graphique. Ces multiples modifications l'ont rendu performant, opérationnel, et d'une utilisation abordable sinon aisée.

[7] Au standard international *Kernighan & Ritchie*.

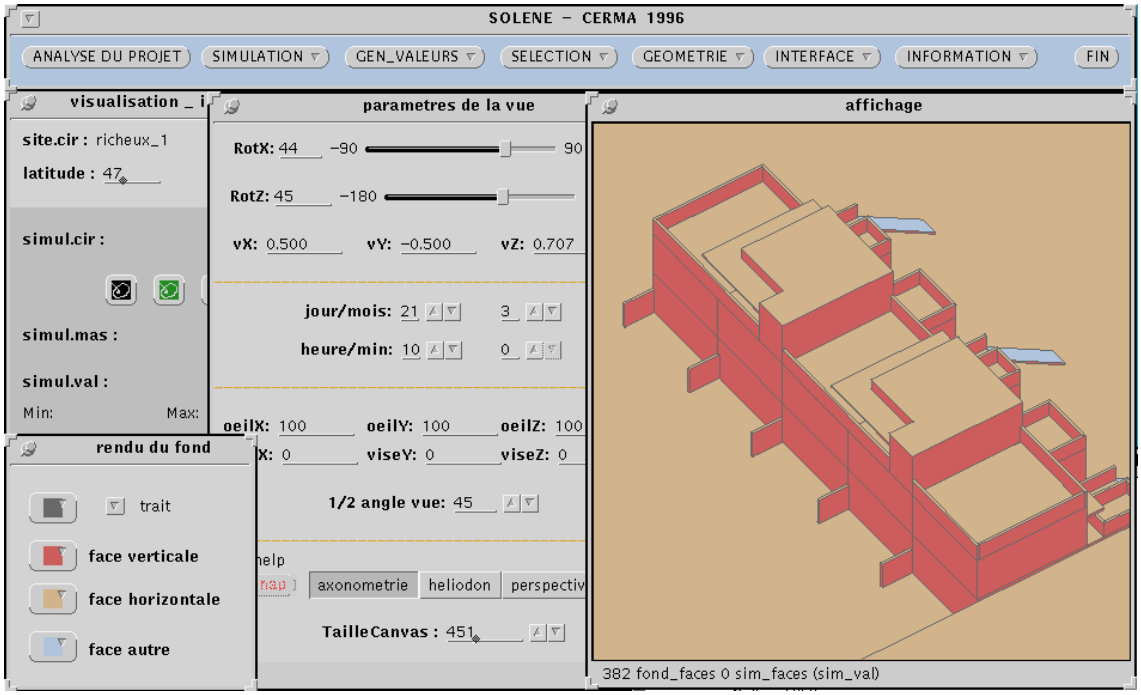


Fig. 4. L'interface de SOLENE en 1996 ; l'ensemble fonctionnait alors sous Sun OS.

- Le troisième volet de cet historique concerne précisément la partie instrumentale du travail que nous avons mené, dont les aspects théoriques font l'objet de ce rapport. En prenant appui sur la structure existante à ce moment, SOLENE a été enrichi, à partir de 1996, de nombreuses fonctions relatives au traitement de l'*éclairement diffus* (modélisation de la voûte céleste, de la radiance solaire, de la luminance céleste, calcul des inter-réflexions entre les surfaces...) ; pourtant la prise en compte de l'énergie diffuse existait déjà à cette époque, mais elle était alors envisagée d'une manière très succincte, de telle sorte que cet aspect restait nettement en retrait, à la fois sur le plan des performances et des possibilités d'analyse après simulation, aux potentialités du logiciel dans le domaine de l'ensoleillement. Certes la fonction existait, mais elle se bornait à fournir une valeur que l'on peut qualifier « d'indicative », et elle ne pouvait prétendre servir de donnée d'entrée à une simulation ultérieure.

  Les développements de cette période ont donc rendu l'outil logiciel susceptible de traiter de nombreux aspects relatifs à l'éclairement naturel et à la lumière diffuse, tout en conservant sa structure et sa souplesse d'origine ; mais il n'en restait pourtant pas moins difficile à maîtriser (pur produit de laboratoire, facilement utilisable... par ses concepteurs), et de plus son fonctionnement sur station de travail UNIX ne plaidait pas en faveur d'un panel d'utilisateurs plus large ou d'un début de diffusion. Consciente à la fois de son potentiel nouveau mais aussi des limites du produit quant à son aspect opérationnel, l'équipe de développement a décidé de

porter l'ensemble logiciel sous environnement MS-Windows[8] (milieu de l'année 1996) et, profitant de l'intégration des nouvelles fonctions relatives au diffus, de repenser totalement l'interface graphique utilisateur (GUI) ; sa réécriture a été effectuée en MS-Visual C++. Enfin la gestion des aspects graphiques 3D (affichage des objets participant à la simulation, sélection d'éléments de surface de la scène, déplacement et rotation de la scène...) a dès lors été confiée aux fonctions spécifiques 3D interactives de l'afficheur graphique 3D OpenGL (pour l'affichage uniquement), et de Open Inventor™ surtout, bibliothèque de classes graphiques orientées objet développées par Silicon Graphics Inc.[9].

- La quatrième phase évoquée en introduction concerne les développements récents et actuels du logiciel ; ces différents développements ainsi que les perspectives futures seront décrits précisément dans la section 9.2. La prise en compte du ciel et le traitement de l'énergie diffuse ont en effet ouvert de nombreuses pistes, relatives à des domaines d'investigation aussi divers que le rayonnement et les températures de parois, la micro-climatologie urbaine, etc. Il est manifeste qu'au sein du laboratoire CERMA, les développements que nous avons proposés ont contribué à une motivation nouvelle vis-à-vis de ce logiciel, regain d'intérêt qui a conduit à son implémentation sur plate-forme Windows, et en conséquence insufflé une dimension nouvelle au produit ; il s'en est suivi un début de diffusion à la fois dans d'autres laboratoires et dans le domaine opérationnel, diffusion qui n'a fait que s'amplifier ces derniers temps.

Dans la suite du document seront explicitées la contribution théorique et l'implémentation logicielle des nouvelles fonctions qui font l'objet de la présente recherche (prise en compte de l'énergie diffuse en provenance de la voûte céleste, traitement des inter-réflexions entre les différentes surfaces de la scène, accessibilité visuelle à la voûte céleste, visualisation des trajectoires solaires...).

2.3 Principes généraux

Dans cette section sont décrits sommairement les principaux aspects de SOLENE, et notamment la structure générale de cet ensemble de simulation. Il ne s'agit pas d'entrer dans le détail de ses diverses fonctionnalités, mais plutôt de mettre l'accent sur certains éléments fondamentaux qui en font son originalité. D'autre part, nous serons amenés dans la suite à préciser certains des algorithmes utilisés par le logiciel, de manière à

[8] SOLENE fonctionne sous Windows 95 ou NT, et nécessite, pour la visualisation et l'interaction avec l'utilisateur, le *Run time* Open Inventor™.

[9] Il s'agit en fait d'une version PC de Open Inventor, portage réalisé par la société TGS.

mettre en évidence l'articulation des développements que nous avons effectués avec la partie existante – notamment en ce qui concerne les problèmes de visibilité (autrement dit le traitement des parties cachées lors de la projection sur le plan de l'écran).

2.3.1 Généralités

L'ensemble logiciel SOLENE constitue un système ouvert composé de plusieurs dizaines de fonctions accessibles indépendamment ; il traite de questions solaires, lumineuses et thermiques, et est organisé autour de fonctions de simulation qui permettent d'appréhender l'espace construit suivant divers paramètres physiques, ainsi que de fonctions de visualisation qui rendent compte des phénomènes observés dans l'espace et le temps. SOLENE possède une large gamme de modes d'exploitation des résultats, allant des classiques tracés d'ombres au bilan énergétique des façades, en passant par la quantification de l'ensoleillement, le facteur de ciel, l'intensité des réflexions lumineuses, etc. Le logiciel assure ainsi une aide à l'évaluation des projets, de même qu'il autorise divers types d'investigations à caractère théorique à propos de l'ajustement climatique des bâtiments et des formes urbaines.

L'ensemble logiciel SOLENE assure plusieurs fonctions distinctes : la définition des divers objets nécessaires (géométries, ciels, descripteurs, matériaux), puis l'application de différentes fonctions sur ces géométries, qui produiront pour la plupart d'entre elles des *descripteurs* (informations attachées aux différents éléments de surface de ces géométries), et enfin les aspects propres à leur représentation et leur visualisation.

2.3.2 Les objets SOLENE

A l'instar de tous les processus de simulation utilisant les techniques numériques, SOLENE nécessite une maquette virtuelle tridimensionnelle de l'objet architectural ou de l'environnement urbain à évaluer au regard de l'ensoleillement. Celle-ci est réalisée à l'aide d'un modeleur *a priori* quelconque (programme CAD), imposant par conséquent une interface de manière à rendre compatible l'ensemble des données géométriques issues du modeleur avec la structure des données utilisées par SOLENE. Celui-ci permet pourtant la définition d'objets 3D, mais ses possibilités restent pour l'instant trop rudimentaires pour que l'on puisse réellement parler de « modeleur » ; l'utilisation de ses primitives géométriques reste d'ordre démonstratif ou didactique.

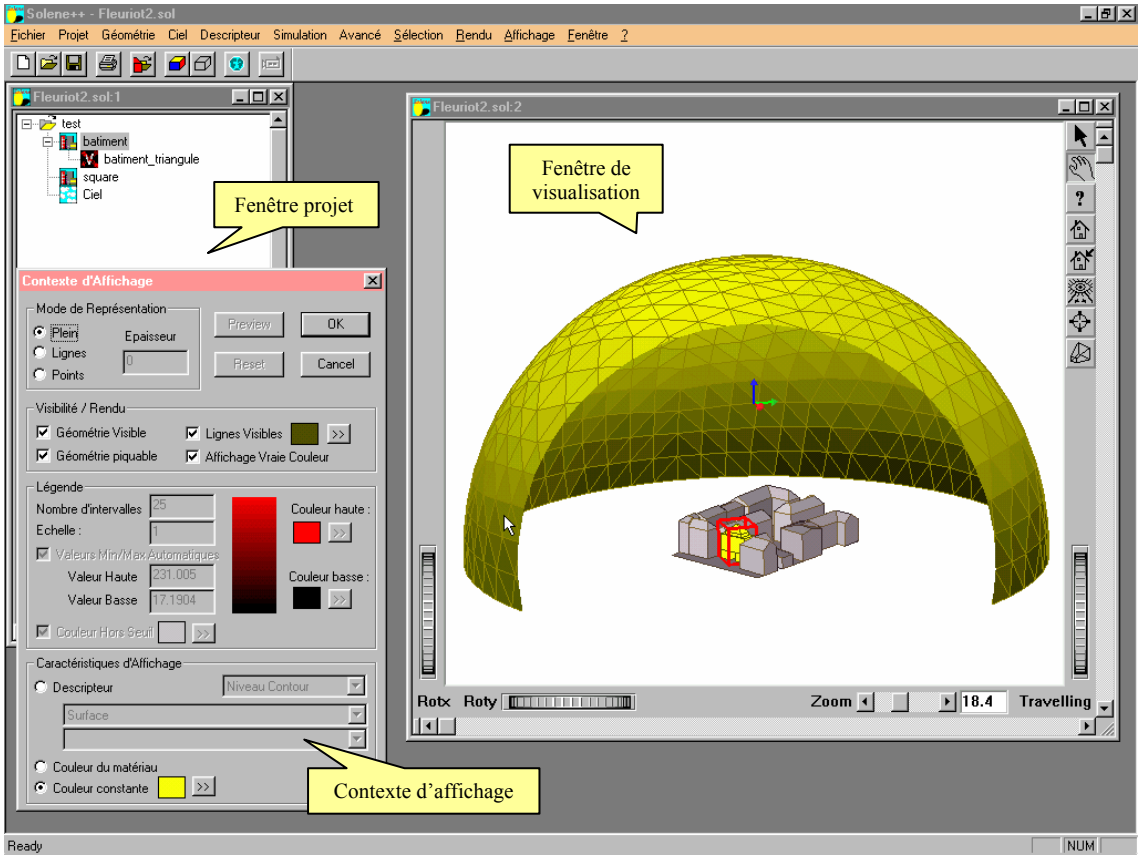


Fig. 5. Écran SOLENE : la fenêtre projet (l'ensemble des géométries), le contexte d'affichage ainsi que la fenêtre de visualisation dont la gestion est assurée par Open Inventor™.

2.3.2.1 Les géométries

Une géométrie SOLENE est constituée d'un ensemble de faces, elles-mêmes formées d'une liste de contours polygonaux définis par les coordonnées de leurs sommets. La notion de scène englobe une ou plusieurs géométries distinctes, totalement indépendantes les unes des autres. Parmi les différentes géométries SOLENE, on peut noter le cas du ciel, particulier dans la mesure où sa géométrie (une voûte hémisphérique) n'est pas modifiable par l'utilisateur ; de plus les différentes fonctions (voir ci-dessous) applicables à cette géométrie lui sont tout à fait spécifiques.

2.3.2.2 Les descripteurs

A chacune de ces géométries est affecté un ensemble de « descripteurs », caractérisant les propriétés d'un contour, d'une face ou d'une géométrie ; par exemple le périmètre d'un contour, son aire, sa couleur, son ensoleillement (sous forme d'une quantité ou

d'une variable booléenne), etc. constituent des descripteurs de ce contour. A l'exception des plus simples d'entre eux qui sont calculés automatiquement (descripteurs géométriques notamment), les descripteurs correspondent en général au(x) résultat(s) d'une simulation, et sont donc calculés sur requête de l'utilisateur. On parlera de descripteur simple dans le cas où le contour reçoit une valeur unique, et de descripteur « fonction du temps » si le descripteur en question se voit attribuer un ensemble de valeurs qui correspondent aux résultats de la simulation pour divers pas de temps ; c'est le cas pour la simulation de l'ensoleillement d'un site urbain tout au long d'une journée ; le descripteur « fonction du temps » correspond à l'ensemble des descripteurs simples obtenus par pas horaires par exemple, chacun d'eux donnant l'état d'ensoleillement d'une face – au soleil ou à l'ombre – à une date et à une heure données.

Le descripteur « matériau » recouvre lui aussi la multiplicité d'informations des descripteurs « fonction du temps » puisqu'il traduit les propriétés physiques (lumineuses, thermiques, autres...) du « matériau » dont sont constituées les différentes faces de la scène ; ces différents descripteurs simples correspondent aux coefficients de réflexion, de transmission, à la capacité calorifique, etc., c'est-à-dire à son comportement vis à vis de la lumière incidente, à la manière dont il transmet la chaleur, etc. Il est évident que dans les perspectives d'évolution du logiciel (voir la section 7.3), il est possible de compléter cet ensemble de propriétés par l'ajout de toute autre type d'information (numérique, booléenne, ou même texte) qui serait nécessaire à la mise en place d'un processus de simulation nouveau.

2.3.2.3 Les fonctions

Les fonctions recouvrent les multiples actions décidées par l'utilisateur et appliquées à une géométrie active (une seule à la fois) : des fonctions de création et de transformations interactives, concernant essentiellement les géométries (transformations géométriques comme déplacement ou triangulation...), ou des fonctions de visualisation des géométries (contexte d'affichage, tels que couleur et type des éléments affichés...), ou encore des opérations applicables aux descripteurs (création, calcul), mais aussi et surtout des fonctions de simulation des phénomènes physiques (ensoleillement, lumière naturelle, accessibilité visuelle...) qui s'appliquent elles aussi aux géométries, y compris le ciel. Ces fonctions peuvent s'appliquer à une géométrie unique, à un ensemble de géométries ou à la totalité de la scène (il est ainsi possible de simuler un phénomène sur un seul élément d'un ensemble urbain, la totalité du site étant évidemment prise en compte lors des simulations – au niveau des masques notamment – comme montré sur la Fig. 6.).

Appliquer une fonction de transformation à une géométrie conduira à une autre géométrie et à ses descripteurs élémentaires associés ; une fonction de simulation produira toujours un ou plusieurs descripteurs nouveaux, qui pourront ensuite être visualisés indépendamment ou bien globalisés par face ; les résultats de certaines simulations pourront encore être des fichiers cachés, stockés sur disque, susceptibles d'être utilisés par des

simulations ultérieures (toutes ces opérations s'effectuent de manière totalement transparente pour l'utilisateur).

2.3.3 Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats s'effectue grâce aux descripteurs issus des différentes simulations. Comme on l'a déjà évoqué, chaque descripteur contient un type d'information pour chaque élément de surface de l'environnement étudié. L'exploitation des résultats peut consister simplement à une interprétation de la valeur du descripteur (par l'intermédiaire de son affichage dans une gamme de couleurs choisies par l'utilisateur), mais aussi à dégager de nouvelles informations par opérations entre descripteurs (par exemple la différence entre deux descripteurs en créera un troisième, dont l'affichage permettra la mise en évidence d'un aspect particulier du phénomène étudié). Les valeurs des descripteurs peuvent également être globalisées au niveau d'une face ou pour la totalité de la géométrie, permettant ainsi d'obtenir des valeurs moyennes par face ou par entité géométrique respectivement.

2.3.4 Représentation et visualisation

Un module de visualisation utilisant les librairies Open Inventor™ permet de représenter les différentes géométries de la scène (en totalité ou en partie seulement) ; il s'agit de vues axonométriques ou perspectives du projet étudié dont les orientations sont choisies de manière interactive par l'utilisateur, et qui affichent des cartographies colorées du phénomène étudié (par exemple une durée d'ensoleillement, ou encore l'impact, sur le plan lumineux, des matériaux de la façade en vis-à-vis, etc.). Les bibliothèques Open Inventor™ permettent également la mise en place de plusieurs types de lumières qui viendront éclairer la scène, et donc affecter le rendu des différentes géométries ; mais ces lumières ne participent évidemment pas au processus de simulation, elles ne sont là que pour faciliter la lecture des éléments représentés. Un ensemble urbain pourra donc être rendu grâce à ces éclairages (permettant une lecture plus aisée des différentes volumétries), alors que le domaine d'étude proprement dit (une place, une façade de cet ensemble...) sera traité en fausses couleurs de manière à mettre en évidence les variations du phénomène physique étudié.

L'illustration ci-dessous (Fig. 6.) rend compte du double avantage de cette différenciation dans la (re)présentation des objets : en premier lieu – et à l'exception du traitement des échanges radiatifs –, seul l'objet simulé sera concerné par le maillage, permettant ainsi d'alléger notablement la phase de calculs ; néanmoins toutes les (autres) surfaces de la scène faisant office de masques pour l'objet concerné interviendront dans le processus de simulation ; le second intérêt est relatif à la lisibilité, accrue de manière évidente grâce à la possibilité de hiérarchiser les différents objets représentés, et finalement de mettre clairement en évidence, « d'extraire » sur le plan visuel les éléments concernés par la simulation, tout en les maintenant inscrits dans leur contexte environnemen-

tal. S'il s'agit de questionnements relatifs à l'urbain par exemple, il est clair que les simulations ne concerneront pas la ville dans son ensemble, mais certaines de ses parties seulement, qui pourtant seront (éventuellement) affectées par l'ensemble du contexte urbain. En outre le fait de s'écarter délibérément de « l'image de synthèse » évite tout risque de malentendu quant à la signification des cartographies proposées (ces aspects sont discutés plus largement dans le chapitre 5)...

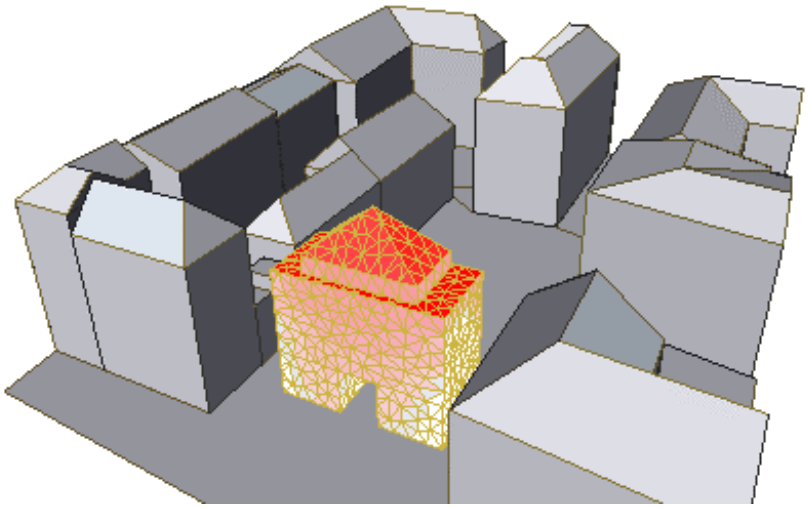


Fig. 6. L'ensemble du site (en gris) et les éléments ayant fait l'objet d'une simulation (en fausses couleurs) – ici le *pourcentage de ciel vu* en tenant compte de l'environnement bâti. On notera que nombre de surfaces grisées participent de manière évidente au processus de simulation ; certaines d'entre elles peuvent y participer en tant que masques par exemple, ou bien comme surfaces venant réfléchir le rayonnement ; par contre elles ne sont pas concernées par l'objet de la simulation et donc l'affichage.

2.4 Les simulations

SOLENE permet d'effectuer un certain nombre de simulations sur la géométrie sélectionnée. Celles-ci concernent principalement les différents phénomènes physiques relatifs à l'ensoleillement et à l'énergie solaire, à l'éclairement naturel provenant de la voûte céleste, au rayonnement et aux températures de parois. Ces simulations ne sont bien évidemment disponibles que si la totalité des paramètres d'entrée nécessaires sont réunis (par exemple l'étude de l'éclairement lumineux implique la création d'un modèle de ciel ainsi que la discrétisation préalable de la scène). SOLENE offre encore, au-delà de ces fonctions de simulation, plusieurs fonctionnalités liées à la visibilité et à l'accessibilité visuelle.

On ne décrira, dans les sections ci-dessous, que les principes généraux des simulations liées à l'ensoleillement direct ; en effet le processus de simulation lié à l'éclairement naturel faisant précisément l'objet de la présente recherche, il est décrit de manière détaillée dans les chapitres qui suivent.

2.4.1 Simulation solaire

Elle consiste à déterminer, à un instant donné, les parties ensoleillées de chacune des faces de la maquette du site ; il s'agit là du module de base du système, qui repose sur des méthodes d'analyse solaire – la position du soleil à l'instant de la simulation et la géométrie du site.

Deux méthodes peuvent être utilisées : la méthode *héliodon* qui indique le tracé exact des ombres, et la méthode des *masques* qui permet de connaître les condition d'ensoleillement d'un site au cours du temps. Les résultats de ces deux types de simulation permettent ensuite la construction de différents descripteurs répondant à diverses requêtes ; il s'agira finalement d'afficher les éléments de surface qui répondent, par exemple, à une interrogation du type « *Quels sont les éléments de surface de la scène ensoleillés plus de x heures pour une journée donnée ?* ».

2.4.1.1 La technique « héliodon »

Cette technique est basée sur un principe identique à la simulation physique réalisée avec le dispositif physique nommé héliodon (voir la section 5.4.2.1), où il s'agit de *déterminer les parties de la scène qui sont éclairées par le soleil à un instant donné* ; autrement dit la simulation héliodon permet de déterminer le tracé exact des ombres. La maquette et la source lumineuse réelles sont remplacées ici par leurs équivalents numériques.

Le travail consiste finalement à effectuer une projection axonométrique de la scène selon la direction des rayons solaires : ainsi l'observateur contemple la scène depuis la position solaire (par conséquent à l' « infini » devant les dimensions de cette scène), et voit donc très précisément les zones éclairées par le soleil (et celles-ci seulement). Le traitement des masques (obstacles au soleil) est ainsi directement intégré.

De manière plus détaillée, le logiciel SOLENE réalise successivement les opérations suivantes :

- Création d'une vue axonométrique selon la direction solaire, direction déterminée par la date à laquelle est réalisée la simulation (elle nécessite donc le calcul de la position solaire à un instant donné).

- Identification des portions vues dans cette projection axonométrique, c'est-à-dire des zones éclairées par le soleil (problème de traitement des parties cachées, clas-

sique et très rapide à l'heure actuelle, d'autant plus si le traitement s'effectue par une implantation matérielle spécifique plutôt que par logiciel).

- Stockage de ces zones éclairées et superposition à la maquette tridimensionnelle originale pour une visualisation par projection axonométrique ou perspective de point de vue quelconque.

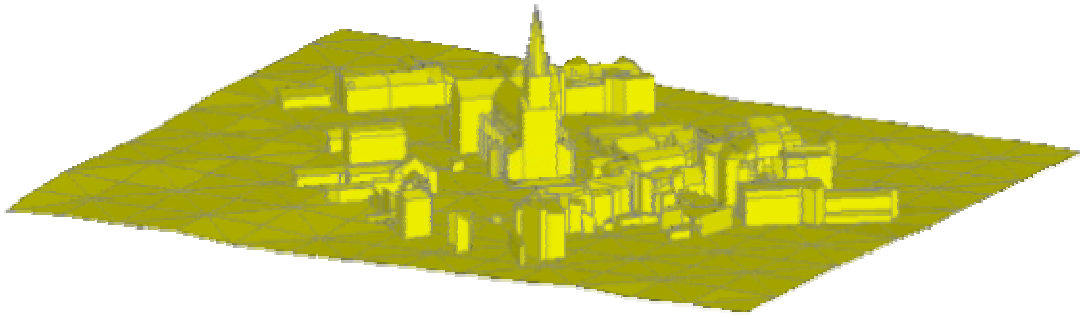
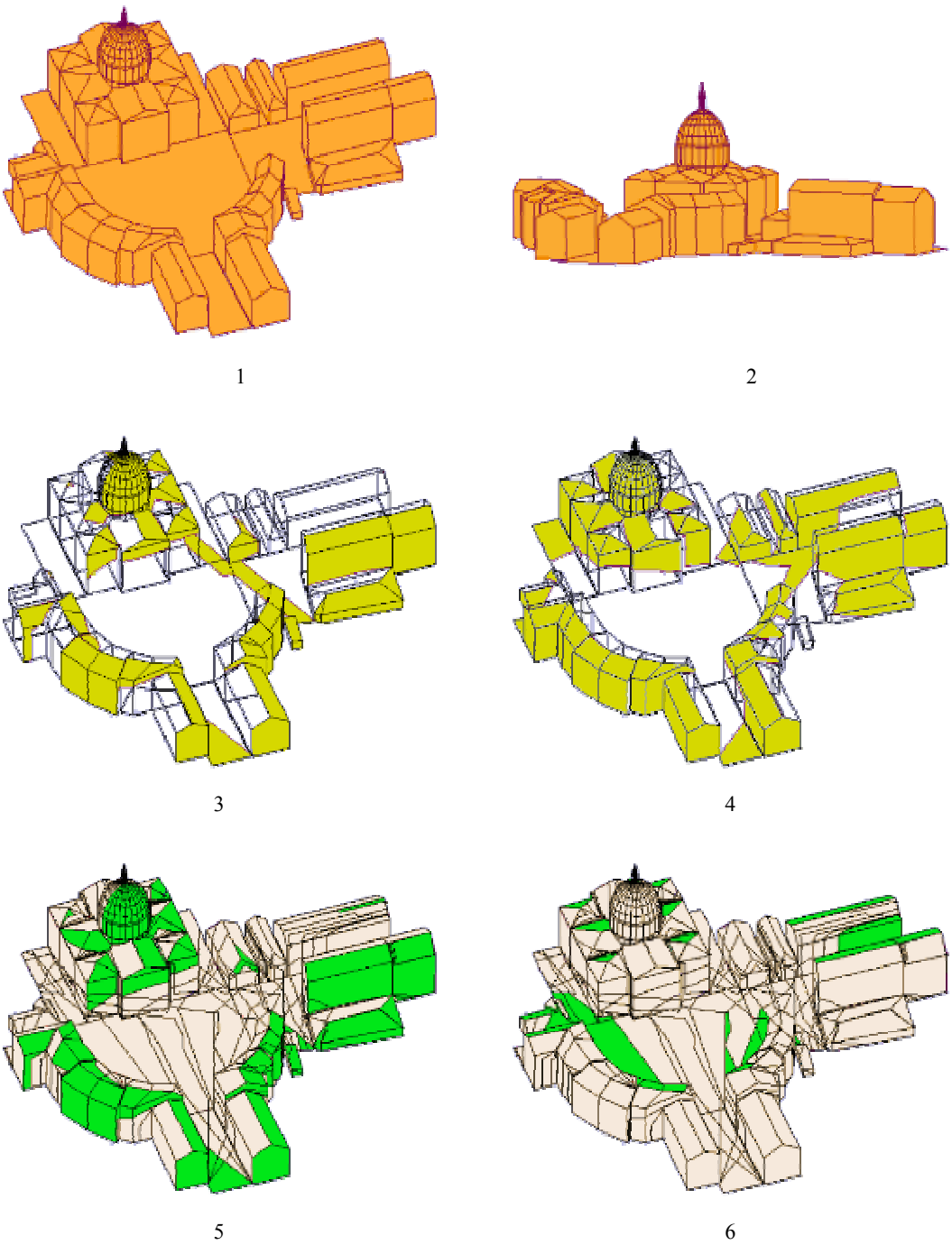


Fig. 7. Simulation héliodon, correspondant à une observation selon la direction du soleil pour un observateur situé à l'infini, le 21 décembre à 10 h ; toutes les surfaces vues de cette scène urbaine sont donc éclairées directement par l'astre solaire.

Si la simulation « héliodon » est intéressante à un instant donné, elle le devient plus encore si on intègre l'aspect temporel (puisque pour un site donné, à chaque instant correspond un état d'ensoleillement), c'est-à-dire si les simulations sont réalisées par intervalles de temps (un pas de 1 heure paraît être une valeur significative dans la plupart des cas) ; cet aspect donne un avantage certain à la simulation numérique, la simulation à l'aide de l'héliodon réel devenant rapidement fastidieuse. Le stockage puis la superposition des différents états d'ensoleillement permet alors de constituer une base de données fournissant les zones homogènes, c'est-à-dire celles correspondant aux mêmes caractéristiques d'ensoleillement ; les périodes d'ensoleillement sont obtenues en élargissant l'état d'ensoleillement disponible à un instant t à l'intervalle de temps $t - dt$, $t + dt$, dt étant le pas de temps entre deux simulations. On peut ainsi procéder ensuite à tout type d'interrogation et obtenir la cartographie tridimensionnelle des durées d'ensoleillement sur un intervalle de temps quelconque (une journée, un mois, un an...), ou au contraire mettre en évidence les surfaces qui ne verront jamais le soleil (pour une date ou une période donnée évidemment).



1 2

3 4

5 6

Fig. 8. Principes d'une simulation héliodon :
(1) maquette tridimensionnelle du site à étudier, observé selon une orientation quelconque ;
(2) vue héliodon du site, le 21 décembre à 9 heures, définissant les zones éclairées à ce moment.
Images (3) et (4) : états d'ensoleillement plaqués sur la maquette 3D : (3) à 9 heures ; (4) à 13 heures.
Images (5) et (6) : superposition de différents états d'ensoleillement (calculés par pas de 1 heure) :
(5) zones ensoleillées le matin seulement (entre 9h et 12h) ; (6) zones à l'ombre toute la journée.

2.4.1.2 La technique « masque »

Le résultat de la simulation héliodon permettait d'obtenir le bilan d'ensoleillement *en un point de l'espace en fonction du temps* ; au contraire la technique « masque » réalise un bilan d'ensoleillement *à un instant donné en fonction de l'espace*.

Globalement cette technique consiste, pour un point quelconque de l'espace, à identifier les trajectoires solaires visibles depuis ce point, en tenant évidemment compte des obstacles susceptibles de venir les masquer, partiellement ou totalement. *Il s'agit finalement de déterminer à quels moments ce point particulier est au soleil*, et il est donc ensuite facile de connaître les conditions d'ensoleillement du point étudié pour des dates quelconques de l'année.

Contrairement à la simulation *héliodon*, la technique *masque* impose la discrétisation de la scène tridimensionnelle, et par voie de conséquence des temps de calcul plus importants, sans aucun rapport cependant avec ceux nécessaires au traitement de l'éclairement diffus.

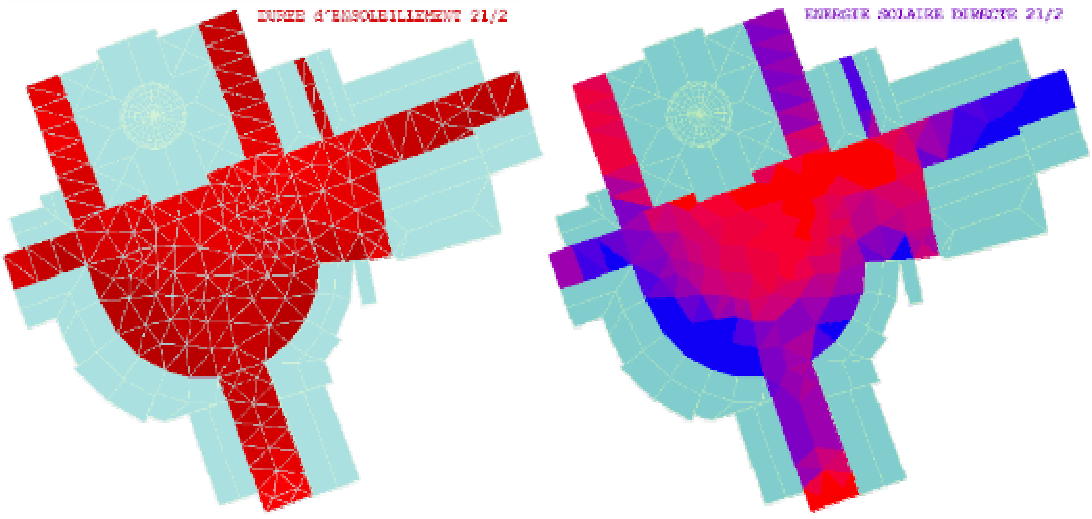


Fig. 9. Technique masque : à gauche cartographie de la durée d'ensoleillement de chacun des éléments d'un maillage de l'urbain le 21 février ; à droite l'énergie solaire directe reçue par ces mêmes éléments.

Les portions de trajectoires solaires visibles sont identifiées, pour chaque point de la scène étudiée (préalablement triangulée), par mise en perspective sphérique des masques de la scène (obstacles susceptibles de masquer le soleil), orientée selon la verticale du lieu. D'autre part le soleil lui aussi est présent dans cette perspective, sa projection

étant effectuée par pas de temps de l'ordre de quelques minutes. Le soleil sera donc visible à un instant *t* si, depuis le point étudié, sa projection n'appartient pas à celle de la géométrie masque à cet instant ; si au contraire elle est incluse dans la projection des masques, cela signifie que le rayon visuel partant du point analysé vers le soleil est intercepté par un obstacle. Il s'agit donc finalement d'un problème de visibilité. L'analyse conduite ici est bien de type temporel car elle permet d'établir, au point étudié, les périodes d'ensoleillement pour les différentes dates de simulation ; en revanche la méthode ne permet pas d'obtenir une construction rigoureuse du contour des ombres portées.

2.4.1.3 Analyse des résultats

Les deux types de simulation décrits précédemment produisent des bases de données numériques restituant les états d'ensoleillement relatifs à des polygones (séparatrice d'ombre de la simulation *héliodon*), ou à des intervalles temporels (simulation *masque*). La « production » d'une image tridimensionnelle du site étudié comportant les résultats des simulations ne sera réalisée qu'après requête de l'utilisateur ; celle-ci peut rester élémentaire – durée d'ensoleillement d'un élément de surface, puissance solaire directe reçue –, ou résulter de la composition de plusieurs de ces requêtes – zones à l'ombre l'été et au soleil l'hiver, façades éclairées directement plus de *X* heures par jour durant une période donnée de l'année, etc.

En plus des modes d'analyse qui viennent d'être évoqués, qui restent finalement de l'ordre de l'appréciation visuelle (correspondance avec une charte de couleurs légendée en principe), la base de donnée issue de la simulation permet de calculer facilement des *indices d'ensoleillement*[10], leur intérêt étant d'apporter une information synthétique quant à l'ensoleillement global d'une surface (une façade par exemple).

Cet indice *Ce* est défini pour une surface *S* et pour un intervalle de temps $[t_1, t_2]$ discrétisé en *n* intervalles de durée égale (le soleil est considéré comme immobile sur chaque intervalle de temps) ; il représente finalement la fraction moyenne d'ensoleillement :

$$Ce = \frac{1}{n \cdot S} \sum_{i=1}^{n} \frac{Sh_i}{\cos \alpha_i}$$

avec *S* l'aire de la surface en question,

Sh_i l'aire « héliodon » (c'est-à-dire la projection de la surface ensoleillée sur un plan normal à la direction solaire) à l'instant t_i,

et α_i l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface *S* à l'instant t_i.

[10] Groleau 1987, Hierry 1987.

D'une manière similaire peut être calculé un *facteur de réduction de l'ensoleillement* ; il représente alors le rapport, pour un point donné d'une surface, entre la durée maximale d'ensoleillement possible et la durée effective d'ensoleillement de ce point, la réduction étant la conséquence directe des masques de l'environnement ; on retrouvera d'ailleurs la notion voisine d'*éclairement potentiel* (en provenance de la voûte céleste) dans les applications (section 8.4.1).

2.4.2 Simulation des éclairements énergétique et lumineux diffus

Ce type de simulation a pour objet la quantification de l'énergie diffuse reçue par un édifice (sa façade notamment) en provenance de la voûte céleste. Cette énergie atteint l'environnement urbain – sol, façades des bâtiments –, ces surfaces allant, suivant leur nature, réfléchir une fraction plus ou moins importante de l'énergie qui les a frappées. Il s'agit donc en premier lieu de définir la nature et de quantifier les sources d'énergie, puis de s'interroger sur la manière dont cette énergie va interagir avec les surfaces qui l'interceptent, et enfin de analyser les conséquences lumineuses, thermiques, etc. de son impact.

Comme on l'a évoqué précédemment, le rayonnement diffus était effectivement pris en compte par SOLENE, quasiment depuis ses origines d'ailleurs, mais son traitement se bornait à ne considérer la partie diffuse que sous la forme d'une fraction du rayonnement global... Malheureusement, cette approximation reste assez grossière : en effet, d'une part le rayonnement n'est pas distribué de manière uniforme sur la voûte céleste, mais tend à être plus concentré au voisinage de la position du soleil et à proximité de l'horizon (sauf peut-être dans le cas du ciel totalement couvert – voir la section 6.6.2), et d'autre part en site urbain, la distribution du bâti ainsi que les matériaux utilisés (dallages, façades, etc.) viennent modifier de manière souvent très sensible l'approximation précédente en raison des interactions existant entre les surfaces. Les fonctionnalités nouvelles de SOLENE ont donc pour ambition de fournir une instrumentation plus complète et plus performante, de manière à permettre une étude précise des corrélations entre les formes construites et les microclimats urbains qui en découlent. Sur un plan plus global cette fois, elles ont également l'ambition de contribuer à l'élaboration d'un système d'évaluation physique du projet urbain, ici au regard des éclairements énergétiques et lumineux.

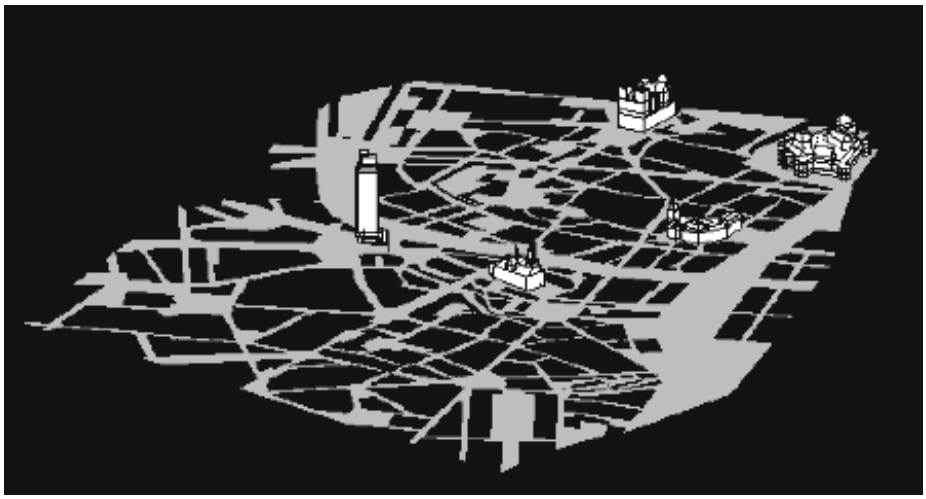
C'est précisément l'étude de ces interactions – et plus particulièrement les aspects relatifs à l'éclairement lumineux – qui constitue le second volet de la partie instrumentale du présent rapport ; le premier volet étant quant à lui consacré à l'étude des sources mêmes de cette énergie et à la manière dont elle parvient à la surface terrestre ; ces sources sont évidemment le soleil ainsi que l'ensemble de la voûte céleste – il s'agira donc d'étudier la manière dont cette énergie franchit la couche atmosphérique terrestre.

2.4.3 Accessibilité visuelle

Il est clair que les problèmes d'accessibilité visuelle ne sont pas l'apanage de SOLENE puisque tout logiciel 3D est susceptible de permettre la vision de l'environnement urbain depuis un point particulier de l'espace. Cette potentialité est néanmoins évoquée ici dans la mesure où les procédures de calcul sont similaires à celles utilisées pour la détermination de l'ensoleillement en un point donné de l'espace. D'autre part l'interfaçage du logiciel avec des bases de données numériques 3D[11] permet de réaliser des simulations (accessibilité visuelle ou autres) à partir de données urbaines déjà constituées, évitant par là même le fastidieux problèmes de la modélisation d'une part, d'accès aux données d'autre part (hauteurs des bâtiments surtout).

Le domaine de l'accessibilité visuelle concerne pêle-mêle la visibilité mutuelle de deux points d'un site urbain, ou encore la visibilité d'éléments singuliers du paysage urbain depuis un point particulier de l'espace, leur éloignement, le nombre d'objets singuliers visibles, l'angle de vue sous lequel ils sont perçus, etc. Rien n'empêche évidemment ensuite d'y superposer les informations issues d'une simulation masque ou héliodon...

Les travaux dans ce domaine s'orientent actuellement vers l'analyse et la caractérisation de trajets urbains au regard des ambiances visuelles perçues par l'usager au cours de son déplacement (tâches solaires, contrastes, rythmes, etc.) d'une part, et d'autre part, sur un plan plus prospectif, vers des problèmes d'intervisibilité pouvant conduire à l'édification de règles (au sens juridique du terme), par rapport au patrimoine historique notamment (visibilité d'un monument depuis une zone particulière de l'espace urbain, son occultation éventuelle par une construction nouvelle, etc.).



[11] Les interfaces actuellement opérationnelles sont capables d'importer les fichiers d'extension dxf (type AutoCad), gs1 (Arc+), ext (Trapu), lp (Lightscape), asc et sem (FranceTelecom)...

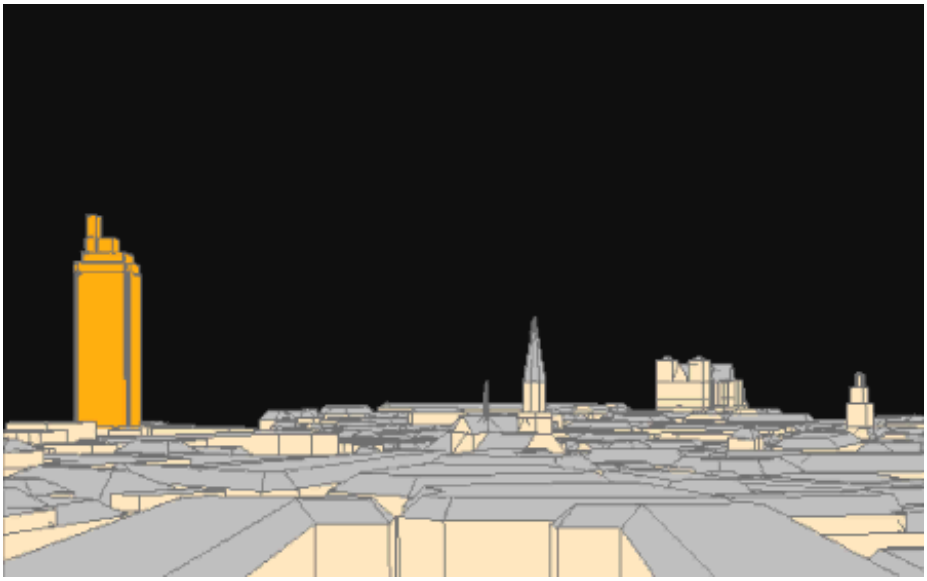


Fig. 10. Visibilité d'un élément singulier dans le paysage urbain : ici la tour de Bretagne à Nantes (d'après M. Morin, Lecture de la tour de Bretagne ; développement d'un outil de lecture de la ville : simulation de l'accessibilité visuelle, TPFE, École d'architecture de Nantes, 1995).

2.5 Conclusion

Cette recherche, visant à développer les potentialités d'un outil de simulation préalablement développé au sein du CERMA, vient s'inscrire parfaitement dans le cadre de la première des thématiques de ce laboratoire, relative à la conception et à la réalisation d'une instrumentation traitant des paramètres physiques des ambiances. S'y ajoute, au-delà des aspects relevant purement de phénomènes physiques, une préoccupation clairement affichée vis à vis des spécificités et des besoins du domaine architectural et urbain. Autrement dit, la plupart des développements décrits dans les pages de ce rapport – et surtout leur articulation avec l'existant – ne visent en aucun cas à la constitution d'un outil de simulation généraliste, mais ils proposent avant tout un ensemble aussi riche que possible (et en évolution permanente) de fonctions susceptibles d'intéresser l'architecte ou l'urbaniste se préoccupant quelque peu du confort des usagers.

Ainsi certaines procédures, ou plus exactement l'enchaînement de procédures élémentaires, habituellement automatisé et donc transparent pour l'utilisateur dans les logiciels d'imagerie, sont décomposées dans le cas de SOLENE, chacune des étapes donnant accès à de nouvelles fonctions ; les phases de développement successives du logiciel ont toujours été effectués en ce sens d'ailleurs. Il faut bien admettre que cet aspect, s'il contribue à une grande souplesse d'utilisation, présente parfois l'inconvénient de créer une

certaine confusion chez les utilisateurs nouveaux, en ce sens qu'il suppose la connaissance précise du processus permettant de parvenir à une simulation donnée ; le produit gagnerait sans doute en facilité d'utilisation par l'automatisation de certaines fonctions répétitives, globalisées et affichées dans l'interface utilisateur sous la forme de simulations types.

Si les champs d'application de l'outil logiciel sont extrêmement variés – et ces aspects seront développés plus largement dans le chapitre 8 –, il faut pourtant garder à l'esprit que les informations qu'il fournit, aussi conséquentes et pertinentes soient-elles, restent très partielles face à un domaine aussi étendu que celui des ambiances architecturales et urbaines... Celles-ci relèvent en effet de paramètres à la fois objectifs (phénomènes physiques quantifiables, reproductibles, dont certains d'entre eux précisément pourront être traités par SOLENE), mais également subjectifs, par conséquent liés aux références culturelles de l'usager, de même qu'aux variabilités individuelles de la physiologie et de la psychologie de la perception (ces aspects ne seront pas discutés ici).

D'autre part, parmi les approches susceptibles de fournir une contribution de type scientifique au projet, les niveaux d'information peuvent être de nature très différente, ou encore se situer à des stades divers du processus de conception. On pourra objecter par exemple que la plupart des méthodes numériques de simulation relatives aux aspects physiques des ambiances dans le projet architectural consistent davantage en une vérification *a posteriori* (après complétude du projet) ; ou alors, si elles sont utilisées dans une phase un peu plus amont du projet, elles se heurtent au fait que le processus de conception n'est pas parvenu à son terme, et leur intérêt devient moindre... Dans la première hypothèse (utilisation en phase finale d'exécution à titre de valorisation) elles vérifient, dans le meilleur des cas, la pertinence des espaces projetés (au regard du ou des phénomènes simulés, sur le plan quantitatif), ou au contraire, les problèmes qu'elles révèlent obligent à une remise en cause partielle ou totale du projet ; dans la seconde hypothèse (évaluation du projet plus en phase « intermédiaire »), les résultats qu'elles délivrent le sont d'après des informations partielles et/ou encore définies de manière imprécise, donc susceptibles, ultérieurement, de modifications relativement importantes.

C'est la raison pour laquelle se sont développés depuis plusieurs années d'autres axes de recherche dont le propos est d'informer le projet architectural ou urbain dès les phases amonts du processus de conception. Parmi les différentes propositions existantes, on peut citer par exemple la « simulation inverse[12] » des ambiances et l'emploi d'une modélisation géométrique de type déclaratif, où il s'agit de « modéliser les formes architecturales à partir des intentions d'ambiance du concepteur » ; ou encore les procédures d'évaluation interactive du projet architectural[13] par utilisation de la logique floue (*fuzzy logic*), où il est ici question « d'aider l'architecte à savoir comment

[12] D. Siret, *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural ; application à l'ensoleillement*, thèse de doctorat, 1997.

[13] L. Mudri, *Aide à la conception de l'éclairage naturel dans la phase d'esquisse architecturale et son impact sur l'énergétique du bâtiment*, thèse de doctorat en énergétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1996.

logic), où il est ici question « d'aider l'architecte à savoir comment atteindre ses intentions » en se proposant d'évaluer, à tout moment, l'adéquation entre la solution apportée et l'intention initiale.

Ces recherches sont sans conteste fort prometteuses, mais elles font très clairement partie d'un autre registre ; aussi les deux approches sont finalement plus complémentaires que mutuellement exclusives ; par exemple les modèles phénoménologiques que sont les ensembles flous sont intéressants à utiliser pour palier l'absence de modèle physique opérationnel, ou encore si la mise en oeuvre du modèle physique est jugée trop lourde par rapport aux objectifs fixés – tout en gardant à l'esprit que les résultats issus d'approches différentes informeront le projet de manières très différentes également. Enfin les diverses méthodes proposées pour l'évaluation du projet en phase amont de la conception restent pour l'instant à un stade de développement qui rend leur utilisation délicate au sein d'un projet réel, les résultats qu'elles procurent étant de toute évidence peu utilisables par l'architecte (ou bien ils demeurent trop simplistes et ne l'informent pas plus que ne le font les éléments de connaissance issus de sa pratique quotidienne, ou alors ils doivent mettre en oeuvre des processus dont la lourdeur n'a rien à envier aux simulations réputées « lourdes » qui utilisent les principes de la radiosité par exemple). C'est précisément le cas de la simulation inverse, où la quantité d'informations à traiter peut devenir rapidement considérable.

Par contre on peut ajouter au bénéfice des méthodes de simulations dites de « vérification » un potentiel beaucoup plus large que les simples rôles de vérification ou de validation *a posteriori* auxquels nous avons fait référence jusqu'à maintenant ; en effet leur fonction ne se limite pas à la simulation d'architectures « en projet », mais elle couvre également le champ des objets existants, qu'il s'agisse de réalisations anciennes ou contemporaines, de dispositifs architecturaux ou urbains particuliers... Il s'agit donc là d'une fonction d'analyse de configurations réelles, dont la multiplicité peut par exemple mener à l'établissement d'une « bibliothèque » de cas types ou d'éléments de référence susceptibles d'alimenter la réflexion durant le processus de conception. On pense notamment ici au site Internet Audience[14], dont le propos est précisément la diffusion de ce type d'information, mais aussi de permettre à l'utilisateur la réalisation de simulations interactives, dans l'hypothèse de configurations simples exclusivement (les fonctionnalités et les attendus de ce site sont décrits dans la section 5.4.3.2.2).

Pour ce qui concerne le contrôle de la lumière naturelle, ces modes de simulation permettent donc de procéder à l'analyse de solutions singulières, à l'évaluation des performances de dispositifs architecturaux existants particuliers, éléments répertoriés par exemple pour la qualité des ambiances lumineuses qu'ils sont censés dispenser ; il devient ainsi possible de mettre en évidence les éléments pertinents des solutions proposées ; même chose s'il s'agit de l'expérimentation d'une solution technologique novatrice, aux résultats encore incertains... On peut également penser à la (tentative de) re-

[14] Projet européen Léonardo hébergé par le CERMA ; il s'agit d'un programme d'auto-formation à distance qui vise les secteurs du bâtiment, de l'environnement et de la réhabilitation (voir 5.4.3.2.2).

constitution – et par conséquent d'analyse – des ambiances intérieures d'ouvrages historiques (temples, cathédrales, etc.) à partir de descriptions écrites, de peintures ou de gravures. Elles autorisent également, après complétude du projet, la comparaison entre la rhétorique de l'architecte et les résultats obtenus, voire même venir infirmer les qualités (pré)supposées d'architectures de renom.

► SOLENE, un ensemble de procédures pour les simulations : Apports proposés à l'initiation de cette recherche

Sont donnés ci-dessous les objectifs initiaux de la recherche engagée ; nous verrons en fin de document que ces objectifs ont été largement dépassés, sur le plan de l'instrumentation d'une part (par la prise en compte des vitrages notamment), mais également sous l'aspect des potentialités et des prolongements de l'outil logiciel, puisque les développements effectués ont d'ores et déjà ouvert d'autres pistes de recherche au sein du laboratoire, l'ensemble restant en parfaite cohérence avec la thématique du CERMA. Les objectifs initiaux peuvent grossièrement se décliner comme suit :

- Développement des potentialités d'un outil (existant) de simulation et d'analyse de l'ensoleillement pour tendre vers un outil susceptible de traiter (c'est-à-dire quantifier, analyser, comparer, révéler, visualiser...) les éclairements énergétiques et lumineux dans les espaces intérieurs ainsi que dans l'environnement urbain (les aspects relatifs au diffus donc...). Si la désignation « d'outil d'aide à la conception » pour un projet donné peut sembler quelque peu excessive puisque la place de SOLENE se situe difficilement au stade des intentions premières, le logiciel peut

sans nul doute aider le concepteur en phase amont par l'étude de configurations ou de dispositifs particuliers, et sans conteste valider ou infléchir certains choix dans des phases plus avales ; il trouve également sa place dans le domaine de l'expertise.

- Restructuration de l'interface utilisateur de SOLENE et implémentation sous système d'exploitation WINDOWS de manière à simplifier son utilisation et améliorer sa convivialité, de telle sorte qu'il puisse être employé plus facilement par des utilisateurs non « avertis ». Nous pensons ici à une utilisation rapide par les étudiants et les architectes. À noter que cette mission se situe en dehors de notre travail de recherche.

- Maintien de l'architecture globale très ouverte du produit existant, de manière à rendre possible et relativement aisée toute implémentation future de fonctionnalités nouvelles, quel que soit l'endroit où elles se situent dans la chaîne de simulation. Cet aspect n'est pas sans conséquences pour l'utilisateur car, comme exposé plus haut, cette grande « adaptabilité » se paie pour l'instant en termes de facilité d'emploi ; il apparaît possible d'y remédier assez aisément dans un proche avenir en réalisant un enchaînement automatisé de certaines fonctions ou simulations types, tout en maintenant l'accès possible aux différents maillons de la séquence...

▼ Le chapitre vient de replacer le « logiciel » SOLENE dans son contexte historique et de le situer parmi les thématiques du laboratoire au sein duquel il a été développé ; il a en outre explicité de manière rapide mais néanmoins complète les procédures existantes au moment où cette recherche a été entreprise, et mis l'accent sur les insuffisances du logiciel à cette époque. Il apparaît désormais nécessaire d'aborder de manière précise les phénomènes et les paramètres physiques mis en jeu dans les différentes procédures utilisées ; ceux-ci font l'objet du chapitre suivant.

3 Aspects physiques

La source de la lumière solaire peut être considérée comme une source ponctuelle, plus ou moins intense. Elle soumet les objets qu'elle rencontre et les surfaces qu'elle atteint à un double phénomène, l'un purement objectif, l' « éclairement », l'autre subjectif, puisqu'il relève du psychisme individuel, appelé communément : « lumière ».

A l'aube, le flux solaire est de très faible intensité, mais il s'amplifie rapidement en s'accompagnant de phénomènes de colorations variables (suivant l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée), et peut atteindre près de 100000 lux en pleine journée. L'œil supporte ces variations d'éclairement lumineux considérables, alors que les différents supports d'images (films, procédés magnétiques ou électroniques) exigent divers artifices techniques (obturateur, diaphragme, filtre) pour restituer un rendu plastique comparable à ce que la vision humaine est capable de tolérer ; on aborde là d'ailleurs l'un des problèmes de l'imagerie de synthèse, qui bute sur une plage de luminance des moniteurs très réduite (de l'ordre de 1 à 100 seulement). Pourtant certains courants de la peinture ont résolu le problème en (ré)interprétant la puissance solaire dans une vision très personnelle qui ne tente pas de calquer le réel, mais plutôt de le transposer, de le transcender par un perçu fondamentalement subjectif (c'est précisément le propos des impressionnistes). Quant aux cartographies tridimensionnelles que se propose d'afficher le logiciel SOLENE, elles ne sont évidemment pas concernées par ces remarques puisqu'il ne s'agit pas de « rendu d'ambiance » au sens classique du terme, mais de représentations symboliques des phénomènes simulés (en fausses couleurs par exemple).

3.1 Énergie dispensée par l'astre solaire

L'énergie distribuée par le soleil est contenue dans son rayonnement électromagnétique essentiellement, dont une partie constitue le rayonnement visible ; pour nos applications, il peut être considéré comme une source constante et ponctuelle. Ce rayonnement se propage sans atténuation et en ligne droite depuis le soleil jusqu'à son entrée dans l'atmosphère terrestre ; lors de sa traversée des couches atmosphériques, il y est atténué et même dévié par les différents constituants de l'atmosphère. On comprend aisément qu'en dehors de ces constituants eux-mêmes, l'épaisseur traversée constitue le principal facteur d'atténuation du rayonnement ; cette épaisseur sera d'autant plus importante que les rayons solaires seront bas sur l'horizon (voir la masse d'air optique – section 6.4.1.2).

3.1.1 Radiations directes et diffuses

L'énergie en provenance de l'astre solaire est donc dans un premier temps diffusée par les constituants de la couche atmosphérique, mais le rayonnement qui parvient jusqu'au sol l'est de nouveau par l'ensemble des corps situés à la surface terrestre ; il est susceptible d'atteindre la surface terrestre sous deux formes (Fig. 11.), très différentes en quantité et en qualité :

- sous la forme de radiations *directes*, dirigées selon la direction soleil-terre ; ce sont les radiations, en provenance du disque solaire (contenues dans l'angle solide sous lequel il est vu depuis le point considéré), qui ont pénétré l'atmosphère sans avoir été diffusées ou absorbées, mais qui ont cependant été atténuées par les composants de la couche atmosphérique. Elles ne concernent évidemment que les périodes d'ensoleillement.

- sous la forme de radiations *diffuses*, qui proviennent de toutes les directions de l'hémisphère céleste suite à leur diffusion par les molécules, les poussières et les aérosols de l'atmosphère, la diffusion et la réflexion par les nuages et enfin les réflexions entre le sol et les couches basses de l'atmosphère ; le disque solaire n'est alors pas pris en compte. Raleigh a montré que l'atmosphère diffuse le rayonnement de manière sélective : la diffusion est plus importante pour celui de courte longueur d'onde, la conséquence visible de ce phénomène étant la couleur bleue du ciel.

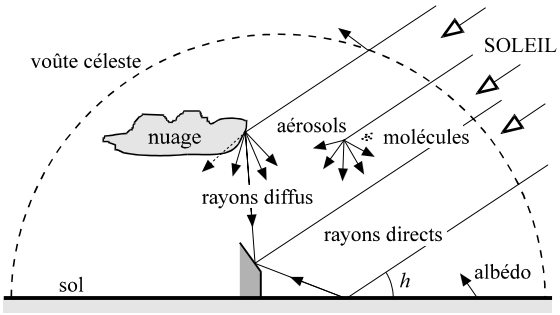


Fig. 11. Les différents rayonnements reçus par un élément de la surface terrestre.

Pour un observateur terrestre situé à l'extérieur de la couche atmosphérique, la lumière solaire est fondamentalement directionnelle, mais les phénomènes de la couche atmosphérique qui viennent perturber (diffuser, rediriger, affaiblir, etc.) ce rayonnement font que, selon les circonstances, il peut rester unidirectionnel avec projection d'ombres plus ou moins marquées, ou bien devenir totalement diffus, sans une quelconque ombre propre ou ombre portée. Le « perçu » de l'environnement qui en résulte s'en trouve lui aus-

si grandement affecté (grossièrement la création de contrastes plus ou moins marqués, de zones de taille variable avec l'altitude du soleil, d'alternances, de rythmes, une sorte de hiérarchisation lumineuse du paysage urbain dans le premier cas, le second cas au contraire amenant à une perception quasiment identique de l'ensemble des éléments du bâti, quel que soit leur orientation et leur éloignement...).

L'énergie *globale* qui atteint la surface terrestre est finalement la somme des radiations directes et diffuses (Fig. 12.), « l'efficacité » de ces rayonnements (du direct surtout) étant lié à leur direction par rapport à la surface qu'ils viennent frapper :

$$G = I \cdot \cos Z + D$$

où G est le rayonnement global, I le rayonnement direct, D le rayonnement diffus,
et Z l'angle zénithal du soleil.

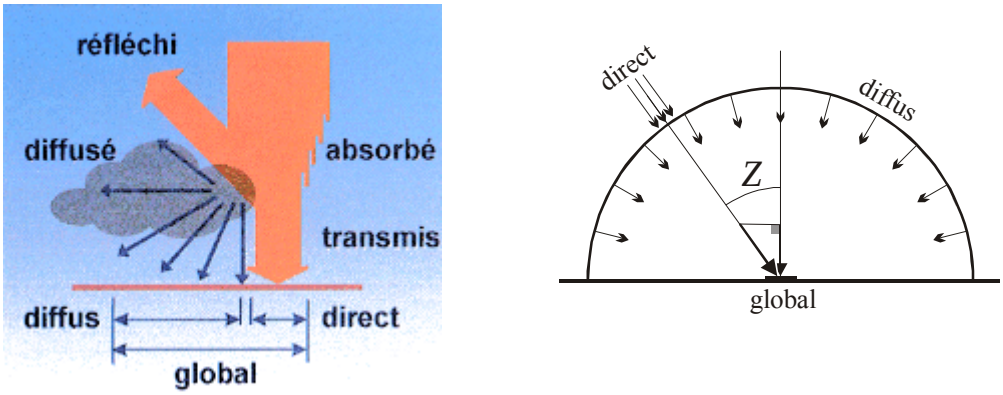


Fig. 12. Modification directionnelle et quantitative du rayonnement au sein de la couche atmosphérique, et composition de l'énergie globale parvenant à la surface terrestre.

La contribution diffuse dépend essentiellement des conditions atmosphériques (présence ou non de nuages, types de nuages...), et sa proportion par rapport à la quantité totale distribuée augmente avec la couverture nuageuse ; elle peut varier approximativement de 10 % de l'énergie globale pour un ciel clair (Fig. 13.) à quasiment 100 % pour un ciel totalement couvert (Fig. 14.). La partie diffuse est donc loin d'être négligeable, mais souvent difficile à quantifier précisément ; de plus les contributions dues à la voûte céleste sont parfois moins simples qu'il n'y paraît : par exemple les ciels d'un bleu profond de l'Europe du sud apportent moins de lumière diffuse que n'en procurent les ciels couverts de latitudes plus septentrionales ; cette remarque est importante pour les façades orientées vers le nord, dans la mesure où le sens commun tend à exécrer cette orientation, qui pourtant procure des niveaux lumineux beaucoup plus constants que ceux en provenance d'autres directions. D'autre part ce rayonnement n'est pas distribué de manière uniforme sur la voûte céleste, mais tend à être plus concentré au voisinage

nière uniforme sur la voûte céleste, mais tend à être plus concentré au voisinage de la position du soleil et dans certains cas à proximité de l'horizon (voir les développements relatifs aux ciels sereins, section 6.6.4).

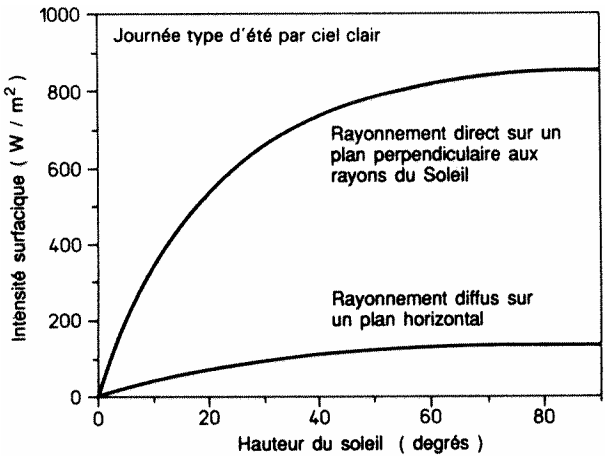


Fig. 13. Valeurs moyennes du rayonnement solaire direct (normal au flux solaire) et du rayonnement diffus (sur un plan horizontal) par ciel clair, en fonction de la hauteur solaire (source CSTB).

Conditions atmosphériques ou visuelles	Frais, ciel bleu et dégagé	Fort brouillard	Le soleil perce	Le soleil apparaît sous forme d'un disque jaune	Le soleil apparaît sous forme d'un disque blanc	Soleil à peine perceptible	Brouillard élevé	Couvert
Global (W/m^2)	1000	600	500	400	300	200	100	50
Diffus (%)	10	50	30	50	60	100	100	100

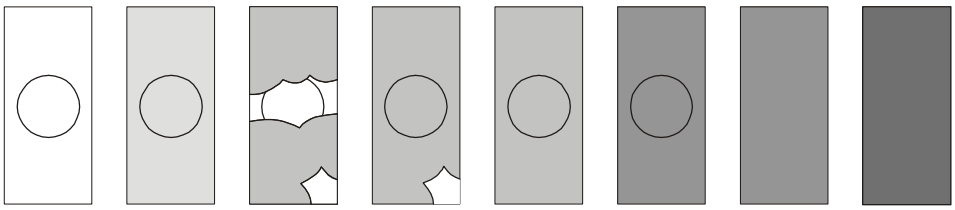


Fig. 14. Éclairements approximatifs dus au rayonnement solaire, pourcentage du diffus, et proposition de traduction iconique de ces différentes conditions d'insolation.

En définitive, l'énergie naturelle que reçoit une scène urbaine provient de plusieurs sources, que l'on peut qualifier de primaires et de secondaires. La source primaire est

constituée essentiellement par le soleil (énergie directe), les sources secondaires pouvant être la voûte céleste (énergie diffuse), mais également tout élément de surface de la scène (énergie diffuse également) ; en effet, le sol, les façades, la végétation, un plan d'eau, etc., finalement toute surface intérieure ou extérieure peut, par réflexion de l'énergie directe provenant du soleil ou de surfaces en vis-à-vis, se comporter comme un émetteur secondaire ; il s'agit bien évidemment là encore d'énergie diffuse, supposée réfléchie de manière identique dans toutes les directions, et quantifiée sous la forme d'un facteur de réflexion moyen, plus connu sous le nom d'*albédo*, dont quelques valeurs typiques sont données dans le tableau ci-dessous (Fig. 15.). On notera d'une part qu'il s'agit de valeurs moyennes, et d'autre part que de nombreux matériaux de façade contemporains (marbres, verres) peuvent avoir des facteurs de réflexion bien plus importants que ceux donnés dans le tableau (ligne « bâtiments »).

Matériau	Facteur de réflexion moyen estimé (albédo)
Forêt sombre, champs verdoyants	3 à 8 %
Bâtiments, sable humide, rochers	8 à 15 %
Asphalte, sol nu sec	15 à 25 %
Briques, herbes sèches, déserts, étendues de sel	25 à 40 %

Fig. 15. Pourcentages du rayonnement solaire incident réfléchi par diffusion (source *The Handbook of Chemistry and Physics*, Weast, CRC Press, 1975).

La *quantité* d'énergie reçue par l'environnement dépend de nombreux facteurs, liés plus ou moins directement aux caractéristiques du tissu urbain considéré. Les éléments suivants entrent en ligne de compte :

- des paramètres directement liés au lieu d'implantation, qui sont essentiellement les aspects géographiques et climatiques ; les premiers permettent de déterminer la trajectoire du soleil, les seconds traduisent le trouble atmosphérique par exemple, ou encore le mode de répartition de la luminance sur l'hémisphère céleste. Ils concernent finalement les caractéristiques du « gisement lumineux » (types de ciels, fréquences d'occurrence, etc.), et donc la modélisation des émetteurs d'énergie que sont le soleil et le ciel.

- des facteurs dépendant de l'architecture elle-même et de son insertion dans le site : ils concernent évidemment la morphologie des éléments constitutifs (formes, orientation, dimensions...), mais aussi les relations qui peuvent exister entre ces éléments (obstructions par exemple). Ils incluent également les matériaux employés, dont dépendent le type de réflexion (spéculaire, diffuse) et les coefficients

d'absorption, de réflexion et de transmission, eux-mêmes fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

- enfin l'aspect spectral revêt une grande importance et concerne à la fois émetteur et récepteur. Le spectre énergétique du rayonnement solaire est presque totalement (à 98 %) inscrit dans l'intervalle 0,25 à 4 μm, le spectre visible se situant, quant à lui, dans un intervalle beaucoup plus étroit, compris entre 0,38 et 0,78 μm (Fig. 16.). De plus les récepteurs sont sélectifs sur le plan spectral, c'est-à-dire qu'ils absorbent, réfléchissent ou transmettent plus ou moins bien selon la longueur d'onde du rayonnement reçu ; l'exemple le plus classique est sans doute l' « effet de serre », mis à profit dans les capteurs solaires – mais se révélant le plus souvent gênant pour l'usager –, où le spectre du rayonnement réfléchi par les absorbeurs est décalé vers des longueurs d'onde pour lesquelles le facteur de transmission du verre est faible. Les coefficients α, ρ et τ (respectivement absorption, réflexion et transmission) sont donc fonction de la longueur d'onde λ, et ils obéissent à la relation $\alpha(\lambda)+\rho(\lambda)+\tau(\lambda)=1$.

L'ensemble des rayonnements électromagnétiques concerne donc une gamme très étendue de phénomènes qui, s'ils restent analogues dans leur mode de propagation, sont en revanche très diversifiés quant aux interactions avec la matière.

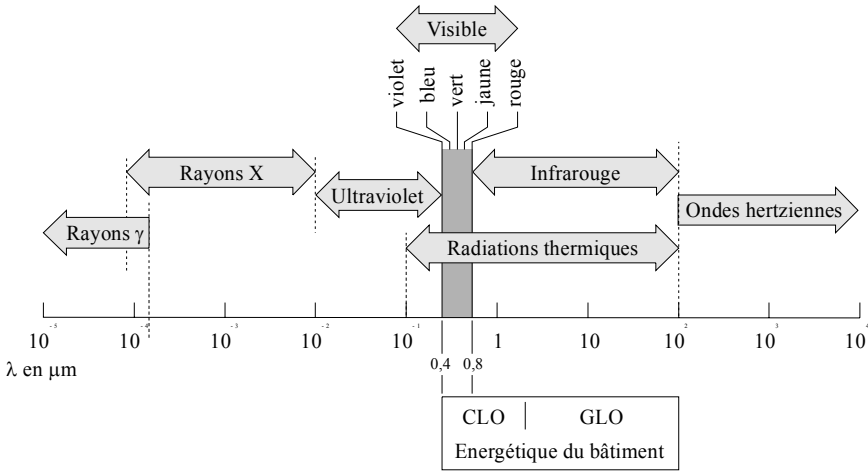


Fig. 16. Répartition du spectre des radiations électromagnétiques. L'intervalle qui concerne les aspects étudiés ici – l'énergétique du bâtiment – s'étend approximativement de 0,1 à 100 μm.

La composition et la répartition spectrale des rayons solaires qui atteignent la surface terrestre sont résumés dans le tableau et les courbes qui suivent (Fig. 17.) :

Composition	Pourcentage	Remarques
Rayons ultraviolets (UV)	3 %	Ont une action sur les composés organiques
Rayonnement infrarouge (IR)	55 %	En majeure partie à l'origine de la chaleur dispensée par le soleil
spectre visible	42 %	380 à 780 nanomètres environ

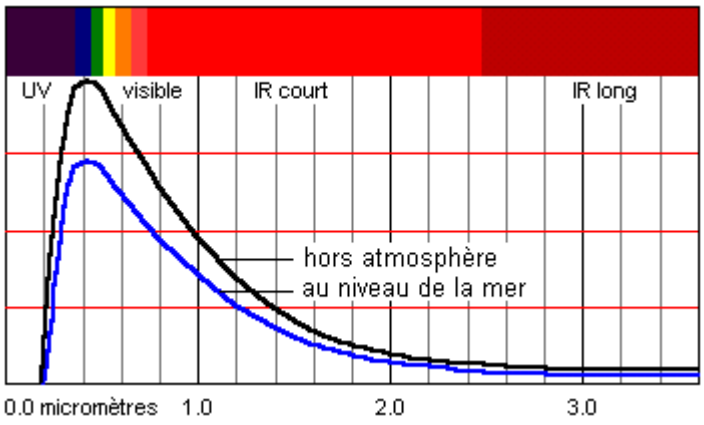


Fig. 17. Répartition du spectre solaire ; globalement la couche atmosphérique affaiblit la quantité de rayonnement mais ne modifie pas son spectre.

Même si les théories générales sont communes, on distinguera dans les domaines qui nous intéressent – les aspects physiques relatifs au bâtiment – deux gammes principales de rayonnement :

- le rayonnement thermique de grande longueur d'onde (GLO), ou rayonnement thermique, ou encore infrarouge lointain (5 à 100 μm). Ce rayonnement diffus est émis et absorbé par tout corps à une température absolue de l'ordre de 300 K ; ceci correspond donc aux transferts de chaleur dans les conditions d'ambiance naturelle (au niveau des surfaces des parois, plus de la moitié de la puissance est échangée de cette manière).

- le rayonnement de courte longueur d'onde (CLO) se situe entre 0,3 et 2,5 μm, et comprend donc le spectre visible (de 0,4 à 0,8 μm) ; cette gamme concerne la part principale du rayonnement solaire transmis par l'atmosphère (et les sources de lumière artificielle). Les apports énergétiques du rayonnement solaire jouent un rôle très important dans le bilan énergétique et pour le confort d'été à l'intérieur des bâtiments.

Pour les longueurs d'onde qui viennent d'être évoquées, les matériaux utilisés en architecture pourront être considérés comme des milieux soit opaques, soit partiellement ou totalement transparents. Si le milieu est opaque, le rayonnement sera en partie absorbé et en partie réfléchi ; si le milieu est parfaitement transparent, le rayonnement sera traité

comme s'il se propageait dans le vide ; si le milieu est partiellement transparent, il faut en plus tenir compte de l'absorption et d'éventuelles diffractions.

Nous resterons ici dans les cas des matériaux opaques, donc susceptibles d'absorber et de réfléchir le rayonnement uniquement, ainsi que des matériaux transparents (vitrages clairs essentiellement). Les perspectives de développement (voir la section 7.3) incluent le traitement de matériaux au comportement plus complexe (semi-transparents et réfléchissants notamment).

3.1.2 « Effets » du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire a sur l'environnement terrestre en général des conséquences et des applications nombreuses, situées dans des registres très divers. La grande majorité des utilisations de l'énergie solaire s'effectue sans instrumentation particulière, mais la palette d'utilisation de cette énergie devient plus large encore par l'emploi de technologiques adaptées : dispositifs de captation, « amplification » éventuelle (par concentrateur optique, par effet de serre), et/ou transformation en d'autres types d'énergie, le plus souvent de nature électrique.

Les différents effets du rayonnement solaire sur l'environnement sont maintenant assez bien répertoriés, mais ils restent souvent difficiles à quantifier précisément – le mécanisme de la photosynthèse notamment, assez bien élucidé même si on ignore la manière dont les photons (l'énergie lumineuse donc) agissent sur les composés carbonés. Il s'agit là d'effets que l'on peut qualifier de biologiques, essentiels dans le domaine agroalimentaire notamment. L'effet thermoélectrique, où la chaleur est transformée en électricité, ou encore l'effet photovoltaïque, qui transforme cette fois la lumière solaire en énergie électrique, sont d'autres modes de transformation du rayonnement solaire en une autre forme d'énergie. On connaît également les effets du rayonnement sur le métabolisme humain, voire sur sa psychologie, même si dans ces domaines on ne fait qu'observer et constater les phénomènes, sans nécessairement identifier leurs mécanismes ni préciser les relations de cause à effet...

Ces derniers aspects, qui relèvent évidemment davantage du domaine des sciences humaines que des sciences physiques, font donc partie de champs encore relativement mal connus, mais paradoxalement assez peu étudiés. Il est par exemple assez difficile d'approcher la satisfaction psychologique liée à l'ensoleillement, ou celle relative à la manière dont la lumière naturelle pénètre dans un local ; il s'agit alors de relier des quantités physiques à des opinions subjectives, susceptibles d'être dépendantes de nombreux facteurs. Plusieurs études, par voie d'enquêtes *in situ*, font apparaître des différences nationales ou socioculturelles notables, auxquelles vient s'ajouter le jeu de la variabilité individuelle. On notera toutefois que s'il n'est pas toujours facile d'approcher le « degré de satisfaction » des usagers par rapport à une organisation spatiale ou à un dispositif donné, il est en général plus aisé de dégager la population « d'insatisfaits » (fraction prévisible d'insatisfaits ou FPI).

3.2 Les grandeurs physiques utilisées

3.2.1 Définitions et unités

Les domaines des rayonnements et des échanges lumineux et thermique utilisent de nombreuses grandeurs géométriques et physiques ; si les premières restent élémentaires (elles concernent le repérage spatial et la trigonométrie sphérique), les secondes sont trop nombreuses et complexes pour ne pas nécessiter un rappel de leur définitions précises ; d'autre part l'utilisation conjointe des terminologies française et anglo-saxonne contribue à une certaine confusion, que tentent de lever un certain nombre de définitions, de schémas et de tableaux récapitulatifs. Mais afin ne pas surcharger l'exposé, l'ensemble de ces éléments est proposé en annexe (Annexe 1) ; on ne donnera ici qu'un tableau récapitulatif des différentes grandeurs, avec leurs unités.

Grandeurs	**Unités**		**Terminologie anglo-saxonne**	
	Énergétiques indice *e*	lumineuses indice *v*	*e* (énergétique)	*v* (visuel)
Flux Φ (transporté par un faisceau)	watt [**W**] = $J \cdot s^{-1}$	lumen [**lm**]	Radiant power	Luminous power
Luminance *L* (dans un pinceau de rayonnement) ≡ flux par unité d'étendue géométrique	watt par mètre carré et par stéradian $\mathbf{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}$	candela par mètre carré $\mathbf{cd \cdot m^{-2}}$ [= *nit*] = $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Radiance	Luminance
Éclairement *E* (d'une surface réceptrice) ≡ flux reçu par unité de surface	watt par mètre carré $\mathbf{W \cdot m^{-2}}$	lux ou lumen par mètre carré **lx** = $lm \cdot m^{-2}$	Irradiance	Illuminance
Émittance et **Exitance** *M* (d'une surface émettrice) ≡ flux quittant un élément de surface, par unité d'aire	**Émittance** watt par mètre carré $\mathbf{W \cdot m^{-2}}$	**Exitance** lux ou lumen par mètre carré $\mathbf{lm \cdot m^{-2}}$	Radiant exitance (*radiosity*)	Luminosity
Intensité *I* (d'une source) ≡ flux émis par unité d'angle solide	watt par stéradian $\mathbf{W \cdot sr^{-1}}$	candela [**cd**] = $lm \cdot sr^{-1}$	Radiant intensity	Luminous intensity

Fig. 18. Les différentes grandeurs physiques utilisées ; leurs unités radiométriques et photométriques.

Les unités radiométriques appartiennent à un système physique d'unités, de type énergétique, dont l'unité de quantité de lumière est le *joule* [J] ; au contraire, les unités photométriques relèvent quant à elles d'un système psychophysique de grandeurs lumineuses, utilisable dans le seul domaine visible, dont l'unité fondamentale est le *candela*. Ces aspects méritent quelques développements complémentaires.

3.2.2 Luminance et vision

Si la plupart des grandeurs physiques définies dans le tableau précédent restent plutôt abstraites, l'une d'entre elles pourtant est directement « observable », ou plus exactement quantifiable par l'œil : il s'agit de la luminance. Aussi est-il paradoxal de choisir l'éclairement (en lux) comme principal critère d'évaluation de l'éclairage d'un plan de travail puisque l'œil humain est totalement insensible à ce paramètre. L'utilisation de ce critère dans nombre de codes de calcul ou pour l'établissement de normes est probablement dû au fait que cette grandeur est l'une des plus faciles à mesurer (un simple – et peu coûteux – luxmètre y suffit, alors que le coût et la mise en oeuvre d'un luminancemètre sont nettement plus élevés), l'appréciation individuelle de la luminance restant de toutes manières très subjective.

Il s'agit pourtant de la seule grandeur lumineuse à laquelle l'œil humain soit directement sensible : c'est celle qui correspond le mieux à la sensation visuelle appelée luminosité ou clarté d'une surface, et sa sensibilité s'étend sur une vaste plage allant de 10^{-6} à $5 \cdot 10^{4}$ cd/m^2. Mais la manière dont l'œil convertit la luminance cette sensation lumineuse n'est pas linéaire ; on peut considérer qu'il s'agit en première approximation d'une loi logarithmique, qui a été normalisée par la CIE pour les luminances variant de 0 à 100 cd/m^2 ; elle est connue sous le nom de loi de Weber et s'écrit sous la forme :

$$B = 25L^{1/3} - 17$$

où L est la luminance d'un objet,

et B la réponse de l'œil à cette luminance L.

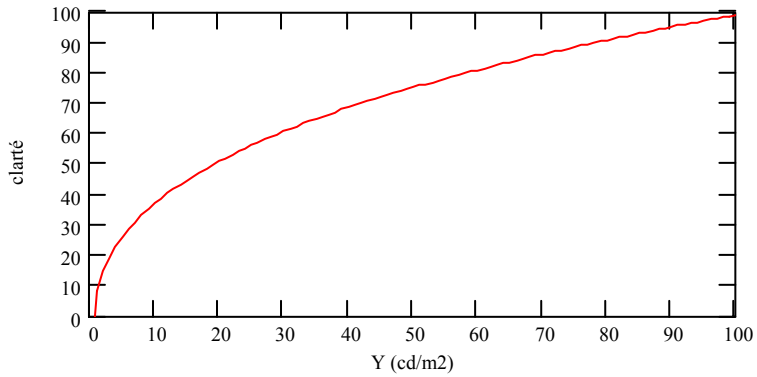


Fig. 19. Loi de Weber ; on note immédiatement que l'œil est susceptible de fournir des réponses extrêmement variables pour des luminances relativement voisines.

Bodmann[15] et *al*. ont proposé une formulation beaucoup plus générale (valable sur l'ensemble de la plage de sensibilité de l'œil), qui néanmoins reste cohérente avec celle de Weber dans le cas d'une luminance de fond nulle ; elle relie cette fois la sensation de luminosité B à la luminance effectivement perçue L en fonction de la luminance de fond L_f. Son expression est de la forme :

$$B = 23 \log L - 5,5 \log L_f - 1,6$$

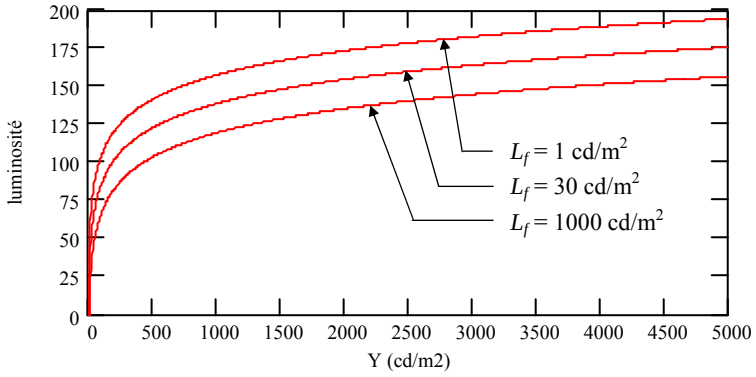


Fig. 20. Lois de Bodmann pour trois luminances de fond L_f différentes : 1, 30 et 1000 cd/m^2 ; on notera ici l'importance du contraste bien connu figure/fond : l'objet apparaît d'autant plus lumineux qu'il est situé sur un fond de faible luminance.

On rappelle que la luminance est le rapport entre l'intensité lumineuse d'une source et sa surface apparente :

$$L = \frac{I}{A_{\text{apparente}}} = \frac{I}{A \cdot \cos \alpha}$$

où α est l'angle que fait la direction d'observation avec la normale à la surface.

Le passage des radiations énergétiques aux radiations lumineuses se fait par l'intermédiaire de l'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ représentative de l'effet produit sur l'œil par cette radiation.

Pour la vision photopique (diurne), l'efficacité lumineuse (définie par la CIE en 1924) présente un maximum K_m de 683 lm/W pour la longueur d'onde de 555 nm (lumière verte), expliquant ainsi le fait que l'œil soit capable de distinguer des verts très proches

[15] Bodmann, Haubner, and Marsden, in CIE Proceedings, Kyoto, 1979.

les uns des autres (même si cette sensibilité différentielle est accrue au voisinage de 555 nm, le pouvoir de comparaison et de discrimination de l'œil vis à vis de deux luminances voisines reste très efficace pour toutes les longueurs d'onde du visible).

380	439	498	568	592	631	760	
UV	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge	IR
	412	470	515	577	600	673	

Fig. 21. Correspondances, définies par la CIE, entre longueurs d'ondes (en nanomètres) et couleurs.

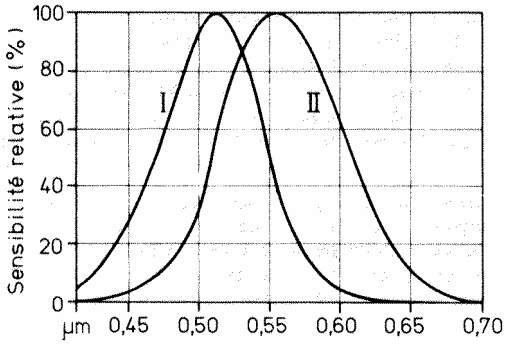


Fig. 22. Les courbes de sensibilité de l'œil humain (définies par la CIE), fonction de la longueur d'onde du stimulus, pour les visions crépusculaire ou scotopique (I) et diurne ou photopique (II). En photométrie, la vision photopique correspond à des niveaux de luminance supérieurs à 10 cd/m^2 environ, la vision scotopique à des niveaux de l'ordre de 0,01 cd/m^2, caractérisée par une perte de la perception des couleurs.

3.3 Comportement des corps face au rayonnement

3.3.1 Généralités

Suite à la mise en place des différentes notions relatives aux grandeurs physiques et à leurs unités, il devient maintenant nécessaire de préciser comment ces grandeurs sont susceptibles d'être modifiées, c'est-à-dire la manière dont les surfaces des corps se comportent vis-à-vis des rayonnements qui viennent les frapper, tout en se limitant aux domaines solaire et thermique. Les caractéristiques optiques et radiatives des matériaux de construction ont en effet des conséquences importantes, à la fois sur le plan du confort (perception visuelle, confort thermique), ainsi que sur les performances énergétiques du bâtiment.

La surface d'un matériau qui reçoit un rayonnement de longueur d'onde λ peut donner naissance à trois phénomènes qui, dans la plupart des cas, se produisent simultanément ; il est néanmoins possible de les isoler et d'envisager leur étude de manière distincte :

- la réflexion du rayonnement incident, qui ne modifie pas sa longueur d'onde, à l'exception de circonstances très particulières telles que la fluorescence.

- la transmission du rayonnement, sans modification de la longueur d'onde ; dans ce cas comme le précédent, le rayonnement incident n'affecte en rien l'évolution de la température du matériau.

- l'absorption du rayonnement, provoquant en général une élévation de la température du matériau, qui alors devient supérieure à celle de l'environnement ; il en résulte l'émission d'un rayonnement provenant du déséquilibre des échanges radiatifs à grande longueur d'onde, son spectre dépendant des températures du matériau et de son environnement.

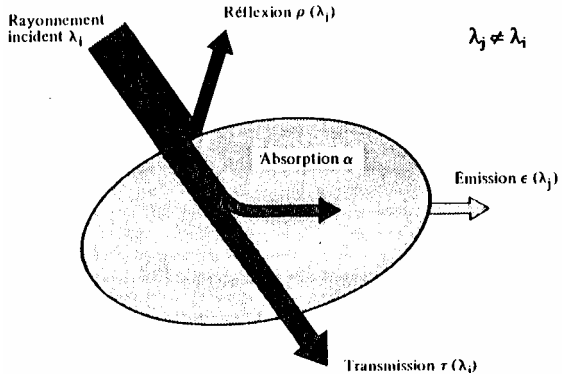


Fig. 23. Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement
(d'après Traité de Physique du bâtiment, CSTB).

3.3.2 Facteurs optiques

Ce sont essentiellement aux deux premiers de ces phénomènes (réflexion et transmission) que sont rattachés les trois facteurs optiques, et qui permettent de caractériser, de manière globale, le comportement d'un corps vis-à-vis d'un rayonnement incident.

- le facteur de réflexion ρ (*réflectance* dans la terminologie anglo-saxonne) : c'est le rapport du flux réfléchi au flux incident ; en première approximation, il ne dépend que des propriétés de la surface qui reçoit le rayonnement incident.

- le facteur de transmission τ (*transmittance*) : rapport du flux transmis au flux incident ; il dépend du matériau, de sa structure, et de l'épaisseur traversée.

- le facteur d'absorption α (*absorptance*) : rapport du flux absorbé au flux incident ; il est le complément à 1 des deux facteurs précédents (réflectance ρ et transmittance τ), de telle sorte que $\rho + \tau + \alpha = 1$.

Finalement les seuls facteurs optiques qui intéressent notre problématique sont le facteur de réflexion et le facteur de transmission, à la fois dans le domaine lumineux (visible) et dans le domaine énergétique. À noter que ces facteurs sont qualifiés de facteurs totaux hémisphériques dans la mesure où ils couvrent la totalité du spectre et l'ensemble de l'espace ; mais comme indiqué précédemment, ils tendent à « globaliser » les phénomènes de réflexion et de transmission en question, de sorte que ceux-ci sont censés être identiques dans toutes les directions et pour toutes les longueurs d'onde.

Mais il est clair que si le facteur de réflexion global peut convenir pour des matériaux parfaitement diffusants, il traduit des conditions très éloignées de la réalité s'il s'agit d'un matériau de type spéculaire, puisque celui-ci réfléchit dans une direction qui dépend de celle du rayon incident (selon la loi de Descartes). Il est donc indispensable, pour s'affranchir des seuls matériaux diffusants, d'élargir la notion de facteur optique vers ses dépendances spectrale et directionnelle. C'est précisément ce que nous proposons dans la section 7.3, où sont donnés les développements théoriques relatifs aux facteurs optiques des matériaux ; en revanche ces développements récents sont actuellement en phase d'implémentation et ne sont donc pas encore totalement opérationnels au sein de SOLENE ; aussi sommes-nous restés ici dans l'hypothèse de matériaux parfaitement diffusants, tout en précisant, en fin de document, les avantages présentés par la prise en considération de ces éléments.

3.4 Conclusion

Les pages qui précèdent ont tenté de définir un cadre général utile pour la compréhension des développements ultérieurs de ce document. Elle ont rappelé quelques aspects fondamentaux du domaine des sciences physiques relatifs aux rayonnements solaires et lumineux, ainsi qu'à leur « devenir » après avoir rencontré la surface d'un matériau.

▼ Le chapitre suivant poursuit, dans un tout autre domaine cette fois, la mise en place de ce cadre général en proposant un très bref aperçu sur la manière dont la lumière solaire et la lumière diffuse ont été envisagées par les bâtisseurs au cours de l'histoire.

4 Lumière et architecture : quelques repères historiques

Ce chapitre ne prétend pas proposer un historique en matière d'ensoleillement et d'éclairement naturel, mais il tente plutôt, grâce à une sélection de quelques exemples caractéristiques, de préciser quelles ont été les périodes charnières et les raisons de l'évolution des connaissances dans ces domaines. Cette sélection – évidemment subjective et incomplète – puise indifféremment parmi les réalisations architecturales, les architectes, ou encore la production écrite (ouvrages, articles…).

En outre les exemples présentés ici correspondent typiquement à des configurations que l'outil développé permet de traiter (orientation par rapport au soleil, les musées par exemple) ; des configurations similaires seront d'ailleurs reprises dans la section consacrée aux applications.

4.1 Urbanisme et ensoleillement

L'histoire fournit de multiples exemples d' « arrangements[16] » basés sur l'exposition au soleil, et plus largement aux conditions climatiques dominantes (vents notamment) ; on remarquera toutefois que si cet attachement aux rythmes de l'environnement se retrouve à différentes périodes, il ne s'agit en aucun cas d'une préoccupation constante chez les bâtisseurs ; nombre de villes sont « non directionnelles », c'est-à-dire que l'orientation des voies et des constructions s'est effectuée indépendamment de toute considération vis à vis de la course du soleil, pas plus qu'à certaines caractéristiques climatiques saisonnières particulières (vents dominants par exemple). L'orientation des agglomérations a été le plus souvent établie par rapport à des voies déjà existantes, ou en fonction d'un élément singulier du relief (colline, fleuve, etc.), leur position relevant alors davantage de la stratégie défensive que d'un quelconque rapport à l'environnement ; elle a pu s'organiser encore à partir de préceptes mystiques ou cosmogoniques, qu'il s'agisse de l'orientation d'un monument religieux singulier ou de la disposition de villes entières, révélant par là-même une certaine indifférence aux contraintes de l'environnement et au rythme des conditions d'insolation.

[16] Par « arrangement » on entend toute disposition architecturale ou urbaine (orientation, taille, éloignement des différents éléments, différentiel de hauteur, visibilité, etc.) susceptible de venir infléchir de manière plus ou moins importante les conditions climatiques régnant en un lieu donné, rapportée à celles existant en site dégagé.

On trouve pourtant à toutes les époques et dans des sociétés aux modes de vie fort différents le témoignage d'une préoccupation manifeste des habitants ou des bâtisseurs vis-à-vis de leur environnement, et plus particulièrement de l'ensoleillement ; elle nous sont parvenues soit par la présence de vestiges archéologiques, soit par la perpétuation d'une tradition constructive, ou encore sous la forme d'écrits. Parmi ceux-ci, les plus célèbres sont sans aucun doute ceux de Vitruve, qui signale l'importance, pour les Romains, de la distribution des pièces par rapport à la course solaire et leur répartition autour d'une cour, écrits abondamment relayés par les traités théoriques à partir de la Renaissance ; il en existe d'autres (d'Ascalon par exemple), mais aucun n'a atteint la renommée de celui de Vitruve... Parmi les modes de construction ancestraux, on peut citer par exemple certaines habitations des indiens Pueblos du Nouveau Mexique, dont le toit massif et très isolant déborde largement sur des façades sud peu isolantes ; les façades sont ainsi protégées du soleil d'été, tandis qu'en hiver, elles captent et transmettent vers l'intérieur la chaleur du soleil... Dans une région voisine (près d'Albuquerque, au Nouveau Mexique) mais en altitude cette fois, le pueblo Acoma (étudié par Knowles[17]) présente lui aussi un habitat adapté à l'environnement climatique (désertique en altitude). Les rayons inclinés du soleil d'hiver viennent frapper les épaisses façades qui stockent l'énergie durant la journée, et la restituent aux espaces intérieurs durant la nuit (froide) ; pendant l'été au contraire, les rayons solaires frappent plus directement les plans horizontaux (les toitures et les terrasses), dont la capacité à stocker l'énergie calorifique est beaucoup plus faible.

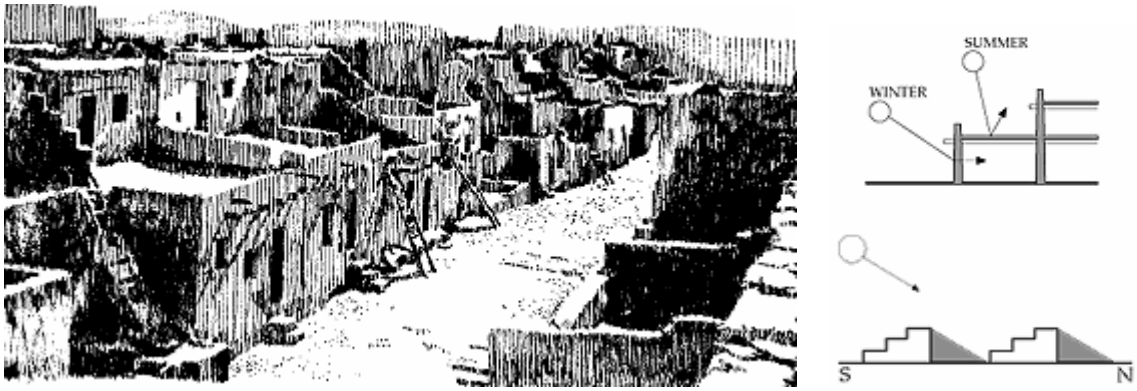


Fig. 24. Acoma Pueblo ; l'épaisseur des murs en maçonnerie est importante, alors que les toits et les terrasses sont constitués de poutres de bois recouvertes de roseaux qui sont liés par un mortier d'argile et d'herbes.

[17] Ralph L. Knowles, professeur à l'université de Californie (USC) ; ses recherches l'ont conduit au concept « d'enveloppe solaire » (R. Knowles et R. D. Berry), l'enveloppe solaire régulant le développement à l'intérieur de contours imaginaire issus des déplacements du soleil Voir *The Solar Envelope*, article disponible à l'adresse http://www-rcf.usc.edu/~rknowles/sol_env/sol_env.html

Beaucoup plus près de nous, l'orientation des villes continue de susciter quelques vives polémiques chez les ingénieurs et les architectes. C'est surtout la période de l'entre-deux-guerres qui verra s'affronter les thèses contradictoires des hygiénistes Rey (architecte) et Marboutin (ingénieur, professeur à l'École Centrale de Paris) dans cette quête de l'orientation idéale des cités (en Europe, cette querelle n'est pas nouvelle puisqu'elle apparaît dès la fin du 19ème siècle...).

> *« Les idées les plus confuses et les plus contradictoires règnent en matière d'ensoleillement. Les uns s'appuient sur des traditions plus ou moins vérifiées, basées sur des cas généralement trop peu nombreux, d'autres sur des théories plus ou moins exactes ne tenant pas compte de la qualité du flux solaire »…*

C'est par ces propos quelque peu provocateurs que Gaston Bardet introduit son article *Le facteur soleil en urbanisme* dans le numéro spécial de la revue *Technique et Architecture* de juillet-août 1943 consacré au soleil. Il constate en effet des préconisations sans base scientifique et pour le moins divergentes quant à l'orientation des habitations et des cités devant le rayonnement solaire ; l'ouvrage d'Augustin Rey *La science des plans de ville* en est symptomatique : il définit une « unité héliothermique », produit d'une température de surface (de la façade) par une durée d'insolation… Sans plus de justification, il prône un axe héliothermique orienté de 19° vers le nord-est, donc assez voisin de l'axe nord-sud, orientation censée recueillir le maximum statistique annuel de calories sur les deux faces d'un immeuble ; le plan d'Anvers[18] (1933) et de nombreux grands ensembles français en sont des illustrations. L'ouvrage est sévèrement critiqué par Bardet, qui y voit « inconscience, manque d'esprit scientifique, conjugués avec le mandarinat ». Reste à faire la part entre la rigueur scientifique du même Bardet et son amertume à peine voilée vis-à-vis des sus-nommés...

F. Marboutin, montre au contraire que l'axe nord-sud serait plutôt le pire (École Centrale, 1910) ; à partir d'observations météorologiques, et donc de considérations faisant intervenir la nébulosité – notion toujours utilisée de nos jours – et les radiations en provenance de la voûte céleste, il conclut qu'un angle de 60° à 75° avec le méridien correspond à l'exposition la plus favorable sur le plan thermique, conduisant ainsi à une trame urbaine losangée (Fig. 25.) ; il prend tout à fait conscience du fait que la façade nord peut recevoir en hiver, par ciel couvert, une quantité de radiations réfléchies plus importante que la façade sud, précisément en raison de la couverture nuageuse.

Bardet remarque que les avis contradictoires de Rey et Marboutin ont jeté quelque peu le trouble dans les esprits ; il fait en effet référence à Bigaut de Casanove, pour qui la rue nord-sud offre la meilleure insolation (alors que les rayons solaires sont quasiment parallèles aux façades lorsqu'ils sont porteurs de l'énergie maximale !), ou encore à Vinaccia qui, partagé entre Rey et Marboutin, choisit les rues du premier et les îlots du second ! (Fig. 25.).

---

[18] Projet de Le Corbusier.

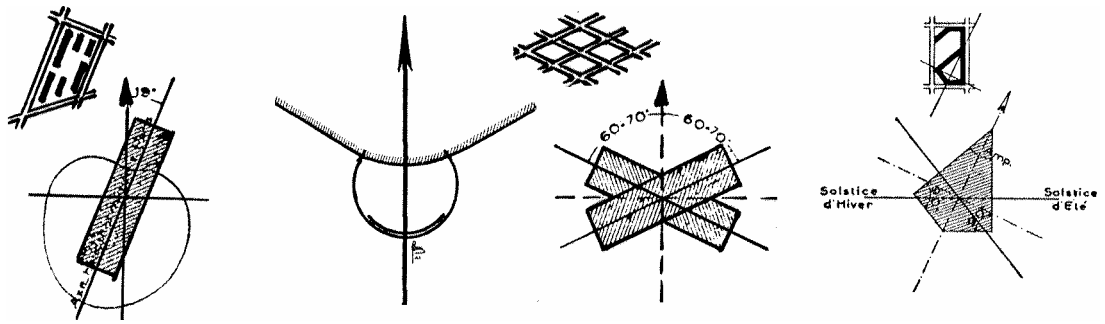


Fig. 25. Des avis divergents (!) quant à l'orientation des blocs d'habitations ; de gauche à droite : l'axe héliothermique d'Augustin Rey, les trames losangées de F. Marboutin, et l'ensoleillement « équisolaire » de G. Vinaccia.

A noter que Le Corbusier et les protagonistes de la future Charte d'Athènes utiliseront alternativement, et de manière systématique, l'axe héliothermique et l'orientation nord-sud (c'est le cas des cités Radieuses, ou les façades est et ouest sont situées dans le plan de symétrie des trajectoires solaires, supposant de fait une symétrie identique pour les « effets » solaires). Alexandroff [1] relève cet aspect fondamental dans les recherches de la période féconde de l'urbanisme international, où la relation au soleil est de type géométrique exclusivement, sans considération aucune pour le « climat global » ; il s'en suit une absence de prise en compte des effets soleil-vent, mais surtout, pour rester dans le cadre de cette étude, un oubli total du rayonnement diffus, qu'il s'agisse de la voûte céleste ou de l'environnement ; on a vu que Marboutin en avait pourtant parfaitement pris conscience plusieurs décennies auparavant...

Même si de nos jours les querelles évoquées précédemment peuvent paraître un peu désuètes, il n'en demeure pas moins qu'elles sont symptomatiques des tâtonnements d'une époque qui n'est pas si lointaine (années 1910-1930), tâtonnements qui tendent à perdurer aujourd'hui. En effet, bien que les connaissances théoriques aient nettement progressé dans le domaine, il est manifeste que leur mise en application ne fait pas encore partie de la pratique quotidienne du concepteur, ou plus exactement ne constitue pas une priorité majeure dans le processus de conception ; cet état de choses est sans doute en train de changer (lentement), pour preuves la manière dont la critique architecturale actuelle met l'accent sur l'aspect exemplaire des réalisations qui justement se préoccupent des dimensions lumineuses, thermiques, acoustiques, etc., ou la création de « labels » comme celui de Haute Qualité Environnementale[19] (qui tente de dépasser les seuls aspects normatifs), ainsi qu'une recrudescence de colloques et congrès internationaux traitant de ces problèmes...

[19] La Haute Qualité Environnementale (ou HQE), sorte de label qualité initié au sommet de Rio, relayé et financé en France par l'ADEME, qui tente de prendre en compte l'ensemble des aspects environnementaux tout au long de la vie d'un bâtiment (pollution, consommation énergétique, etc.) ; on compte à ce jour plusieurs dizaines de réalisations se réclamant de ce label.

En revanche il est bien évident que les conditions climatiques ne sont pas, à elles seules, déterminantes d'une forme d'habitat ; si elles ont pu être à certaines époques et dans certaines contrées génératrices de formes d'habitats spécifiques (la forme devenant alors l'un des moyens de se protéger des rigueurs du climat), les progrès immenses effectués dans les domaines technologiques (matériaux, construction, mise en œuvre...) ont rendu presque caduque cette nécessité d'adaptabilité à l'environnement, pour conduire fatalement vers une négation totale de l'environnement, particulièrement dans le secteur tertiaire aux États-Unis, dans une période qui s'étend depuis les années cinquante jusqu'au milieu des années soixante dix.

Contrairement aux aspects relatifs au soleil proprement dit, pris en compte et étudiés – avec, comme on vient de le voir, une rigueur scientifique parfois très relative – depuis les civilisations les plus anciennes (pour des raisons relevant parfois plus du mystique que de la physique et des notions de confort d'ailleurs), l'étude de la voûte céleste et la quantification des effets de sa luminance sur les bâtiments (extérieurs et intérieurs) sont extrêmement récents. Mais si l'on peut considérer que Marboutin est sans doute le premier à avoir réellement considéré la lumière diffuse dans ses calculs, il n'en demeure pas moins que les bâtisseurs et les architectes s'en sont préoccupé depuis fort longtemps, mais sous des aspects qualitatifs essentiellement : « jeu » des éléments architectoniques sous un environnement lumineux diffus chez les grecs par exemple, pénétration de la lumière du jour à l'intérieur des édifices chez les bâtisseurs du moyen-âge...

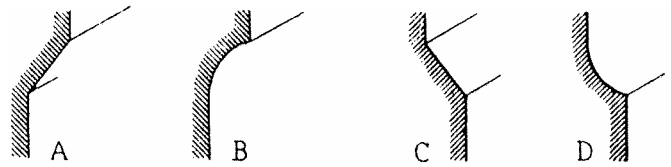
De toute manière l'approche restait en général totalement empirique, avec parfois pourtant des tentatives d'expérimentation systématique d'un panel de dispositifs de prise de jour (c'est le cas de John Soane – voir la section 4.2). Les raisons majeures étaient le manque de connaissances sur la nature véritable de la lumière, les paramètres permettant de la décrire, et par conséquent d'outils susceptibles de la contrôler de manière objective – au demeurant certaines réalisations datant de plusieurs siècles n'ont rien à envier aux constructions de ces dernières décennies quant au traitement de la lumière naturelle (en qualité et en quantité)...

4.2 Prise en considération de la lumière diffuse

Les préoccupations qualitatives évoquées plus haut sont manifestes chez les grecs, dont on sait qu'ils portaient une attention toute particulière à la manière dont sont perçus les éléments architectoniques (géométrie, contrastes, etc.) ; depuis Vitruve jusqu'à Choisy, les écrits font souvent des descriptions détaillées d'un ensemble de dispositions permettant d'assurer une perception « satisfaisante » de l'ouvrage : galbe des colonnes, convergence de l'axe des colonnes, surplomb du fronton vers l'avant, etc.

Il est donc tout aussi manifeste qu'ils maîtrisaient déjà parfaitement ce « *jeu savant, correct et magnifique des volumes sous la lumière*[20] » ; Auguste Choisy, dans la partie relative à l'architecture grecque du premier tome de son *Histoire de l'architecture*[21], effectue une description très précise de ce jeu dans la section intitulée *« Le choix des moulures suivant leur fonction et leur éclairage* », en distinguant lumière directe et lumière diffuse, et insiste particulièrement sur le traitement différencié d'un même élément de modénature, selon qu'il se trouve sous les feux d'un rayonnement direct (l'élément doit rester alors lisse et doux), ou bien baigne dans une lumière diffuse (des « artifices » – stries par exemple – viennent donner corps à l'élément en question) :

> *« Le choix des moulures est réglé avant tout sur leur rôle utile : une moulure ornant l'extérieur d'un édifice doit autant que possible écarter les eaux pluviales du parement [...].*
>
> *Mais ces considérations d'ordre purement matériel sont loin de fixer de façon complète l'allure du profil ; et ici intervient l'analyse des jeux de la lumière.*
>
> *Les effets sont fort différents selon que la lumière est directe ou diffuse, en d'autres termes selon que la moulure est frappée par le soleil, plongée sous l'ombre d'une saillie ou baignée des lueurs vagues d'un intérieur [...].*



> *Un biseau occupant la position A se dessine en noir à l'extérieur, en clair dans la lumière diffuse ; retourné (C), il s'enlève avec éclat sur une façade, sous un portique il se détache à peine. Le cavet B donne à la lumière directe une ombre vigoureuse et transparente ; dans un intérieur, une teinte blanchâtre et molle. Ainsi des autres profils.*
>
> *Les Grecs ont analysé tous ces effets : lorsqu'un cavet se trouve dans la lumière diffuse, presque toujours ils lui ôtent sa mollesse par des stries vigoureuses ; les moulures exposées au grand jour sont arrondies, les moulures en pénombre anguleuses et heurtées ».*

---

[20] « L'architecture est le jeu savant, correct et magnifique des volumes sous la lumière ; les ombres et les clairs révèlent les formes », in *Vers une architecture*, Le Corbusier.

[21] Auguste Choisy, *Histoire de l'architecture*, 1899.

Les propos – beaucoup plus contemporains – du chef opérateur Henri Alekan[22] n'en sont finalement pas très éloignés, même s'il va au-delà de caractéristiques exclusivement physiques pour aborder les aspects psychologiques que sont susceptibles de produire les différents types d'éclairage sur le spectateur :

> *« L'éclairage solaire unidirectionnel est une « lumière partisane », qui, en modelant formes et contours, désigne l' « objet », insiste, sépare, tranche, cisèle, et souligne l'essentiel des formes, repoussant le secondaire en moindre valeur. C'est une lumière hiérarchisante, classificatrice ; une lumière « engagée ».*
>
> *En revanche, l'éclairage diffus, par la multiplicité de ses flux, qui enrobent l' « objet » de toutes parts, a un rôle objectivement et subjectivement dispersif ; il « noie » le principal en le mêlant au secondaire. La lumière ne souligne plus, elle amalgame, elle estompe, elle dissocie. C'est une lumière troublante : une lumière annihilante ».*

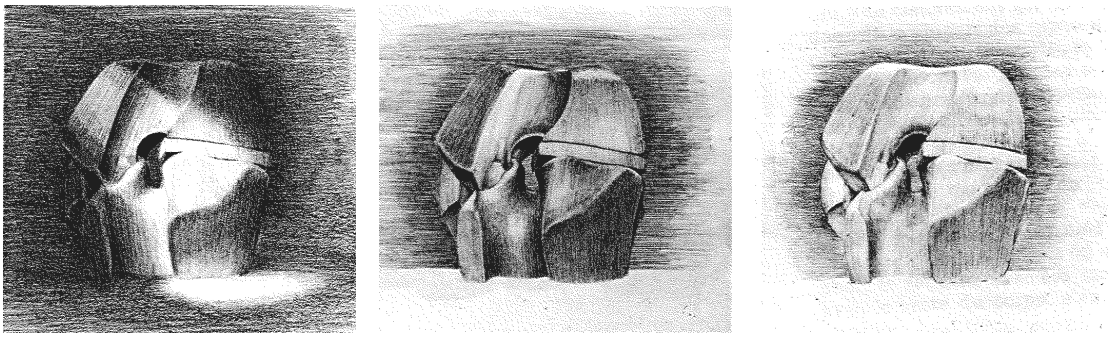


Fig. 26. Lecture d'une sculpture (Pièce-Enclenchement, Henry Moore, 1964), en fonction du type d'éclairage : à gauche, lumière parallèle et dirigée, ne donnant qu'une information réduite sur la « plasticité » de l'objet ; au milieu, lumière provenant de sources et réflexions multiples, permettant une lecture plus aisée de l'objet grâce à l'alternance entre zones d'ombre et parties éclairées ; à droite, lumière uniforme, qui estompe la plasticité de l'objet (d'après P. von Meiss).

Mais des raisons très éloignées de considérations purement scientifiques ou d'ordre esthétique ont parfois amené des modifications sensibles et durables dans la disponibilité en lumière naturelle à l'intérieur des constructions – à tel point que certaines perdurent encore de nos jours. C'est précisément le cas des institutions qui, par l'adoption de certaines lois urbaines, taxes, etc., particulières à chaque pays, ont pu influencer de ma-

[22] Henri Alekan, *Des lumières et des ombres*, La Librairie du Collectionneur, Paris, 1991. Alekan a effectué la mise en lumière d'une cinquantaine de films, dont *Quai des brumes* (Marcel Carné, 1938), *La Belle et la bête* (Jean Cocteau, 1945), *Les Ailes du désir* (Wim Wenders, 1987)…

nière non négligeable la composition urbaine, les façades des bâtiments et finalement la quantité de lumière disponible à l'intérieur des constructions. Par exemple un système de taxes qui dépend de l'aire totale du vitrage ou alors du nombre total d'ouvertures peut conduire, au fil du temps – et si la pression fiscale est suffisamment importante bien sûr –, à des typologies de façades extrêmement différentes. Ce fut le cas en Angleterre dans les années 1700, où une taxe sur le nombre d'ouvertures a conduit certains propriétaires à édifier des « fenêtres » obstruées de briques, attendant l'abrogation de la loi pour les vitrer… ou une situation financière plus confortable de manière à acquitter la taxe en question ! A l'heure actuelle encore, une loi garantit à chaque usager un « droit à l'ensoleillement ». Les Pays-Bas constituent un autre exemple édifiant, où la taxe portant cette fois sur la largeur de la façade sur rue a mené à l'étroite (mais profonde) travée flamande ; la proximité des murs mitoyens permettant de libérer les pignons de leur fonction porteuse, ceux-ci se sont transformés en vastes fenêtres permettant de laisser pénétrer la lumière naturelle profondément dans l'édifice ; il est intéressant de noter que cette typologie perdure, même si ses aspects originels (à la fois légaux et techniques) ne s'appliquent plus aujourd'hui.

Mais c'est sans conteste la révolution industrielle qui a apporté les changements les plus importants et les plus rapides à la fois dans les exigences et les solutions proposées pour le contrôle de la lumière du jour à l'intérieur des locaux ; la production du verre en panneaux de grandes dimensions (30 cm × 20 cm en France en 1833 !) et la réduction de la section de l'ossature par l'utilisation du fer (donc augmentation de la quantité de lumière pénétrant à l'intérieur de l'édifice) ont offert de nouvelles opportunités architecturales ; elles ont conduit, dans la seconde moitié du 19ème siècle, à la réalisation d'un grand nombre de passages couverts (Fig. 27.), gares, halles d'exposition, etc.., comportant de multiples surfaces courbes (permettant dans le même temps d'accroître la résistance sur le plan structurel), et qui ont contribué à l'essor de la préfabrication. D'autre part l'exotisme très en vogue à cette période – depuis les années 1750 environ – contribuera de manière significative au développement des connaissances des propriétés optiques et thermiques du verre ; à la suite de toutes les expéditions du 18ème siècle se multiplient les collections de végétaux, cultures de fruits exotiques, etc., et par conséquent la construction de serres horticoles destinées à les abriter (Fig. 28.), qu'elles soient publiques ou privées (dans ce cas elles sont la plupart du temps attachées aux « Folies », sortes de mises en scène de l'exotisme dans l'habitat). Enfin le nombre et la taille croissants des ateliers et usines ont certes contribué aux avancées de la technologie dans le domaine de l'éclairage artificiel, mais ont également suscité des interrogations et amené des solutions nouvelles quant aux dispositifs d'éclairage naturel pour les bâtiments de grandes dimensions, insuffisamment éclairés par les prises de jour latérales (lanterneaux, verrières, sheds par exemple).

Fig. 27. À gauche, passage Pommeraye, Nantes, 1840 - 1843 ;
à droite, Galerie St-Hubert, Bruxelles, 1847 (Cluysenaar architecte).
Dans les deux cas, la toiture entièrement vitrée autorise une large pénétration de la lumière du jour, que des façades claires permettent de diffuser dans les parties les plus basses et les espaces adjacents.
Le facteur de lumière du jour est d'environ 17% au centre de la galerie St-Hubert, pour diminuer rapidement vers 1% derrière les baies vitrées des boutiques[23].

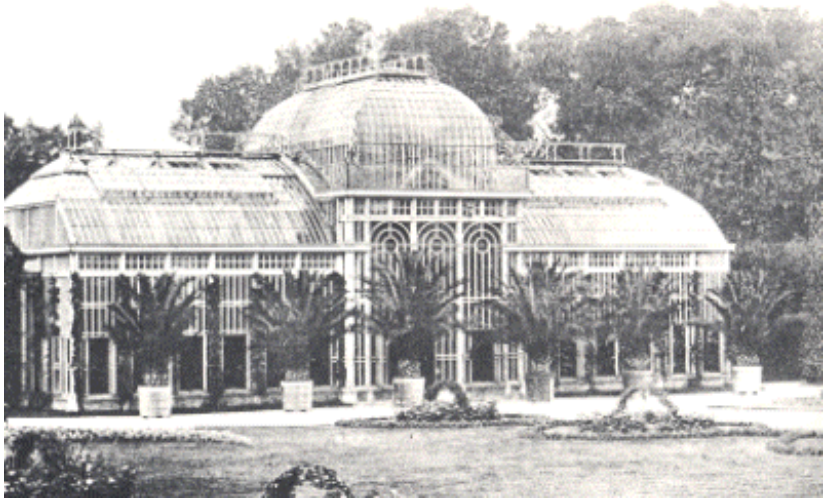


Fig. 28. Le jardin fleuriste de J. de Rothschild, à Ferrières-en-Brie (1854 - 1859).

[23] Source *Daylight Performance of Buildings*, édité par M. Fontoynont, ENTPE, Lyon, 1999.

Si la construction des bâtiments de grandes dimensions (à caractère industriel essentiellement) a pu inciter les scientifiques à entreprendre des recherches sur le contrôle de la lumière naturelle dans les espaces intérieurs, un autre domaine a également réclamé leurs compétences, sous une forme encore beaucoup plus précise et subtile : ce sont les galeries d'art, dont le nombre s'est accru de manière importante à cette époque en Europe, en raison du transfert de nombreuses collections privées aux mains d'institutions publiques (on retrouve là l'influence de l'institution sur tout un pan de la recherche scientifique). La conjonction de ces différents besoins a donc fait du milieu du 19ème siècle un terrain propice à l'éclosion des premières théories concernant la distribution de la lumière naturelle à l'intérieur des locaux.

En ce qui concerne ces galeries d'exposition nouvellement créées, la mise en valeur des œuvres d'art se heurtait à plusieurs contraintes nécessitant des solutions quasiment contradictoires : apporter une quantité de lumière plus importante que ne le faisaient les espaces d'exposition privés, répartir plus uniformément cette lumière sur les cimaises (surtout pour les tableaux de grandes dimensions), tout en réduisant les éblouissements causés par la lumière solaire directe ainsi que les réflexions parasites sur les vitres protectrices des tableaux. A noter que les astreintes sont les mêmes aujourd'hui, et même plus délicates encore à satisfaire dans la mesure où la quantité de lumière doit être limitée pour la préservation des œuvres (réaction des matériaux organiques au rayonnement ultra-violet). Les premiers véritables travaux en ce sens sont réalisés en Angleterre par Cockerell (vers 1850), qui place un écran opaque au-dessus de la galerie ; les investigations sont poursuivies par Weismann (1895), qui propose plutôt des puits de lumière.

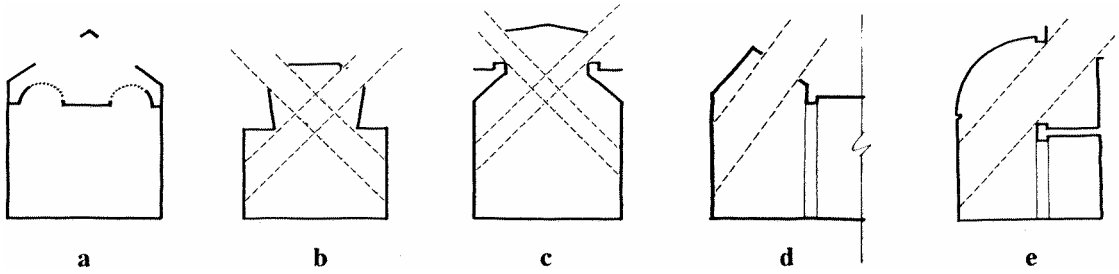


Fig. 29. Diverses expérimentations relatives à la géométrie de la section des galeries d'exposition, au regard de l'apport en lumière naturelle (fin du 19ème siècle).
Cockerell (1850) (a) et Weissman (1895) (b) ont été à l'origine du principe consistant à diriger la lumière sur les tableaux ; pourtant dès 1814 Soane avait intuitivement réalisé le dispositif à la *Dulwich gallery* (c) (même si la partie supérieure, opaque à l'origine, fut vitrée ultérieurement) ; en 1912 Seager affine les principes de Cockerell (d) ; ceux-ci, réinterprétés par le Laboratoire National de Physique anglais, ont été utilisé pour l'une des salles de la *National Portrait Gallery* de Londres en 1927 (e) (source *Daylighting in Architecture* [96]).

Mais cette idée n'était pas nouvelle, puisque l'architecte anglais Sir John Soane (1753 - 1837) l'avait déjà recommandée et surtout expérimentée quelques décennies auparavant. Aussi peut-on attribuer sans conteste la première manifestation tangible d'une

préoccupation réelle et globale vis-à-vis de la lumière naturelle (autre que les aspects solaires proprement dits) à cet architecte, dont les quelques constructions qui subsistent encore de nos jours renferment sans doute les deux fleurons de l'ensemble de sa production : la *Dulwich Picture Gallery* (1811 - 1815), ainsi que sa propre demeure (1812 - 1834), devenue le *Soane Museum* (musée et bibliothèque[24]), cette dernière constituant une sorte de « mémorial » à la gloire de la lumière naturelle… La Banque d'Angleterre (1788 - 1833) constitue, toujours vis à vis de la lumière naturelle, un autre projet essentiel de Soane[25], dont le *Stock Office* (1792) et le *Consols Office* (1797) en sont sans doute les points d'orgue. L'édifice a été malheureusement détruit délibérément en 1927, et il n'en reste aujourd'hui que les peintures de Joseph Mickael Gandy (Fig. 30.). On remarquera enfin que le modèle de banque établi par Soane pour la *Bank of England* affirme pour la première fois son identité (lieu de passage et d'échange dédié à l'argent), mais n'est guère éloigné des bibliothèques de l'époque : grands volumes couverts, chauffés et surtout abondamment éclairés par le haut (en effet la lumière zénithale étant la plus régulière, elle paraît la plus appropriée à l'écriture).

Fig. 30. Le *Consols Office* de la Banque d'Angleterre (1797), perspective de Joseph M. Gandy ; celui-ci était devenu le peintre « attitré » de Soane en raison de sa tendance à exagérer les « effets » lumineux dus à la pénétration de la lumière naturelle, ici par des fenêtres hautes semi-circulaires et une lanterne à claire-voie au-dessous du dôme central.

[24] Renseignements utiles concernant visites et accès à la bibliothèque à l'adresse http://www.soane.org/.

[25] Voir A. Parreaux, *L'architecture en Grande-Bretagne*, Armand Colin, Paris, 1969.

La *Dulwich Picture Gallery* (Fig. 31. et Fig. 32.) et le *Soane Museum* (en fait son habitation devenue un musée) font l'unanimité quant à la subtilité avec laquelle est prise en compte la lumière naturelle. La première est considérée encore à l'heure actuelle comme l'un des espaces d'exposition les plus satisfaisants qui soient ; quant au second, l'architecte Richard Meier l'évoque en ces termes :

> *« The way in which the light comes in, not simply side light or what we normally think of as top light but reflected light, mirrored light, light through layers which is so unique and rich in his work »* [26].

La description de Meier fait directement écho à celle de Soane soi-même qui exprime ainsi la vue d'une petite cour intérieure (*Monument Court*) depuis les deux fenêtres du salon du petit déjeuner :

> *« The views from this room* [le salon du petit déjeuner] *into the Monument Court and into the Museum, the mirrors in the ceiling and the looking glasses combined with the variety of outline… present a succession of those fanciful effects which constitute the poetry of architecture »* [11].

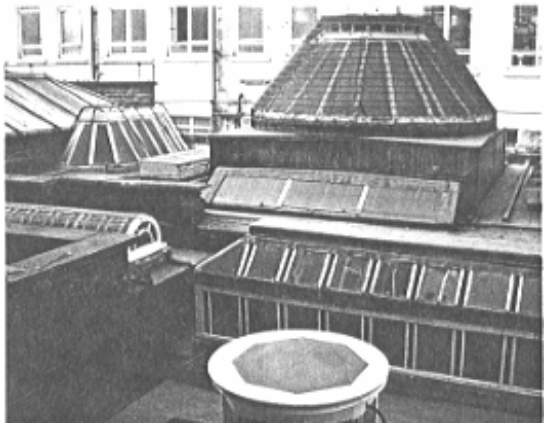


Fig. 31. A gauche une vue intérieure sur l'enfilade des salles d'exposition de la *Dulwich Picture Gallery* (1824) ; à droite une vue de la partie arrière de la toiture du *Soane Museum*, montrant la grande variété de dispositifs d'éclairage zénithal utilisés par l'architecte, et par la même leur caractère expérimental.

[26] Cité dans *Lighting in the architecture of Sir John Soane*, C. M. Parry, Lighting Res. Technol., 29(3), pp 95-104, 1997.

Sa demeure a constitué pendant plus de vingt ans un laboratoire d'expérimentations scientifiques en ce qui concerne la captation et la distribution – la « manipulation » – de la lumière naturelle à l'intérieur des locaux : nombreux types d'éclairage zénithal (forme, dimension, orientation), réflexion de la lumière diffuse par miroirs (Fig. 31.). Certaines solutions y étaient étudiées avant d'en trouver application dans ses projets.

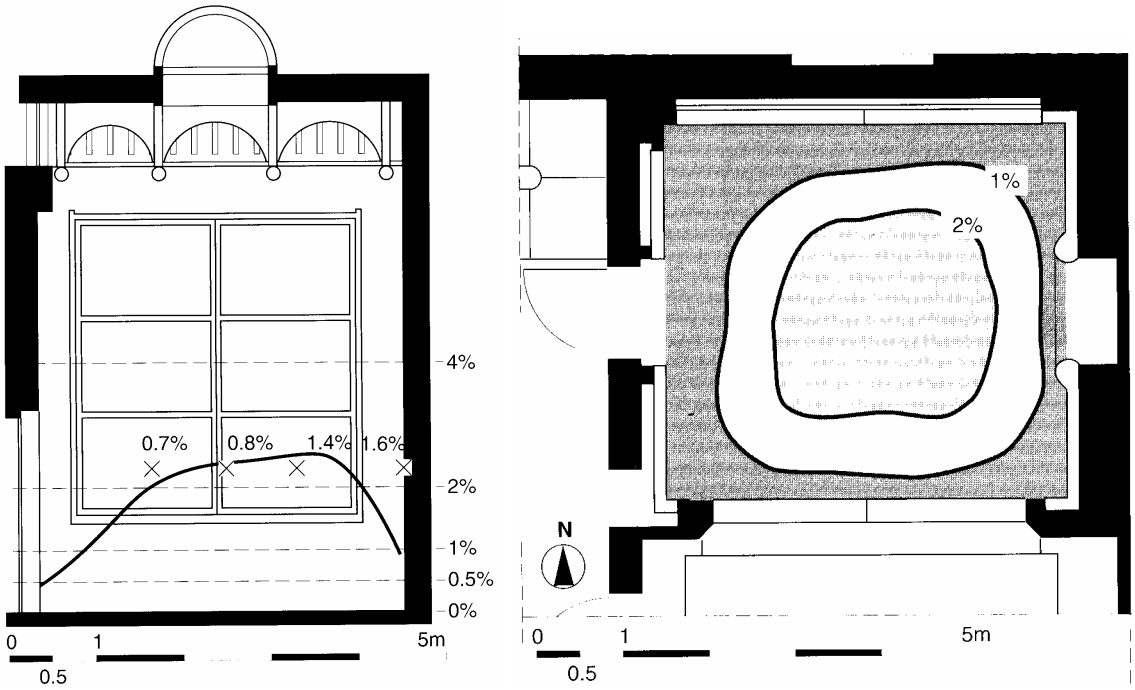


Fig. 32. Distribution du facteur de lumière du jour dans la *Picture Room*, témoignant de l'homogénéité de l'éclairage dispensé par des prises de jour aux orientations variées[27].

On trouve des préoccupations similaires – ou plus exactement des solutions attestant d'un réel souci vis à vis de l'éclairage naturel – chez Henri Labrouste qui, pour la salle de lecture de la Bibliothèque Nationale de France (Grande Salle des Imprimés), a réalisé neuf prises de jour horizontales circulaires de 4 m de diamètre, de manière à tenter d'homogénéiser les niveaux d'éclairement dans cette immense salle (à noter qu'à l'époque de sa construction – 1862-1868 –, l'éclairage au gaz était interdit dans de tels lieux). Malheureusement l'altération de la transparence du verre avec le temps, une électricité de moins en moins onéreuse, propre et sans danger, et l'augmentation des ni-

[27] Source : *Daylight Performance of Buildings*, E.N.T.P.E., Lyon, 1999.

veaux « standards » d'éclairement lumineux qui en découle ont mené, dès les années 30, à la mise en place de dispositifs d'éclairage artificiel individuels.

Un siècle après Soane, il faut sans doute se tourner vers la bibliothèque d'Aalborg (Danemark) pour trouver là l'une des réalisations emblématiques d'Alvar Aalto, sorte de manifeste à la lumière naturelle, pour laquelle l'architecte détaille d'ailleurs précisément les émotions qu'il désire y susciter :

> *« La lumière du nord-est, venant d'en haut, éclaire les salles durant la journée d'une lueur diffuse. Les rayons solaires venant du sud et de l'ouest sont utilisés par la réflexion des surfaces horizontales et verticales du plafond et des parois. L'éclairage de la grande salle d'exposition est conditionné par la position du bâtiment et par son entourage : les coteaux tapissés de hêtres forment une haute paroi naturelle dont les reflets changent au gré des saisons... ».*
>
> *On y trouve, de manière très limpide, cette symbiose totale entre bâtiment et paysage environnant chère à Aalto : « association de la lumière solaire directe et de la lumière zénithale (réfléchie sur les parois internes), venue de tous les points du ciel ou même du paysage conçu comme partie prenant de la composition... »* [28].

4.3 Conclusion

Même si la fin du 19ème et surtout le 20ème siècle ont vu des progrès importants dans la compréhension des phénomènes en rapport avec la lumière naturelle (ensoleillement et lumière diffuse), ceux réalisés parallèlement dans le domaine de l'éclairage artificiel (à la fois dans la production de l'électricité, dans sa distribution, ainsi que dans les performances des dispositifs d'éclairage), ont conduit à une réduction substantielle des coûts pour l'utilisateur ; la conséquence logique a été une tendance de plus en plus affirmée, chez les concepteurs, à négliger les apports en lumière naturelle pour s'intéresser principalement aux dispositifs artificiels, dont la grande variabilité de forme, puissance, distribution spectrale semblait pouvoir venir à bout de toute situation, et pour le plus grand confort de l'usager (l'apogée de ce phénomène se situant sans doute entre les années cinquante et soixante-dix aux États-Unis)...

Comme rapidement esquissé en introduction, ces deux dernières décennies ont connu par contre un regain d'intérêt certain vis-à-vis de la qualité environnementale :

---

[28] Cité par G. et J.-M. Alexandroff [1].

- un regard nouveau sur les aspects relevant du confort (visuel et thermique) tendant à aborder, en amont, les effets de la lumière naturelle de manière beaucoup plus précise (sur le plan de la rigueur scientifique), et à les exploiter de façon plus performante (sur le plan des dispositifs technologiques mis en œuvre) ; cette prise de conscience n'étant pas sans rapport avec certaines études qui ont montré les conséquences psychologiques et physiologiques désastreuses d'une privation de lumière naturelle sur l'usager.

- une volonté de plus en plus affirmée d'aborder sous un angle plus efficace le problème des énergies renouvelables (variable selon les pays bien sûr, les pionniers en la matière étant les pays scandinaves), qu'il s'agisse de la fort louable sagesse écologique (prise de conscience croissante du fait que la production d'énergie électrique contribue de manière non négligeable à la pollution de l'environnement), ou plus prosaïquement de raisons économiques ; la crise énergétique du milieu des années 70 a connu une forte recrudescence de maisons solaires, habitats bioclimatiques, ainsi que de nombreuses publications ou ouvrages vantant l'intérêt des pompes à chaleur, éoliennes, capteurs solaires et autres dispositifs, allant souvent même jusqu'à proposer leur auto construction... L'enthousiasme était sans nul doute quelque peu excessif devant les réalités scientifiques, techniques, économiques surtout, puisque quelque vingt cinq années plus tard, ces dispositifs restent encore « marginaux » ; il est pourtant prouvé que certains d'entre eux peuvent être économiques (à long terme toutefois), mais que l'attention ou l'entretien qu'ils nécessitent suffit souvent à rendre leur usage fastidieux ou tout simplement devient plus onéreux que l'économie qu'ils sont censés réaliser.

- enfin des avancées indiscutables dans la connaissance des phénomènes liés à l'ensoleillement et à l'éclairement, mais difficilement relayées dans la pratique en raison d'une carence d'outils d'aide à la conception – ou tout au moins de vérification – performants ; ce second point est directement lié à la très grande quantité d'informations à traiter, mais à l'heure actuelle, les techniques de simulation numérique (en fait l'automatisation des calculs) portées sur des machines dont la puissance a décuplé en quelques années sont désormais capables de prendre en compte un nombre croissant de paramètres, d'une manière de plus en plus rapide et précise.

▼ Ce dernier point est particulièrement développé dans le chapitre suivant, qui tente de dresser un panel des différentes méthodes d'évaluation de l'ensoleillement et de l'éclairement, qu'il s'agisse des simples abaques permettant de repérer les trajectoires solaires, aux méthodes sophistiquées capables d'évaluer l'éclairement lumineux en tout point d'un local.

5 Évaluation de l'énergie lumineuse dans le projet architectural et urbain : état de l'art

5.1 Introduction

Si les principes de la géométrie céleste sont connus depuis fort longtemps – tout en suscitant de nombreuses querelles quant à l'interprétation de leurs conséquences dans l'environnement urbain –, la quantification du rayonnement solaire reçu à la surface terrestre ainsi que les méthodes d'évaluation de la lumière en provenance de la voûte céleste sont extrêmement récentes (vers les années 1920 pour la première méthode couramment utilisée, d'ailleurs élaborée sans doute bien plus dans un but de règlement des litiges concernant le « droit à la lumière » en Grande Bretagne que dans le cadre de préoccupations purement scientifiques).

Dès 1942 les chercheurs Moon et Spencer ont montré la non isotropie du ciel couvert « uniforme ». Le cas du ciel couvert correspond aux conditions d'insolation les plus défavorables, celles où les éclairagistes sont amenés à effectuer les vérifications d'usage, à savoir si le niveau d'éclairement à l'intérieur du local se situe dans les normes préconisées... On peut même oser prétendre qu'en phase de conception, les questionnements les plus courants concernant la disponibilité en lumière naturelle ont pour seule origine cet aspect normatif. Or la fréquence d'occurrence du ciel couvert reste inférieure à 10 % sous nos latitudes (bien qu'elle varie notablement avec le climat). L'étude du seul ciel couvert ne permet donc pas de définir des solutions pertinentes sur le plan énergétique, tant du point de vue thermique que sous l'angle du confort lumineux. L'optimisation des ouvertures en fonction de la ressource solaire, qui est variable dans le temps et dans l'espace, est donc impossible ; aussi faut-il admettre les compromis, d'autant plus difficiles à réaliser que les variations climatiques sont importantes et que le bâtiment est de morphologie complexe. C'est précisément dans ce type de configuration que la plupart des méthodes « traditionnelles » trouvent leurs limites, et où la simulation numérique permet de dépasser les méthodes basiques qui ne prennent en considération que les aspects solaires ou, en ce qui concerne la lumière diffuse, le ciel couvert uniquement.

La recours aux simulations est également une solution intéressante dans le cadre d'une meilleure connaissance du patrimoine historique et pour une aide à la prise de décision dans les processus de réhabilitation. En effet la qualité de la lumière à l'intérieur de nombreux bâtiments aujourd'hui détruits, souvent célébrée par les historiens, reste quelque peu énigmatique, puisqu'on ne dispose en général que de très peu de mesures (le plus souvent d'aucune) de cette lumière diffuse ; restent les descriptions réalisées par les contemporains de l'édifice ou celles effectuées au travers du regard de l'historien, qui dans les deux cas ne permettent que d'en élaborer des images mentales, de toute manière très subjectives...

Les conséquences pratiques de ces déficiences sont de deux ordres : la pertinence des effets ne peut être transmise, et leurs aspects bénéfiques ne peuvent être analysés et donc appliqués à des constructions nouvelles. Aussi, lors d'une réhabilitation ou d'une reconstruction de ces bâtiments historiques, les travaux s'effectuent la plupart du temps au détriment de l'éclairage naturel, pour privilégier des systèmes artificiels permanents, qui sont à l'heure actuelle souvent plus faciles à maîtriser et de mise en œuvre relativement aisée (on trouve évidemment des problèmes similaires sur le plan de l'acoustique, la « sonorisation » permettant parfois d'éviter toute type d'interrogation quant aux qualités du bâtiment) ; on connaît les conséquences déplorables de cette attitude, qui peut mener dans le cas de la muséographie à d'éventuels problèmes de conservation des peintures, des dorures, des sculptures (sur le plan acoustique ce sont, par exemples, des phénomènes d'écho qui rendent l'orateur totalement inaudible...), et qui impose finalement une intervention correctrice.

Les aspects normatifs ou encore la maîtrise des aspects lumineux dans les bâtiments historiques qui ont été évoqués dans les paragraphes qui précèdent ne concernent que l'intérieur de locaux fermés disposant de prises de jour sur l'extérieur ; dans le cas des espaces extérieurs, le concepteur s'intéressera plutôt à la manière dont la morphologie du bâti est susceptible de venir modifier la disponibilité et la répartition de la lumière naturelle sur les façades, le sol, etc. ; ces aspects sont en général étudiés au regard du rayonnement solaire direct, beaucoup plus rarement en revanche en termes de lumière diffuse. Ainsi une rue étroite bordées de constructions élevées par exemple – la rue « canyon » chère à la micro climatologie urbaine –, et surtout les espaces dits « intermédiaires » (coursive, galerie, porche, etc.) ne sont (presque) jamais étudiés au sens de l'éclairement diffus ; c'est précisément pourtant dans les cas qui viennent d'être cités (la rue canyon notamment), que la réflexion de la lumière solaire directe sur les prospects est susceptible d'apporter une contribution très significative, voire de créer une gêne pour les occupants en vis à vis ; de même pour l'atténuation lumineuse créée par une galerie ou une coursive, qui pourra varier considérablement avec le type de ciel... Il n'est donc plus possible à l'heure actuelle de se satisfaire d'une simple évaluation du rayonnement solaire, ou de limiter l'étude du diffus à la seule prise en compte de conditions uniformes ou extrêmes ; les progrès de la technologie rendent maintenant possibles des investigations plus fines...

5.2 Des approches diverses

Bien évidemment le contrôle de la lumière naturelle n'est pas une préoccupation nouvelle ; aussi les architectes et sans doute en premier lieu les scientifiques ont élaboré de nombreuses méthodes susceptibles d'informer les acteurs des deux champs disciplinaires : l'architecte pour ce qui concerne la position, l'orientation et le dimensionnement des prises de jour, la conception de dispositifs de contrôle, les matériaux, etc., et l'ingénieur davantage pour l'analyse de ces dispositifs qui permettront de contrôler la

pénétration de la lumière naturelle dans les espaces intérieurs (réflecteurs, diffuseurs, diaphragmes, ...), ou encore pour l'amélioration des performances des produits utilisés dans la construction (augmentation du facteur de transmission des produits verriers par exemple, contrôle du facteur de réflexion des matériaux de parement, etc.).

Les diverses pratiques reflètent assez bien les préoccupations du champ auquel elles s'adressent de manière préférentielle ; leur variété les rend par conséquent plus complémentaires que mutuellement exclusives :

- l'approche documentaire, basée sur des études typologiques, qui implique l'analyse détaillée et l'évaluation de réalisations antérieures de référence au regard du phénomène ou des aspects singuliers qui font précisément l'objet de l'étude ; mais il reste alors à définir les méthodes et les critères de cette évaluation...

- l'approche expérimentale, effectuée à partir de modèles réduits ou de locaux test placés dans des conditions précisément contrôlées (à l'aide de dispositifs tels que l'héliodon ou le ciel artificiel). Les résultats peuvent être de l'ordre du simple constat (appréciation *de visu* de niveaux lumineux, lecture d'ombres portées, etc.), ou relever d'une analyse beaucoup plus fine, par exemple par l'implantation de capteurs suivis d'un dispositif de traitement (statistique et graphique) de l'information recueillie.

- l'approche de type numérique, qui met en œuvre la formalisation mathématique et physique de phénomènes complexes liés à l'interaction lumière / matière ; il est à noter que cette approche est pratiquée depuis fort longtemps de manière « manuelle », c'est-à-dire en recourant à l'utilisation de formulations analytiques, d'abaques ou de tables de valeurs, de diagrammes, etc. ; le mérite de l'ordinateur est d'être capable de stocker une grande quantité de ces données diverses et de rendre beaucoup plus aisés et rapides un certain nombre de calculs fastidieux. Ce type d'approche englobe également des méthodes spécifiquement numériques, dont la mise en œuvre nécessite toujours une très grande quantité de calculs (ou plus exactement de multiples itérations d'un même calcul), et qui, pour cause, a suivi un développement relativement parallèle à celui de la technologie des systèmes informatiques.

La première d'entre elles correspond à l'approche traditionnelle et à la pratique quotidienne de l'architecte et de la plupart des éclairagistes, et si la seconde est parfois mise en œuvre, elle ne l'est le plus souvent que sous une forme très édulcorée (une maquette simplifiée éclairée de manière approximative, que ce soit sur le plan de la géométrie ou de l'intensité...). Quant au recours à l'approche numérique, il est manifeste qu'il reste encore à l'heure actuelle largement du ressort de l'ingénieur (du bureau d'études donc), les professionnels cités ci-dessus n'en faisant que rarement usage[29] ; les raisons de cet

[29] Certains praticiens *a priori* réfractaires à « l'informatique » reconnaissent pourtant que les simulations numériques seraient susceptible d'affiner, d'infléchir, voire de modifier radicalement – mais uniquement s'il s'agit de cas très complexes bien sûr (!) – une proposition qui résulterait de l'expérience seulement.

état de fait sont sans doute nombreuses, mais on peut au moins en dégager ici deux aspects principaux :

- une mise en œuvre qui d'une part reste encore souvent longue et délicate (coûteuse donc...), en partie liée à la lourdeur de la modélisation tridimensionnelle, même si l'ergonomie des modeleurs a fortement progressé durant ces dernières années ; d'autre part, même si les architectes ont de plus en plus recours à la modélisation informatique, leur finalité est la production de documents graphiques contractuels (plans, coupes, etc.), et/ou la réalisation d'images de synthèse ; malheureusement la modélisation à caractère scientifique (dont le propos est cette fois de permettre une simulation numérique ultérieure) a des exigences spécifiques ; elle peut sans problème s'accommoder d'un niveau de détails moindre (dans le but de réduire les temps de calcul), tout en étant plus soignée à la fois (par exemple les faces planes qui composent le modèle ne doivent pas s'interpénétrer, leur normale doit être convenablement orientée, etc.), aspects qui n'affectent guère le fonctionnement des algorithmes de rendu. Le choix de la modélisation (son type, sa précision, ses contraintes, etc.) dépend donc directement (ou plutôt devrait dépendre...) de l'exploitation qui en est faite ultérieurement.

- une approche qui reste (encore) très éloignée de la culture de l'architecte, en général assez peu familiarisé avec ces domaines, conséquence évidente d'une formation qui, en France, n'a jamais manifesté un enthousiasme excessif envers les disciplines à caractère scientifique, et rien ne permet d'augurer d'un changement d'orientation à court ou moyen terme... Mais c'est peut-être à l'occasion de l'intégration de plus en plus importante de « l'informatique[30] » dans le cursus de la formation d'architecte (dans divers champs disciplinaires et à divers stades du projet d'ailleurs) qu'il pourrait devenir opportun de mettre l'accent sur son potentiel important dans le champ de la simulation à caractère scientifique, qu'il s'agisse du domaine des structures par exemple[31], ou de certains paramètres physiques susceptibles d'affecter les ambiances d'un local ou d'un environnement urbain.

Parmi les trois approches évoquées plus haut (analyses typologiques, approche expérimentale, approche numérique), on ne s'intéressera dans la suite qu'aux deux dernières d'entre elles, les aspects relatifs à la première relevant d'une toute autre problématique, et ayant par ailleurs déjà fait l'objet de travaux de recherche au sein du laboratoire CERMA[32].

---

[30] Terme générique dénué de sens, sauf peut-être pour la crainte qu'il suscite chez certains...

[31] Comportement statique d'une poutre, d'un portique, d'un treillis chargés ; ou encore comportement dynamique (modes de vibration) d'une structure soumise à un séisme...

[32] Voir par exemple Groleau D. & Marenne C., *Environmental specificities of the urban built forms, Rebuilt-Rebuilding in the European City – Integration of Renewable Energies in Established Urban Structures*, Corfou, 1995.

5.3 Aspects théoriques

5.3.1 Généralités

Les différentes méthodes d'étude et de simulation correspondant aux deux approches instrumentales précédemment définies peuvent en définitive se scinder en plusieurs groupes, assez facilement identifiables chronologiquement. Elles apparaissent en effet approximativement dans cet ordre : tout d'abord des méthodes purement graphiques, puis des méthodes que l'on peut qualifier d'analogiques (reproduction de la réalité à l'aide d'un modèle réduit, nécessitant la compréhension des phénomènes lors du changement d'échelle), et enfin les méthodes numériques ; la séparation n'est sans doute pas aussi tranchée puisque notamment nombre de méthodes dites « numériques » ne sont en définitive que des transpositions automatisées de tracés projectifs fastidieux que l'on trouve depuis longtemps sous forme d'abaques par exemple. Enfin la classification précédente reste valable à la fois pour l'ensoleillement et pour l'éclairement, même si les préoccupations relatives à l'étude de chacune de ces notions apparaissent, comme on l'a vu précédemment (chapitre 4), à des moments très différents de l'histoire.

Si les méthodes graphiques relatives à l'étude de l'ensoleillement ou de l'éclairement sont nombreuses, elles relèvent toujours, à un moment ou à un autre, du domaine de la géométrie projective – de manière exclusive dans le cas des méthodes graphiques, partiellement seulement pour les méthodes numériques – ; il s'agit en effet de projeter sur une surface choisie ou bien un point (l'extrémité du gnomon ou du style), ou une courbe de l'espace (en l'occurrence les trajectoires du soleil sur la voûte céleste tout au long de l'année), ou encore des masques de l'environnement (arêtes des bâtiments) ; la surface de projection est en général un plan, parfois un cylindre, ou encore un hémisphère. L'étude de l'ensoleillement consistera à effectuer la lecture des informations relatives au mouvement du soleil : trajectoire et position à un instant ou durant une période donnés, périodes de visibilité de sa trajectoire depuis un point donné, etc., et évidemment quantification de l'énergie reçue à la surface terrestre, fonction notamment de données climatiques ; quant à l'éclairement diffus, son domaine d'étude s'est depuis toujours (années 20) limité à l'évaluation de la disponibilité en lumière naturelle à l'intérieur des locaux ; c'est la raison pour laquelle a été définie la notion de facteur de lumière du jour, sans doute le seul paramètre universellement employé aujourd'hui qui permette de quantifier l'éclairement en un point donné à l'intérieur d'un local, rapporté à l'éclairement disponible en espace extérieur dégagé.

L'omniprésence des projections impose, dans un premier temps, un rappel des différents types utilisés ainsi que leurs particularités, et notamment la conservation ou la perte de certaines propriétés géométriques lors de la projection – les cercles, les droites restent-ils sous cette forme après transformation, interrogation qui n'est pas dénuée de conséquences si les limites du bâti, en majeure partie constituées d'arêtes rectilignes, doivent être représentées sous forme de courbes... Dans un second temps, la définition de la notion de facteur de lumière du jour permettra de mieux percevoir le domaine d'application, les techniques et les limites des différentes méthodes utilisées pour

l'évaluation de ce descripteur, dont certaines d'entre elles sont décrites dans la section suivante.

5.3.2 Les différentes projections géométriques

Cinq types de projections peuvent en théorie être utilisés : équidistante, orthographique, stéréographique, perspective (gnomonique) et cylindrique, les quatre premières permettant de dresser des plans et des élévations du ciel (Fig. 35.). Pour les élévations, il est en principe nécessaire d'utiliser une planche pour chaque orientation de la projection ; en plan par contre, l'utilisation des trajectoires solaires pour une autre latitude reste possible à condition de décaler les heures – le CSTB[33] fournit un tableau de correspondances à cet effet.

Ces projections peuvent être caractérisées comme suit :

- La projection *sphérique équidistante* présente plusieurs avantages : faciliter les repères angulaires, ne pas déformer le voisinage du zénith, et surtout être compatible avec les photographies réalisées avec un objectif de type *fish-eye* pointé verticalement. En revanche les arêtes rectilignes des bâtiments deviennent courbes.

- La projection *orthographique* est une projection cylindrique difficilement utilisable dans le domaine de l'architecture, car malheureusement elle tasse la couronne de ciel voisine de l'horizon, qui est la plus intéressante car la plus encombrée et donc la plus critique pour l'architecte ou l'urbaniste... Elle est par contre favorable aux calculs énergétiques rapides (approximatifs toutefois) dans la mesure où elle conserve les surfaces.

- La projection *stéréographique* (Fig. 33.) offre le grand avantage de représenter les trajectoires solaires selon des arcs de cercle ; c'est sans doute, avec la perspective sur un plan vertical, la projection la plus utilisée. Elle a notamment été employée pour la réalisation du *Girasol*, abaque solaire universel développé au laboratoire CERMA de l'École d'Architecture de Nantes (Fig. 47.).

[33] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

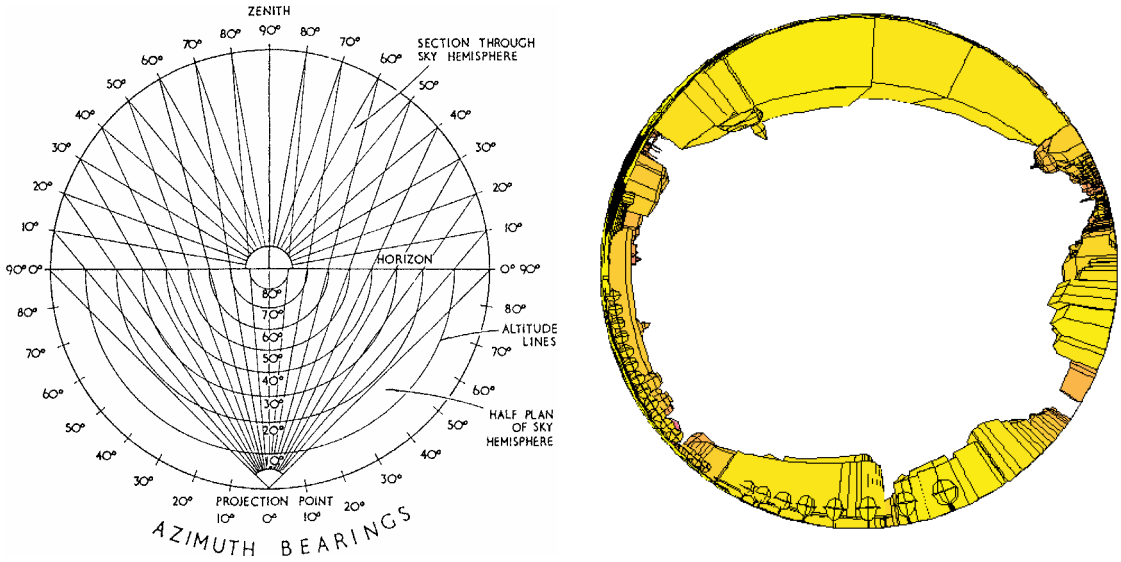


Fig. 33. Projection stéréographique : à gauche mode de construction ;
à droite vue d'un espace urbain selon ce type de projection (image LEMA, Université de Liège).

- La projection *gnomonique*[34], ou plus simplement *perspective* puisqu'il s'agit d'une projection conique dont le centre est l'extrémité du style, transforme les trajectoires solaires en hyperboles, mais les lever et coucher du soleil sont malheureusement rejetés à l'infini sur les perspectives horizontales ; cette projection présente cependant l'avantage d'offrir un aspect de l'environnement proche de la vision ordinaire, tout au moins dans la partie centrale de l'angle de vue. De plus, les perspectives transforment les grands cercles de la voûte céleste en droites ; cet aspect rend finalement la projection intéressante puisque ces grands cercles sont nombreux : lignes horaires, trajectoires solaires aux équinoxes, cercles des longitudes, et toutes les droites elles-mêmes (arêtes des bâtiments, auvents, brise-soleil), et donc les alignements... Ce type de projection, qui met en perspective la course du soleil sur un plan, est utilisée pour le tracé des cadrans solaires horizontaux et verticaux (d'où son nom).

- *Cylindrique*, utilisée pour les « panoramas solaires » ; on trouve également, éditées par le CSTB, des abaques des trajectoires solaires avec un réseau de droites horizontales de front et verticales (Fig. 34.), du type ciel « Moon et Spencer » (voir la section 6.6.2.2), qui permettent la résolution de problèmes d'apports énergétiques dans des cas très simples uniquement.

[34] La gnomonique est l'art de construire les cadrans solaires.

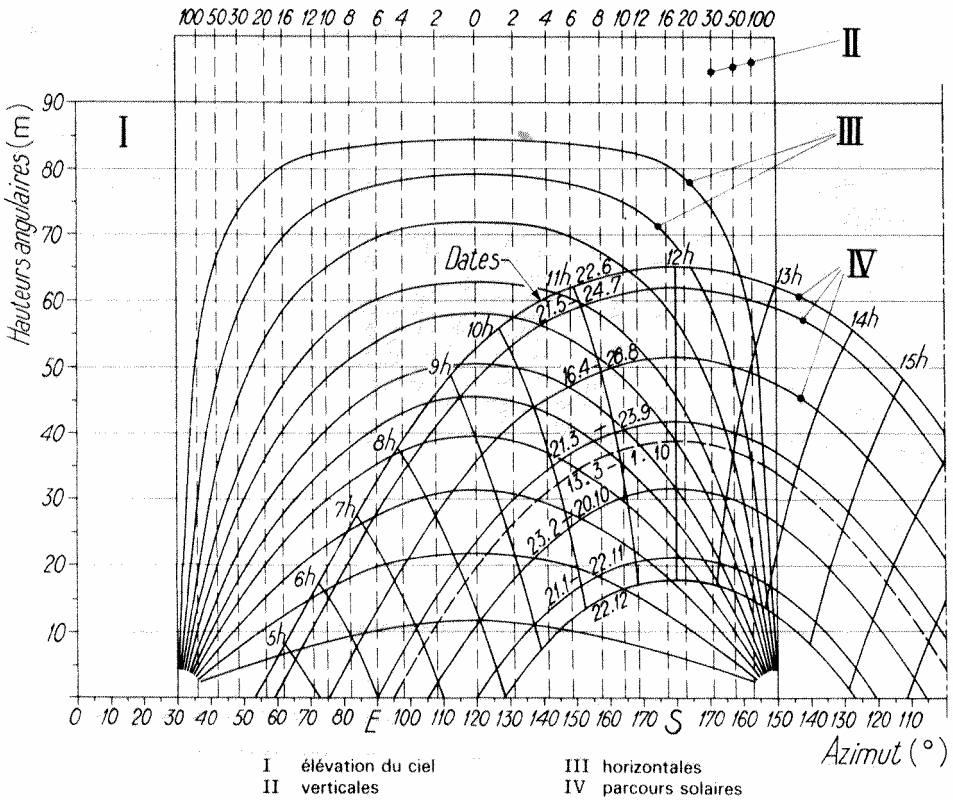


Fig. 34. Règle d'ensoleillement éditée par le CSTB.

L'ensemble des projections couramment utilisées est résumé et schématisé sur la figure ci-contre (Fig. 35.).

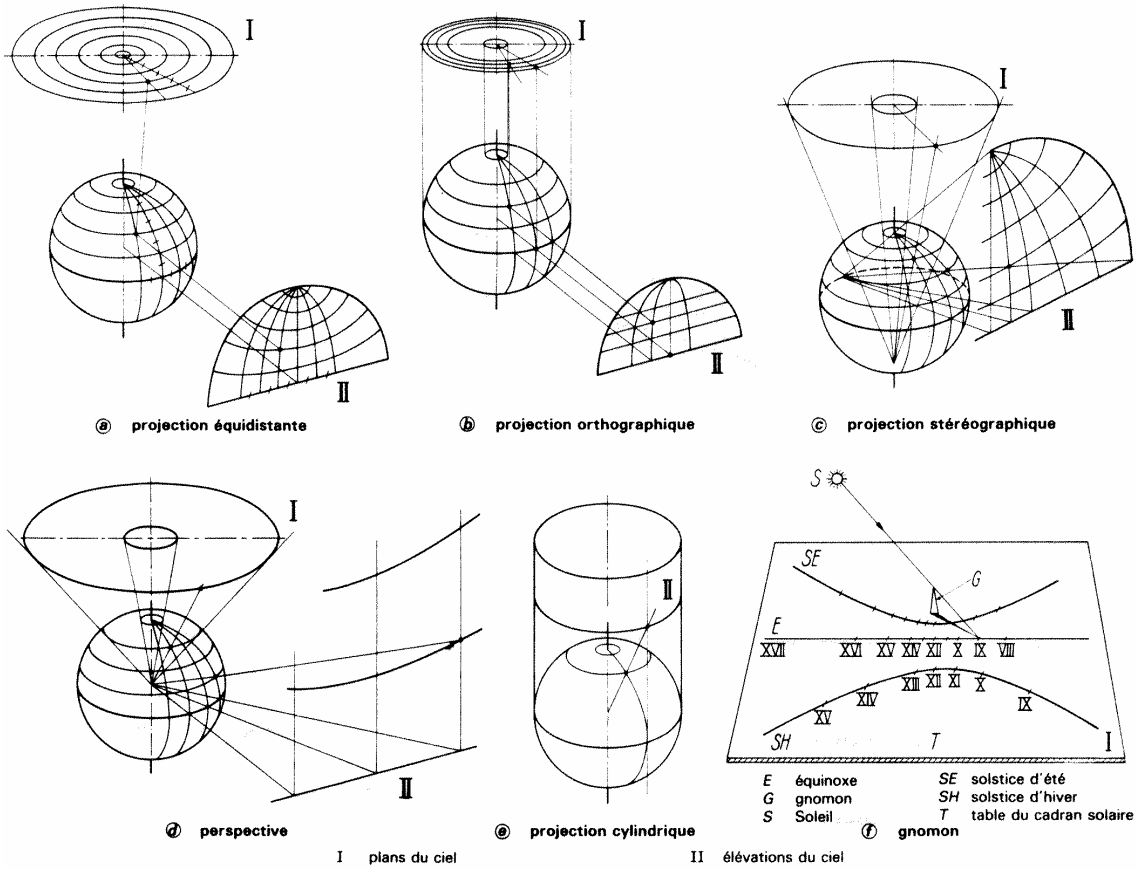


Fig. 35. Différents types de projections utilisés pour la réalisation des cartes de ciel (d'après Techniques de l'ingénieur, C 3310, p. 6).

5.3.3 Le facteur de lumière du jour

Parmi les nombreuses recherches effectuées au sujet de l'éclairage naturel et visant à la mise au point de méthodes d'évaluation et de prédiction, la notion de facteur de lumière du jour est sans aucun doute la plus connue et la plus utilisée. Ce paramètre présente l'intérêt de pouvoir être universellement employé dans la mesure où il ne fournit aucune valeur absolue, mais rapporte, sous la forme d'un pourcentage, l'éclairement à l'intérieur d'un local à celui disponible en espace extérieur dégagé. Des valeurs minima sont en général préconisées, valeurs qui dépendent évidemment de la situation géographique du local en question puisqu'à partir de conditions extérieures différentes, l'obtention d'un même niveau d'éclairement lumineux (absolu) en un point du local impose des ratios intérieur / extérieur différents (par exemple les valeurs préconisées dans les pays méditerranéens seront légèrement inférieures à celles adoptées au nord de l'Europe, en raison de niveaux lumineux extérieurs plus élevés en moyenne). Selon

l'usage du local, la valeur moyenne du facteur de lumière du jour recommandée peut varier entre 1 et 5 % environ.

5.3.3.1 Définition

Le facteur de lumière du jour est défini comme le rapport (en pourcentage) de l'éclairement lumineux en un point d'un local à l'éclairement lumineux horizontal extérieur en site dégagé, donc sans obstruction[35], et en ne considérant que les aspects diffus dus à la voûte céleste – à l'exclusion donc de la composante solaire directe dans la mesure où elle peut faire varier l'éclairement intérieur de manière considérable.

L'expression du facteur de lumière du jour *FJ* est de la forme :

$$FJ = (E_{\text{intérieur}} / E_{\text{extérieur sans obstruction}}) \cdot 100\ \%$$

Par ciel couvert ce rapport est sensiblement constant, ce qui n'est évidemment pas le cas si le soleil est apparent (selon qu'il pénètre ou non dans le local). Il ne dépend finalement que de la forme et de la qualité de surface des objets qui s'opposent à la progression de la lumière et qui la diffusent. Cette notion physique, mais abstraite, fondée sur la stabilité dans le temps du rapport entre deux mesures, se trouve validée dans l'appréciation subjective qu'ont les habitants de la clarté de leur logement au cours d'enquêtes de satisfaction effectuées par divers auteurs ; cette validité est également confirmée par l'enquête de satisfaction effectuée par le CSTB en 1977 à Nantes dans les pièces de séjour : l'appréciation de la clarté de la pièce est indépendante de la situation atmosphérique au moment de l'enquête.

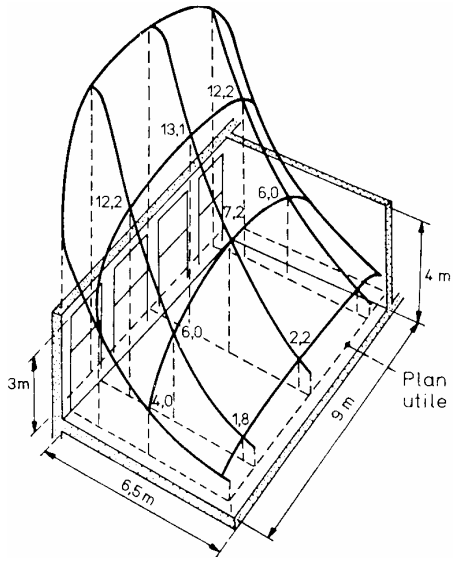


Fig. 36. Diagramme des facteurs de lumière du jour dans une salle de classe (source : Techniques de l'Ingénieur, C 3316 p. 2).

[35] Le facteur de lumière du jour intègre les vitrages, les effets dus à la poussière, etc.

Parmi les nombreuses méthodes qui permettent la détermination du facteur de lumière du jour, on peut distinguer deux approches radicalement différentes :

- des méthodes simplifiées dont le propos est d'évaluer le facteur de lumière du jour en une seule étape ; leur avantage évident est la rapidité et donc la possibilité d'utilisation dans les phases amont de la conception, au détriment d'une précision très relative dans la mesure où la valeur obtenue est une moyenne sur l'ensemble de la pièce (elles n'apportent donc aucune information quant à sa distribution, aspect pourtant essentiel dans le cas de locaux assez profonds) ;

- les méthodes qui suivent les recommandations de la CIE, à savoir une séparation du facteur de lumière du jour en trois composantes *FD*, *FRE* et *FRI* (représentées sur la Fig. 37.), le flux de lumière naturelle parvenant en un point donné d'un local correspondant à leur somme :

$$FJ = FD + FRE + FRI$$

De nombreuses méthodes permettent de calculer – indépendamment l'une de l'autre – chacune des trois composantes du facteur de lumière du jour, un grand nombre d'entre elles concernant la détermination de la composante directe (à la fois des méthodes analytiques, graphiques, numériques...) ; il s'agit là en effet du facteur prépondérant dans les cas les plus « usuels » – et donc ceux pour lesquels la méthode globale pourrait éventuellement suffire.

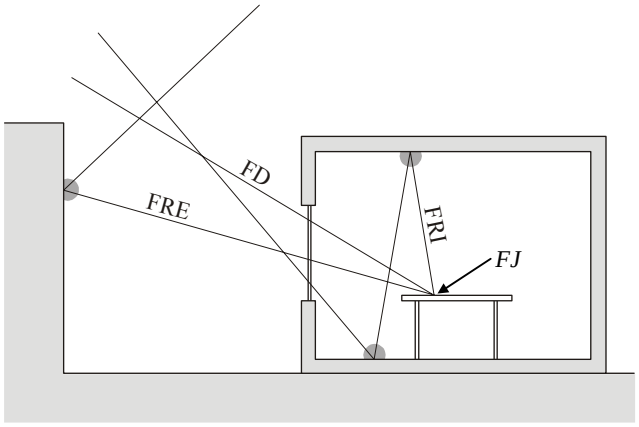


Fig. 37. Les trois composantes du facteur de lumière du jour *FJ* : la composante directe *FD*, la composante réfléchie externe *FRE* et la composante réfléchie interne *FRI*.

5.3.3.2 Méthode en trois composantes

- La composante directe* FD *(ou composante de ciel)

La composante *FD* ou composante de ciel du facteur de lumière du jour exprime la quantité de lumière qui, au point considéré, provient directement de la voûte céleste. Dans le cas où le ciel est de luminance uniforme et les ouvertures non vitrées, on nomme cette composante directe *facteur de ciel*, et il s'agit alors d'une grandeur purement géométrique qui n'est fonction que de l'angle solide sous lequel le point considéré « voit » une partie de la voûte céleste.

***- La composante réfléchie externe* FRE**

Elle traduit la quantité de lumière qui arrive en un point d'un local après avoir subi une ou plusieurs réflexions sur des surfaces extérieures au local, visibles depuis le point considéré (ces surfaces correspondent en principe aux façades en vis à vis. On exclut de cette composante la contribution de la lumière solaire directe à la luminances des surfaces réfléchissantes extérieures, c'est-à-dire que la méthode considère les conditions les plus défavorables – c'est précisément son objet d'ailleurs. Or l'étude *a minima*, si elle permet de vérifier que les niveaux d'éclairement à l'intérieur du local s'inscrivent dans les normes prescrites par la réglementation, reste très partielle et présente certains inconvénients (par exemple la réflexion des rayons solaires sur un prospect peut mener à l'inconfort – visuel et thermique – des occupants, notamment avec les parements lisses et réfléchissants couramment utilisés à l'heure actuelle).

***- La composante réfléchie interne* FRI**

Cette composante est due à la lumière qui parvient au point considéré du local après les réflexions multiples qui ont lieu à l'intérieur de celui-ci (murs, plafond, plancher, plan utile...). Elle croît vers les fenêtres puisque les parois proches des ouvertures bénéficient d'un meilleur éclairage, mais sa contribution reste en général faible devant les deux précédentes pour les ouvertures verticales ; elle est pourtant loin d'être négligeable dans les parties les plus éloignées de l'ouverture dans le cas de locaux profond (que des dispositifs particuliers permettent encore de renforcer), et devient l'unique composante du facteur de lumière du jour dans l'hypothèse d'un puits de lumière. Là encore, la contribution de la lumière solaire directe à la luminances des surfaces réfléchissantes intérieures est exclue.

L'estimation de cette composante reste complexe et souvent peu précise dans la mesure où elle dépend de nombreux facteurs ; on propose ci-dessous l'une des formulations analytiques classiques permettant d'en calculer une valeur moyenne : entrent en ligne de compte la surface de l'ouverture et celle des parois du local, leur facteur de réflexion moyen (avec séparation des parties basses et des parties hautes), et enfin les « facteurs de fenêtre » (en distinguant la lumière provenant du ciel de celle réfléchie par le sol).

$$FRI(\%) = \frac{s}{S} \cdot \frac{1}{1-\rho_m} \cdot \left(f_c \cdot \rho_b + f_s \cdot \rho_h \right)$$

où s est la surface de la fenêtre,

S la surface totale des parois du local ;

ρ_m le facteur de réflexion moyen du local (souvent choisi égal à 0,5),

ρ_b et ρ_h les facteurs de réflexion moyen des parties basses et hautes respectivement (0,3 et 0,6 le plus souvent) ;

et f_c et f_s les facteurs de fenêtre pour la lumière en provenance du ciel et du sol respectivement (0,05 en général pour f_s si l'angle d'obstruction des prospects reste inférieur à 60°).

Ces calculs fastidieux peuvent être grandement allégés par l'utilisation du nomogramme de la Fig. 38. ; il n'en demeure pas moins que compte tenu des diverses simplifications effectuées, la valeur de cette composante reste très approximative.

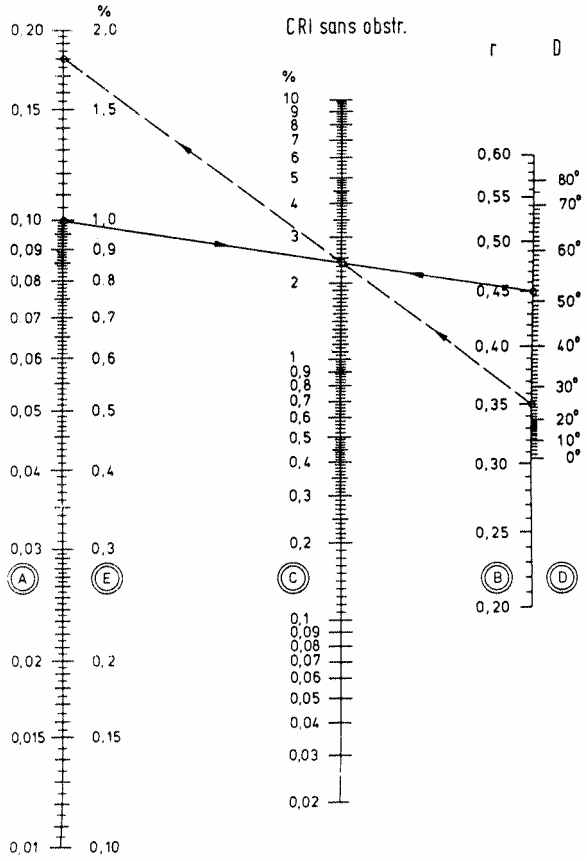


Fig. 38. Nomogramme pour la composante réfléchie interne moyenne.

Pour ce qui concerne le facteur de lumière du jour *FJ* dans sa globalité, on considère en règle générale qu'une valeur de 3 à 5 % permet de satisfaire l'éclairement recommandé (300 à 500 lux sur un plan de travail horizontal) la plus grande partie de l'année. Encore une fois ces prescriptions ne sont que des valeurs moyennes, ce qui signifie que si elles

sont satisfaites pour un ciel couvert (cas le plus défavorable, précisément celui pour lequel a été développée la notion de facteur de lumière du jour), un ciel serein et très ensoleillé risquera de conduire à l'éblouissement visuel et à une surchauffe thermique, à moins de dispositions particulières prises en ce sens.

Les trois composantes *FD*, *FRE* et *FRI* (cette dernière étant fonction des deux précédentes) dépendent du facteur de transmission lumineuse τ du vitrage, celui-ci étant lui-même fonction, pour un type de vitrage donné, de l'angle d'incidence des rayons lumineux (Fig. 39.) ; les abaques de certaines méthodes graphiques tiennent compte de l'affaiblissement dû au vitrage, d'autres l'ignorent... Quelques facteurs supplémentaires viennent encore réduire la quantité de flux pénétrant à l'intérieur du local, et notamment K_1, facteur d'ombre dû à la menuiserie ou au châssis de l'ouverture, et K_2, facteur d'empoussièrement.

Si la méthode utilisée pour le calcul des composantes de *FJ* ne tient pas compte de ces réductions, l'expression de *FJ* s'écrira en fait :

$$FJ = \left(FD + FRE + FRI\right) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \tau$$

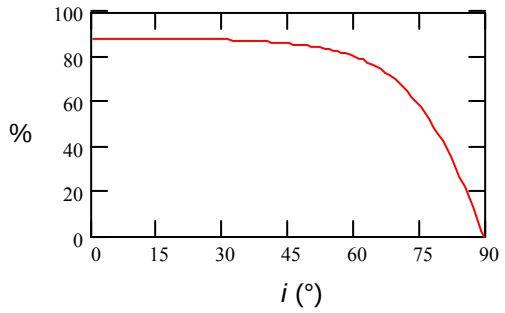


Fig. 39. Variation du facteur de transmission du vitrage en fonction de l'angle d'incidence des rayons lumineux par rapport à la normale au vitrage ; les rayons inclinés au-delà de 60° sont très affaiblis (voir la section 7.3 pour un développement plus complet à propos des facteurs de transmission).

Les schémas ci-dessous (Fig. 40. et Fig. 41.) illustrent la relation entre un dispositif particulier (débord de toiture, claire-voies, réflecteur, etc.) et la répartition du facteur de lumière du jour à l'intérieur du local, et mettent donc en évidence l'incidence du dispositif en question ; à noter qu'il ne s'agit pas ici de discuter l'intérêt éventuel de ce dispositif, mais plutôt de montrer que le paramètre dénommé facteur de lumière du jour permet d'évaluer sa pertinence au regard des besoins en lumière naturelle que nécessite l'affectation du local.

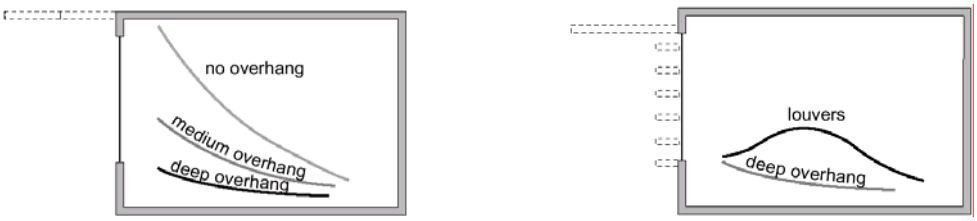


Fig. 40. Sans débord de toiture, le gradient est élevé (éclairement important près de l'ouverture, diminuant très rapidement avec la profondeur) ; le débord permet d'éviter l'éblouissement au voisinage de la fenêtre et conduit à une répartition plus homogène (à gauche). Scinder le débord autorise une répartition encore plus homogène (à droite).

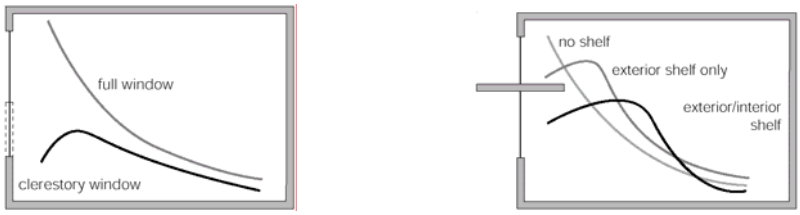


Fig. 41. Une ouverture en partie haute amène une répartition plus régulière des niveaux lumineux (à gauche). La présence d'un réflecteur horizontal (extérieur ou/et intérieur) permet également une meilleure répartition des niveaux lumineux à l'intérieur du local (à droite). Mais si le gradient du facteur de lumière du jour est moins accusé dans les deux cas, l'intérêt de tels dispositifs est pourtant à relativiser : le premier interdit toute vision de l'environnement extérieur, le second pose plutôt des problèmes de réalisation et d'entretien (source *Tips for Daylighting with windows*, J. O'Connor, LBNL).

5.4 Méthodes et instrumentation

5.4.1 Techniques graphiques

La plus ancienne des méthodes graphiques semblant se préoccuper de l'ensoleillement dans le domaine de l'architecture et de sa représentation – uniquement quant à son « effet » sur la perception d'une construction – est sans nul doute le tracé des ombres ; mais en fait la codification rigoriste de l'école des Beaux-Arts a immédiatement réduit leur fonction à un simple aspect « conventionnel », puisque les rayons solaires devaient être orientés à 45° sur le géométral (en plan et en élévation, ce qui correspond à une altitude solaire d'environ 35° et à un azimut… fonction de l'orientation du bâtiment !) (Fig. 42.) ; la raison en était purement d'ordre « esthétique », ou plus exactement, elle avait pour principal objectif la représentation des éléments perpendiculaires au plan de projection en vraie grandeur (modénature des façades, débords, renfoncements, etc.) ; il s'agit donc bien plus d'un artifice de représentation permettant d'informer la troisième dimension sans changement d'échelle (elle est identique à celle de la façade et correspond à une sorte de vue de 3/4) que la marque d'une véritable préoccupation devant l'impact

des rayons solaires sur le bâtiment. On peut même se demander, comme G. et J.-M. Alexandroff[36], si l'existence de certains éléments de la modénature n'est pas directement liée aux jeux d'ombres qu'ils vont créer, et, pour aller plus loin encore, non pas sur le bâtiment réel mais essentiellement sur sa représentation en géométral...

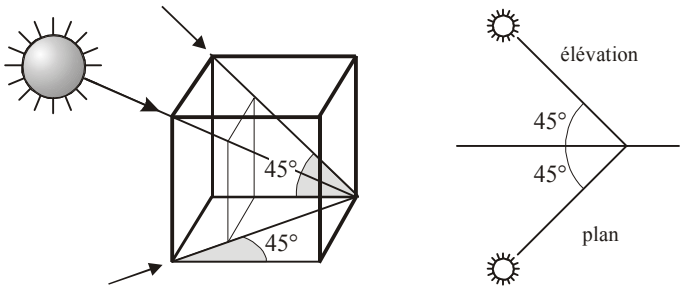


Fig. 42. Orientation « conventionnelle » des ombres, où les rayons solaires sont dirigés selon la diagonale d'un cube, leur projection horizontale et verticale correspondant aux diagonales des faces de ce cube (donc inclinées à 45° par rapport à la ligne de terre).

5.4.1.1 Étude de l'ensoleillement

Parmi les très nombreuses méthodes graphiques utilisées pour l'étude de l'ensoleillement, on ne peut passer sous silence certains graphismes qui relèvent davantage du symbolique que d'une véritable réalité scientifique, sans toutefois être en contresens avec cette dernière ; on peut citer par exemple les célèbres croquis de Le Corbusier ou de Alvar Aalto représentant les trajectoires solaires, ou encore ceux d'architectes moins connus sans doute mais semblant se préoccuper tout autant des effets dus au soleil (Fig. 44.) ; tous ces croquis affichent plus une préoccupation, une intention, ou bien représentent des principes, ou encore des niveaux de performances (vérifiées ou attendues ?) plutôt qu'une prise en compte réellement fine et objective des phénomènes ; ils n'empêchent cependant pas des analyses plus poussées – que l'architecte a peut-être menées d'ailleurs – ; au demeurant les remarques précédentes n'enlèvent en rien à l'intérêt de telles représentations, leur caractère « iconique » suffisant soit à l'identification immédiate de leur auteur, soit à afficher d'emblée, de la part du concepteur, une préoccupation certaine vis-à-vis des phénomènes d'ensoleillement, thermiques, etc. – même si, encore une fois, les effets mis en évidence sur les croquis de principe peuvent en définitive se trouver fort éloignés des réalités physiques...

[36] « Les règles de tracé des ombres, basées sur un soleil fixé théoriquement à gauche et selon une inclinaison de 45°, c'est-à-dire selon le seul angle non déformant, sont inséparables des règles de la modénature ; c'est dire que la rythmique toute entière des façades est élaborée en fonction du soleil, qui la décrira dans sa course et révèlera une fois chaque jour la perfection de son dessin » [1].

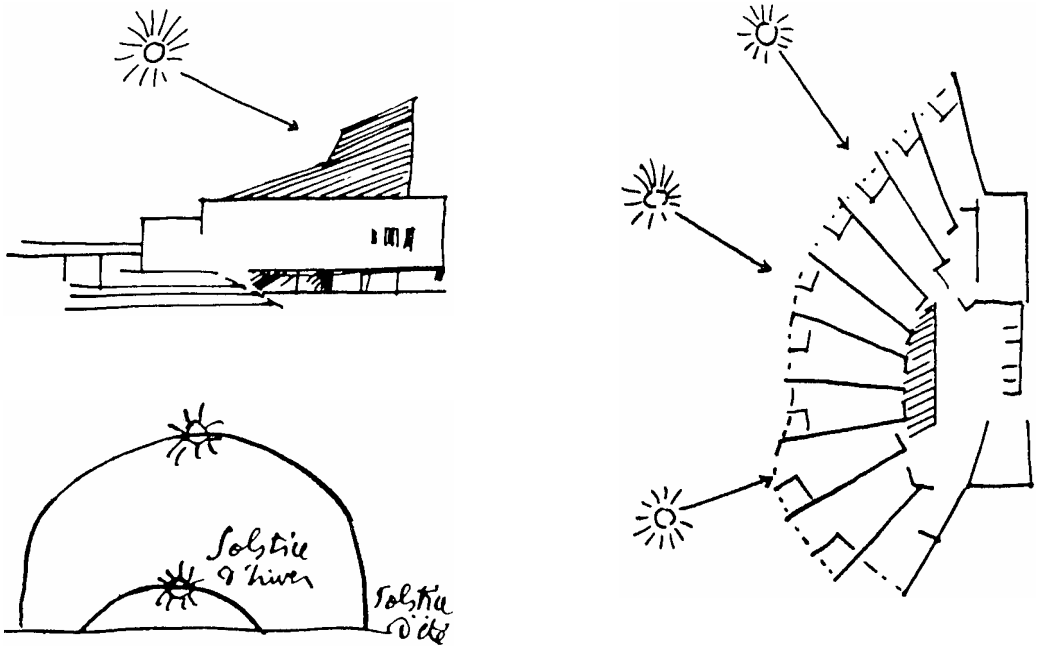
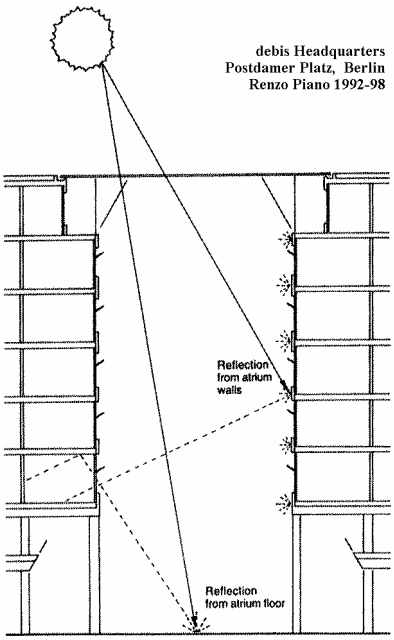
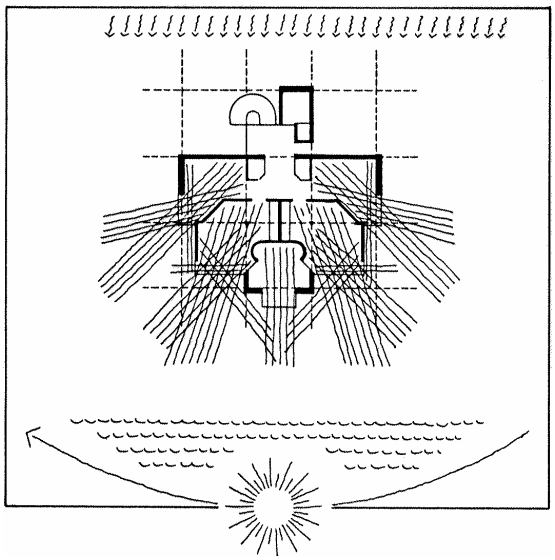


Fig. 43. Icônes d'une simulation solaire… à effectuer…
Croquis et dessins de Alvar Aalto, Le Corbusier.





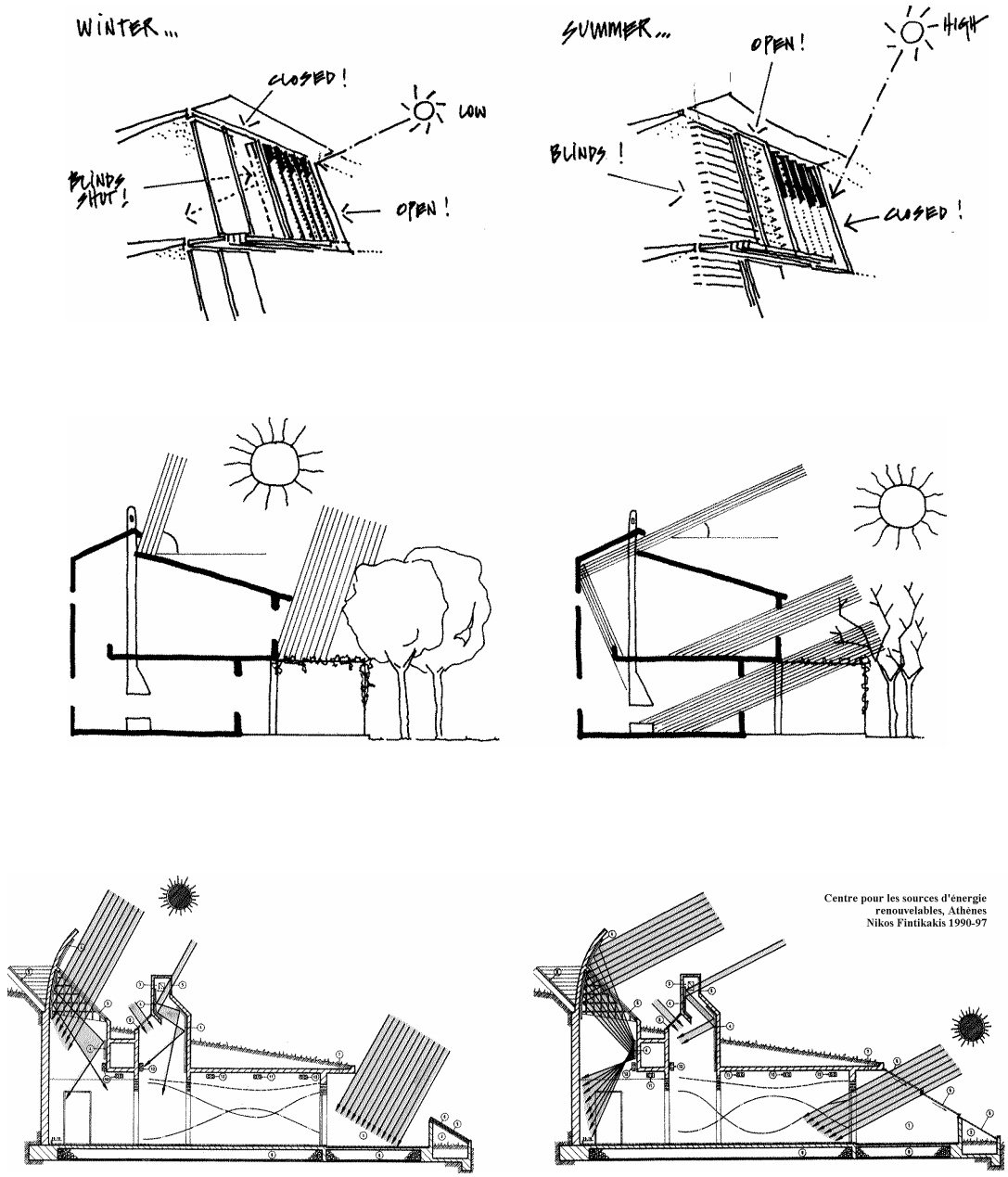


Fig. 44. De gauche à droite et de haut en bas : croquis et coupes de principe de R. Piano, P. von Meiss, N. Fintikakis...
On y relève le souci évident de contrôler la pénétration des rayons solaires à l'intérieur des locaux ; on objectera par contre une (unique) représentation en coupe pour la plupart, et les rayons solaires tracés pour les hauteurs extrêmes uniquement (solstices), situations dans lesquelles les dispositifs proposés semblent apporter satisfaction.
Mais qu'en est-il de la multitude des autres positions que prend le soleil au cours de l'année : le dispositif continue-t-il à assurer sa tâche – avec une efficacité moindre peut-être –, ou bien son fonctionnement se trouve-t-il alors totalement mis en défaut ?

Fig. 45. *Grand Central Terminal*, gare de New York située au cœur de Manhattan, réalisée entre 1903 et 1913. Dessin montrant le côté est de l'*Express Concourse* (grand hall) ; proposition effectuée par le cabinet Beyer - Binder - Belle pour le plan directeur de modification (1990) ; ce dessin pourtant très récent – mais manifestement réalisé dans le « style » d'une photographie de 1913 –, insiste délibérément sur la lumière venant inonder le hall dans sa partie médiane ; compte tenu de la directivité et du contraste très marqué du rayonnement, cette lumière ne peut être que d'origine *solaire* (et non pas diffuse) ; or l'inclinaison du rayonnement (venu de l'*est*) approche les 60°, alors que la latitude de New York est de 41°, ce qui rend la configuration hautement improbable... À rapprocher des peintures de Gandy relatives aux travaux de Soane (voir 4.2).

Affichant sans nul doute une rigueur plus « scientifique », les formules de la géométrie céleste permettent de dresser des tables et des abaques de correspondances entre hauteur et azimut du solaire pour n'importe quelle latitude ; leur fonction est double : permettre une lecture aisée et suffisamment précise des coordonnées solaires pour une date et un instant donnés, mais aussi et surtout construire, à partir de ces coordonnées[37], les ombres propres et portées *exactes* à cet instant, de même que déterminer les périodes d'ensoleillement.

Trois types de documents graphiques ont été édités : les abaques solaires universels, les diagrammes solaires et les gnomons ; les deux premiers utilisent une carte du ciel (c'est-

[37] La plupart du temps, leur lecture n'est même pas nécessaire : en plan, la direction des ombres est parallèle à celle de l'azimut solaire, en élévation il suffit de procéder par rabattement dans le plan *ad hoc* (en définitive les techniques élémentaires de la géométrie descriptive).

à-dire un réseau de courbes d'égale hauteur et d'égal azimut), le troisième une perspective plane.

Les abaques solaires universels doivent permettre de passer d'une latitude à une autre par une construction géométrique simple.

- Le *Solar Altitude* par exemple met en œuvre la rotation d'un disque transparent portant les parcours, gradués en heures, du soleil pour diverses dates, le disque fixe portant la carte du ciel (Fig. 46.) ; il utilise une projection équidistante.

- Le *Girasol*, abaque solaire universel développée au CERMA, est un outil du même type, mais qui utilise cette fois une projection stéréographique (les trajectoires solaires sont des arcs de cercle) (Fig. 47.).

  Ces abaques permettent, à partir des hauteurs et azimuts ainsi repérés, d'effectuer les tracés d'ombre sur les plans et élévations, mais ils ne permettent aucune étude directe d'insolation, d'éclairement et d'irradiation. La précision de ces appareils est directement liée à la qualité de leur fabrication (notamment finesse et exactitude des traits lors de l'impression, indéformabilité du support, etc.) ; elle est de l'ordre de 2 degrés[38].

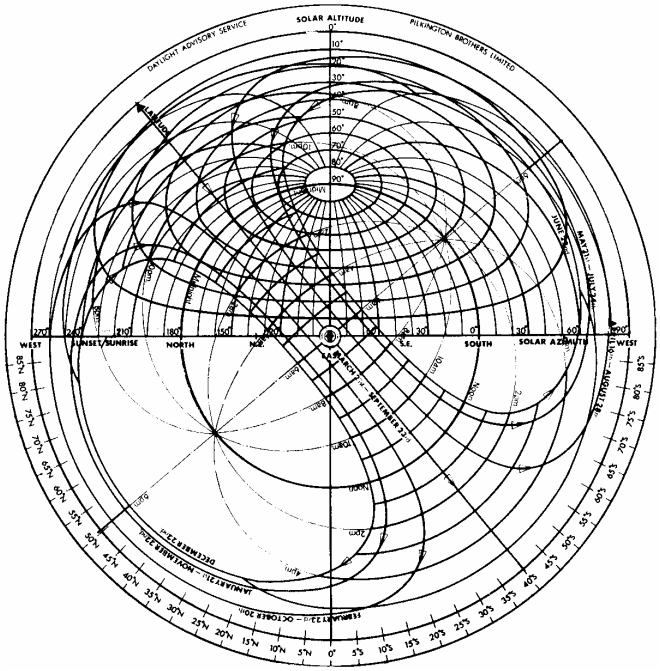


Fig. 46. *Solar altitude*.

[38] Il ne s'agit que d'une estimation moyenne, la précision variant sensiblement avec la zone du diagramme où la lecture est effectuée (quelque soit le type d'abaque utilisé d'ailleurs).

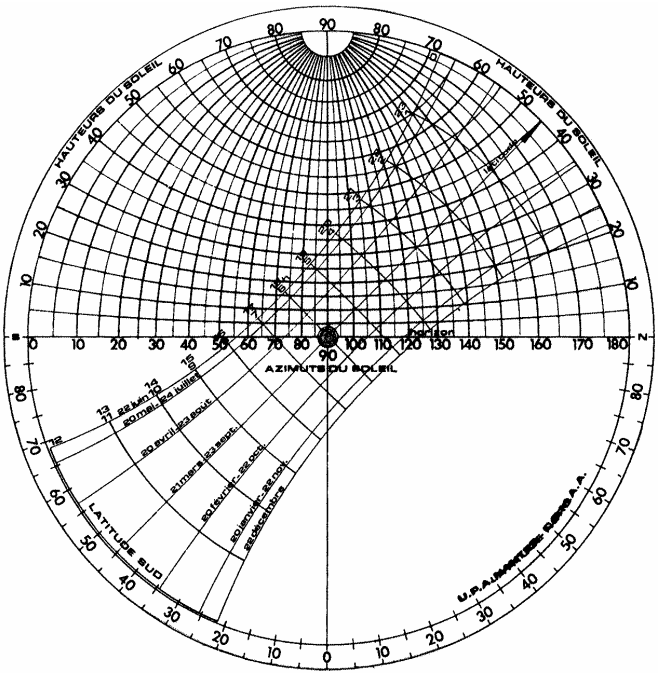


Fig. 47. Le Girasol ; la projection stéréographique des trajectoires solaires est imprimée sur un disque transparent qui se superpose à celle des parallèles et des méridiens de la sphère céleste.

- Les diagrammes solaires sont spécifiques d'une latitude et permettent, si nécessaire, de déterminer la hauteur et l'azimut solaire en fonction de la date et l'heure, mais surtout de réaliser directement les tracés d'ombre ou encore de porter les masques d'horizon repérés par leur hauteur et azimut afin d'en déduire pour chaque jour les périodes où les obstacles représentés vont masquer la trajectoire solaire. On trouve finalement autant de diagrammes solaires que de types de projections, mais leur manipulation est dorénavant rendue plus aisée dans leurs versions pour ordinateur de bureau.

- Le panorama solaire consiste en une projection cylindrique des trajectoires solaires ; par simples reports angulaires depuis le point d'observation, il est possible d'y superposer le site à étudier, permettant ainsi la détermination des périodes d'ensoleillement du point considéré. Mais la tâche n'est pas toujours aisée car si les arêtes verticales des bâtiments restent verticales dans cette projection, toutes les autres sont transformées en courbes (Fig. 48.)… Un autre défaut majeur de ce type de diagramme est sa quasi illisibilité près des tropiques ; pour ces latitudes, il est préférable de transposer les coordonnés cartésiennes du panorama cylindrique en coordonnées polaires.

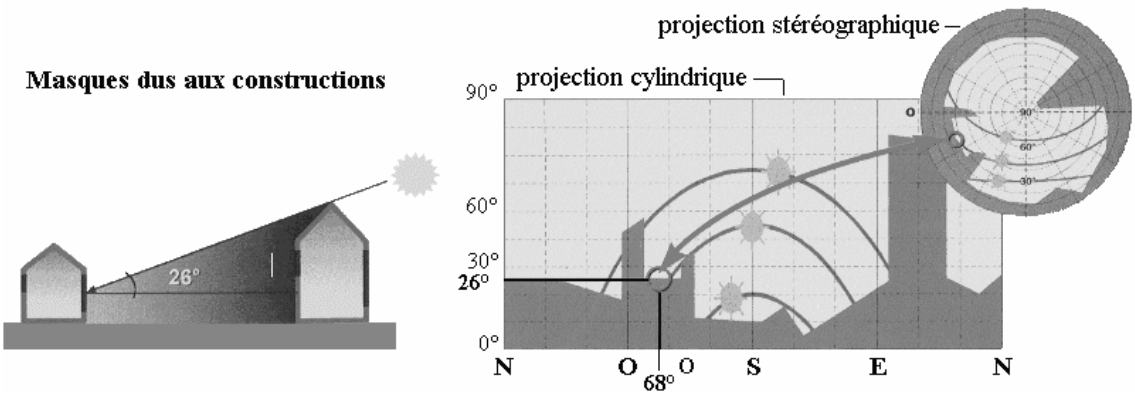


Fig. 48. À gauche panorama solaire et profil des masques urbains depuis le point d'observation ; À droite, le même panorama solaire en coordonnées polaires (d'après Guide de l'architecture bioclimatique).

- Sur le diagramme stéréographique, les méridiens de la sphères céleste se projettent sous forme de droites rayonnantes tandis que les parallèles deviennent des cercles concentriques ; quant aux trajectoires solaires, elles sont représentées également par des cercles dont le rayon et la position du centre (sur l'axe nord-sud) sont faciles à préciser à partir de la latitude du lieu, de la date, et du rayon du diagramme. Là encore la projection transforme les arêtes horizontales des bâtiments en courbes (Fig. 49. et Fig. 50.).

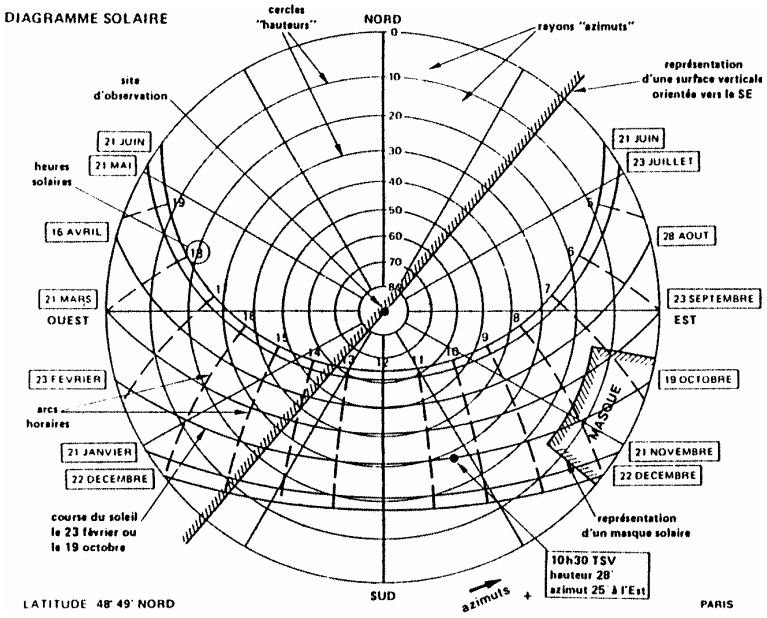


Fig. 49. Diagramme solaire pour Paris (latitude 49° nord environ).

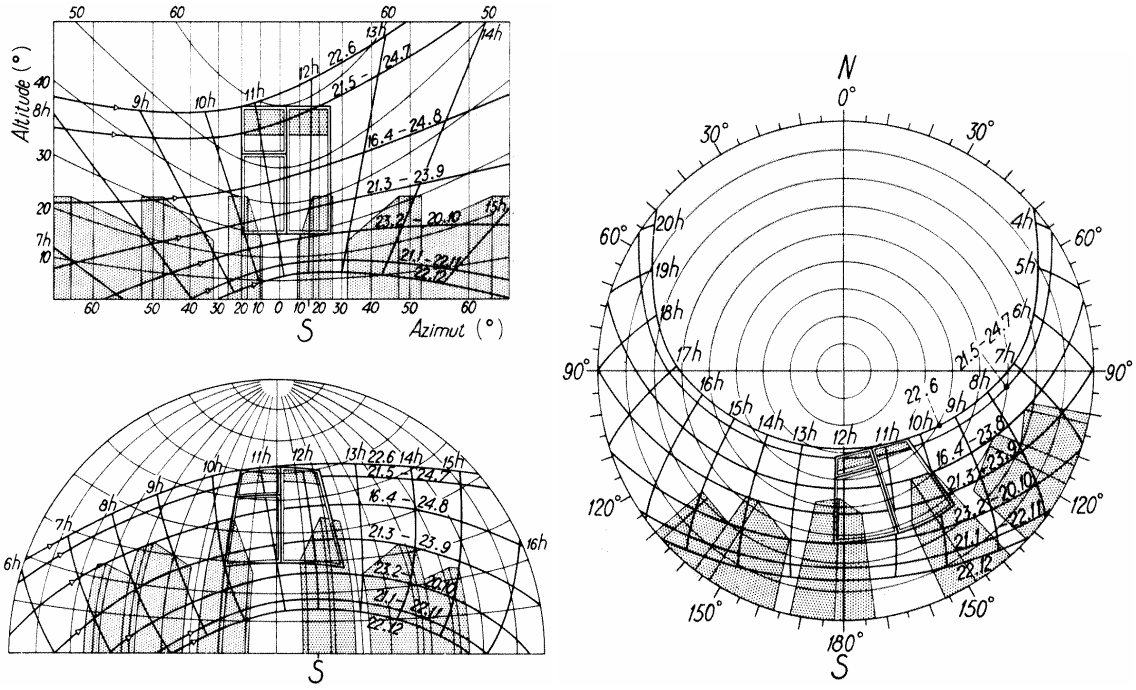


Fig. 50. Comparaison de trois projections d'une fenêtre et du ciel, vus du centre de la pièce par 52° nord correspondant à la latitude d'Utrecht (Hollande) par exemple, regard dirigé à 15° vers le sud-est :
1) perspective verticale ; 2) élévation du ciel en projection équidistante ;
3) plan du ciel en projection équidistante (d'après Techniques de l'ingénieur, C 3310, p 9).

- Le diagramme gnomonique figure le lieu de la projection conique sur un plan horizontal des trajectoires solaires, projection centrée sur l'extrémité du style (gnomon). Il est établi pour une latitude et pour une hauteur de gnomon données. C'est sans doute l'un des plus simples à utiliser pour le tracé des ombres, mais il permet, en raison des propriétés déjà citées de cette projection (lignes horaires et arêtes des bâtiments représentées sous forme de droites), de traiter facilement en représentation géométrale les problèmes de masques : par exemple le dimensionnement d'un pare-soleil satisfaisant à certaines conditions, la détermination des taches de lumière à l'intérieur d'un édifice pour une date donnée, ou encore les périodes d'ensoleillement d'un point quelconque (Fig. 55.). Les autres diagrammes permettent également de traiter ces types de problème, mais de manière beaucoup plus complexe dans la mesure où nombre d'arêtes rectilignes des bâtiments sont, par projection, transformées en courbes… À noter enfin que les constructions peuvent être extrêmement précises pour peu que l'on dispose d'un tracé gnomonique à une échelle suffisante (celle-ci est directement liée à la hauteur du style).

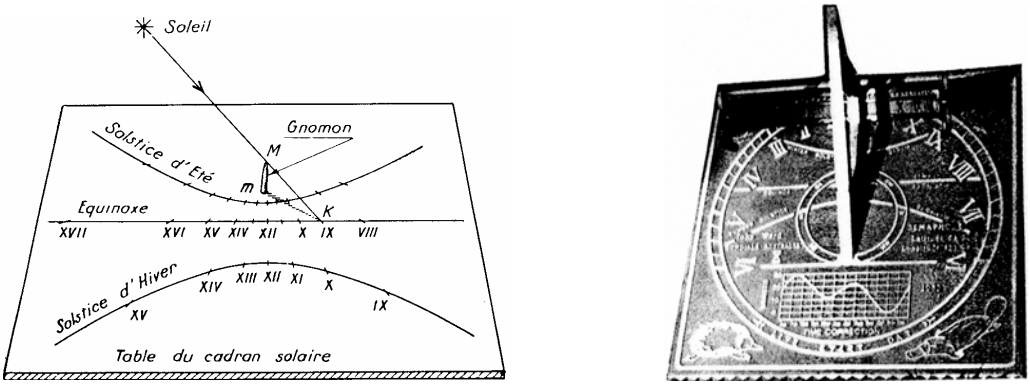


Fig. 51. Principe du gnomon ; application au cadran solaire.

La gnomonique a produit des dispositifs extrêmement variés permettant de repérer l'heure solaire (aussi bien dans leur orientation et leur principe, leur esthétique et leur matériau, leur taille...) ; les cadrans solaires sont connus depuis l'antiquité par les babyloniens, les égyptiens, les grecs..., et Vitruve en détaille plusieurs types dans ses écrits. Plus près de nous dans l'histoire on peut citer, parmi les plus remarquables, ceux des observatoires astronomiques indiens (*Jantar Mantar*), et notamment le grand cadran équatorial de l'ensemble de Jaipur[39] (Fig. 52.).

[39] Cet ensemble a été terminé en 1728 par le maharaja Jai Singh II. Le gnomon du grand cadran (*brihat samrat yantra*) est l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont la base mesure 44 m et la hauteur 27 m (son inclinaison sur l'horizontale correspond à la latitude du lieu, soit près de 27°) ; l'ombre portée parcourt environ 4 m par heure sur deux quadrants gradués d'une quinzaine de mètres de rayon.

Fig. 52. Trois éléments du *Jantar Mantar* de Jaipur : a) A l'arrière plan le « petit » cadran, au gnomon Incliné de 27° sur l'horizontale (latitude de Jaipur) ; b) à l'arrière plan également, un cadran solaire équatorial circulaire (la lecture s'effectue sur deux faces parallèles, la face nord étant utilisable entre le 21 mars et le 21 sept., la face sud les six autres mois ; la lecture est donc rendue difficile aux périodes d'équinoxes ; c) au premier plan, l'impressionnant *Jai Prakash Yantra*, composé de deux hémisphères inversés complémentaires (un seul est photographié ici), qui permet la lecture de la position solaire grâce à l'ombre portée d'un anneau fixe situé au centre de l'hémisphère ; le repérage nocturne est également possible pour un observateur situé sous les « lés » de marbre et visant les astres au travers de l'anneau.

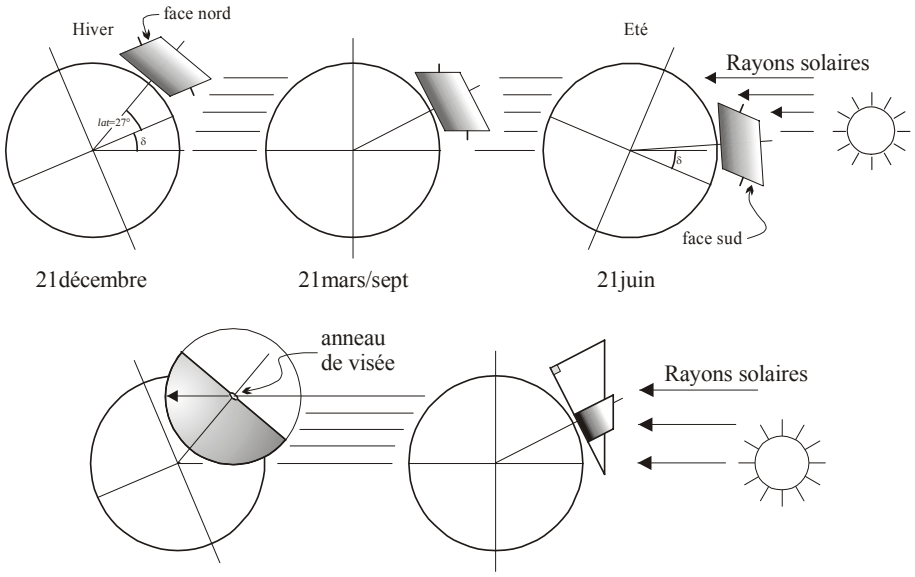
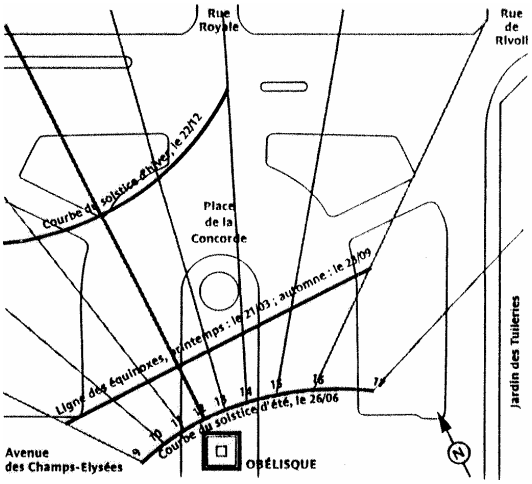


Fig. 53. Schématisation de la position relative du soleil et des dispositifs astronomiques de la Fig. 52. En haut et de gauche à droite, la cadran solaire équatorial au solstice d'hiver, aux équinoxes et au solstice d'été ; en bas, le *Jai Prakash Yantra* et le petit cadran, au solstice d'hiver et aux équinoxes respectivement.

On trouve également de nombreux cadrans solaires de construction plus récente un peu partout dans le monde (Reims – Fig. 54., Chicago, Toronto, Sydney, etc.), l'un des derniers en date semblant être la réalisation tardive, en juin 1999, d'un projet datant de 1913 : Camille Flammarion[40] avait proposé l'utilisation de l'obélisque de la place de la Concorde à Paris comme style d'un immense cadran solaire, mais le projet était tombé aux oubliettes à la déclaration de guerre. Apparemment les marquages au sol devraient subsister jusqu'à la fin de l'an 2000…



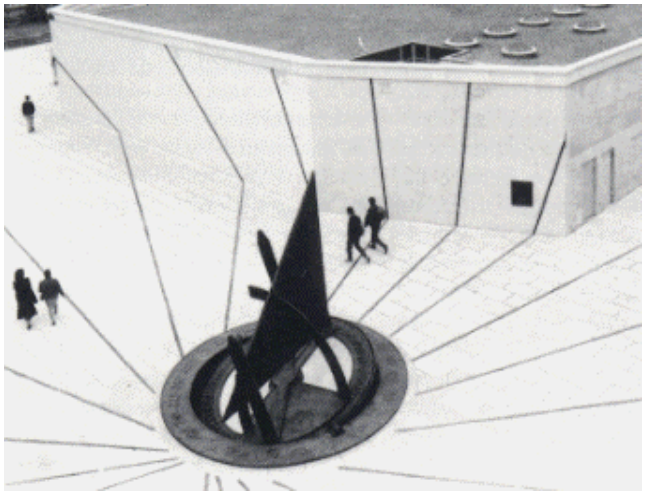


Fig. 54. « La Pierre d'heures », œuvre de Jean-Marie Lecomte, ville de Reims.

[40] Camille Flammarion (1842-1925), astronome français, fondateur de la Société Astronomique de France (SAF).

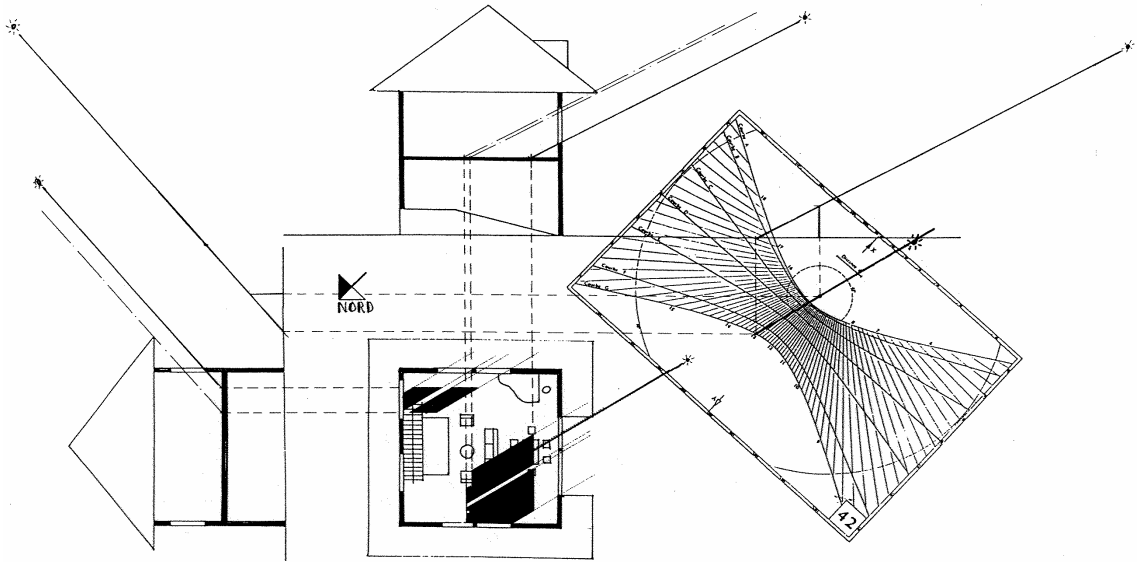


Fig. 55. Utilisation du diagramme gnomonique pour la détermination des périodes d'ensoleillement d'un point *P* à l'intérieur d'un édifice (maison Tucker de Robert Venturi) ; tracés réalisés par un étudiant de seconde année de l'École d'Architecture de Nantes.

5.4.1.2 Étude de l'éclairement

Même si les méthodes graphiques concernent avant tout l'étude de l'ensoleillement, certaines d'entre elles permettent également l'étude de l'éclairement lumineux ; les premières datent de l'entre-deux-guerres, période à laquelle la taille des constructions – et donc la profondeur des pièces – commence à augmenter ; les raisons sont essentiellement liés aux progrès des technologies : amélioration des techniques de construction, de la qualité des matériaux (béton armé, acier), de la distribution des personnes et des fluides (ascenseurs, ventilation mécanique, etc.) ; mais le coût de l'électricité reste encore très élevé et l'efficacité lumineuse des filaments (le « rendement » de la lampe) faible[41] ; aussi la lumière naturelle est-elle la source principale d'éclairage diurne, d'où une incitation très forte au développement de méthodes et d'outils susceptibles d'évaluer et de contrôler sa pénétration à l'intérieur des bâtiments. En effet ceux-ci ont conservé jusqu'alors des plans peu profonds et comportent de nombreux puits de lumière.

L'objet des différentes méthodes présentées ci-dessous est de déterminer le niveau d'éclairement produit par la lumière du jour à l'intérieur d'un local, à différents moments de la journée ; cet éclairement peut être obtenu en un point particulier du local –

[41] On évalue que, à niveau d'éclairement égal, le coût de l'éclairage électrique à cette époque (années 30) était 25 fois plus élevé que celui d'aujourd'hui (d'après *Daylighting in architecture* [93]).

par exemple à l'endroit le plus défavorisé –, ou n'être qu'une valeur moyenne sur l'ensemble de sa surface.

L'une des méthodes les plus anciennes – et toujours utilisée de nos jours – a été mise au point par P. J. et J. M. Waldram en Angleterre dans les années 1920. Il n'est d'ailleurs guère étonnant que la méthode soit née en Grande-Bretagne dans la mesure où la réglementation donne obligation au constructeur vis-à-vis de tiers, en fixant la durée minimum légale d'insolation, mais sans préciser à qui elle s'adresse. De ce fait tout constructeur se doit de vérifier qu'il ne nuit pas à la possibilité légale d'insolation des constructions voisines ; par contre la loi française ne garantit nullement la pérennité de l'ensoleillement, même minimal. Aucun recours n'est possible dans le cas où la construction d'un nouvel édifice viendrait annuler toute potentialité d'ensoleillement vis-à-vis des constructions antérieures.

Mais ces préoccupations vis-à-vis du voisinage immédiat sont bien plus anciennes puisque Vitruve (1er siècle avant J.-C.) y fait déjà référence dans le célèbre *De architectura* (livre VI) :

> *(…) Mais en ville la hauteur des murs mitoyens comme l'étroitesse de l'espace empêchent la lumière et sont cause d'obscurité. C'est pourquoi il faudra faire l'expérience suivante. Du côté où il faut prendre la lumière, on tendra un fil du sommet du mur qui paraît gêner jusqu'au point où il faut faire pénétrer la lumière, et si en suivant du regard ce fil vers le haut, on voit l'étendue du ciel pur, c'est qu'il n'y aura pas en ce point d'obstruction faite à l'arrivée de la lumière...*
>
> *(…) Les édifices seront convenablement disposés s'il a été tenu compte avant tout des orientations et des inclinaisons du ciel où on veut les bâtir ; car ils doivent être autrement construits en Égypte qu'en Espagne, autrement encore du Pont qu'à Rome... L'aspect du ciel étant différemment tourné à l'égard des divers lieux, à cause du rapport qu'ils ont avec le zodiaque et avec le cours du soleil, il faut disposer les bâtiments en raison de la diversité des pays et des climats...*

Elles constituent également le thème principal du (petit) traité de Julien d'Ascalon[42] – sans doute *l'autre* traité d'architecture de l'Antiquité, même s'il est nettement postérieur et géographiquement éloigné du *De architectura*. Dans la seconde section de cet ouvrage, consacrée à l'air (d'Ascalon adopte en effet la théorie aristotélicienne des quatre

[42] Julien d'Ascalon rédige dans la première moitié du VIè siècle après J.-C. un traité d'architecture et d'urbanisme d'une trentaine de pages intitulé « *Extrait des lois et coutumes en usage en Palestine, de Julien d'Ascalon, architecte* », sorte d'exemple de mise en application des prescription de Vitruve en ce qui concerne la formation d'architecte ; le thème central de son texte concerne les rapports de voisinage, ce qui en fait sans doute plus un traité « réglementaire » (au sens du droit) qu'un traité d'architecture pure (voir C. Saliou, *Les lois des bâtiments : voisinage et habitat urbain dans l'empire romain*, Institut français d'archéologie de Beyrouth, 1994).

éléments reprise par Vitruve – le feu, l'air, l'eau et la terre[43]), il codifie, beaucoup plus précisément que Vitruve, les recommandations faites au bâtisseur d'un nouvel édifice :

> *Si le mur existant comporte des fenêtres-archères, les pièces ne disposant d'aucune autre source de lumière et les fenêtres étant là depuis dix ans, alors celui qui veut faire une nouvelle construction doit l'éloigner de celle dont on vient de parler de trois coudées un tiers*[44] *(…).*

Même s'il est sans doute l'un des plus connus, le diagramme de Waldram est loin d'être la seule méthode graphique utilisée pour l'évaluation du facteur de lumière du jour, ou de certaines de ses composantes tout au moins. Parmi les autres méthodes graphiques couramment utilisées, on peut citer en premier lieu la méthode CIE (réservée à une évaluation rapide au stade de l'avant-projet), les abaques de Moon et Spencer, les abaques du CSTB, les diagrammes de points, etc. ; on peut même y inclure certaines méthodes analytiques, qu'il n'est pas absurde de classer parmi les méthodes graphiques dans la mesure où les fonctions trigonométriques dont elles dépendent sont directement liées aux dimensions apparentes de l'ouverture, dont l'évaluation s'effectue par le relevé de deux angles (au moins) lus en géométral.

Ces différentes méthodes restent néanmoins limitées puisqu'elles permettent ou bien d'appréhender le facteur de lumière du jour de manière globale, ou alors de n'évaluer qu'une seule des trois composantes de ce paramètre – la composante directe en l'occurrence ; si elles ne font pas partie de l'évaluation globale, la composante réfléchie externe et plus encore la composante réfléchie interne ne sont pas concernées par ces méthodes.

La plus connue des méthodes dites « globales » est sans doute la méthode « Lumen », méthode analytique dérivée des calculs de transferts de flux qui sont utilisés en éclairage artificiel ; les premières applications à la lumière naturelle sont dus à Frühling (1928). Comme on l'a précisé plus haut, son inconvénient majeur est de ne fournir qu'une valeur moyenne du facteur de lumière du jour sur l'ensemble du local (les derniers développements de la méthode permettent cependant d'évaluer le facteur de lumière du jour *FJ* en trois points de la pièce diversement éloignés de l'ouverture, donnant ainsi des informations sommaires quant à la distribution). Le même défaut entache la méthode d'évaluation rapide préconisée par la CIE[45], méthode graphique cette fois (plusieurs abaques), qui peut être utilisée au stade de l'avant-projet et permet de traiter cinq types d'ouvertures : fenêtres unilatérales, bilatérales, zénithales, éclairage par sheds et enfin par lanterneaux ; pour les deux premiers types, le facteur de lumière du jour est

---

[43] En fait les quatre éléments aristotéliciens traditionnels…

[44] Environ 1,50 m.

[45] In *Daylight*, publication CIE n° 16, 1970.

donné au point le plus défavorisé du local, alors que pour les trois derniers, la méthode ne fournit qu'une valeur moyenne sur l'ensemble du local.

5.4.1.2.1 Méthodes analytico-géométriques

De nombreuses méthodes analytiques (Pugno, Higbie, Kittler & Ondrejicka, etc.) permettent de déterminer la composante directe du facteur de lumière du jour, la plupart du temps pour deux types de ciels couverts (couvert uniforme et couvert CIE – voir la section 6.6.2.2 pour une définition précise de ces ciels), ainsi que pour différents dispositifs de prise de jour (baies horizontales, verticales, inclinées...). La valeur du facteur de lumière du jour est obtenue pour un point donné du local, en général situé au niveau d'un plan de travail horizontal.

L'emploi de ces méthodes analytiques résulte finalement de considérations purement mathématiques ; en effet, la formulation générale de l'éclairement horizontal direct incident en un point *P* à l'intérieur d'un local est donné par une intégrale qui demeure analytiquement calculable à condition que la luminance *L* de la partie de ciel visée reste une fonction simple des angles θ et φ qui la repèrent (hauteur angulaire et azimut respectivement) ; c'est effectivement le cas pour les ciels couverts uniforme et CIE (voir le chapitre 6 pour un développement de l'ensemble de ces notions).

Cette intégrale traduit le fait que l'éclairement en un point *P* résulte des contributions cumulées d'un certain nombre de « zones de ciel », repérées angulairement depuis le point *P* par leur hauteur angulaire θ et leur azimut φ :

$$E_P = \int_{\text{ouverture}} L(\theta,\varphi)\cdot \sin\theta \cos\theta \cdot d\theta\, d\varphi \qquad \text{[lux]}$$

où L est la luminance (cd/m^2) du ciel vu depuis le point *P* au travers de l'ouverture,
et θ et φ la hauteur et l'azimut de la zone de ciel visée.

Dans les deux cas simples évoqués ci-dessus, le calcul analytique de l'intégrale précédente fournit l'éclairement horizontal correspondant à la totalité de l'hémisphère[46], expression dans laquelle L_z représente la luminance du ciel au zénith (voir également la section 6.6.6.2) :

$E_P = \pi \cdot L_z$ dans le cas du ciel couvert uniforme,

$E_P = \frac{7\pi}{9} \cdot L_z$ s'il s'agit du ciel couvert CIE.

[46] D'après Hopkinson, 1966.

Le calcul de la composante directe du facteur de lumière du jour fait intervenir exclusivement les dimensions de la prise de jour et la position du point d'observation par rapport à cette ouverture, autrement dit la portion de ciel visible à l'intérieur d'une pyramide de sommet *P*, limitée par les arêtes de l'ouverture. On considère dans la suite que cette ouverture ne possède ni cadre ni fenêtre, et on désigne par *h* sa hauteur, *w* sa largeur, et par *d* sa distance au point de référence *P*. De plus on définit, afin de simplifier les écritures, les angles *a*, *b* et *c* comme suit (Fig. 56.) :

$$a = \arctan\frac{h}{d}, \quad b = \arctan\frac{w}{d}, \quad c = \arctan\frac{w}{\sqrt{h^2 + d^2}} = \arctan\frac{w \cdot \sin a}{h}$$

avec *a*, *b* et *c* exprimés en radians.

Il s'agit évidemment là d'un cas particulier puisque le point *P* est considéré comme étant situé sur la normale à l'ouverture rectangulaire qui passe par l'un des « coins bas » de cette ouverture ; même si on le place en général sur un plan de travail horizontal, le point *P* peut *a priori* se situer n'importe où dans la pièce. Dans cette hypothèse, il suffit de considérer des fenêtres rectangulaires imaginaires dont les différentes contributions viennent se sommer algébriquement ; le principe en est explicité plus précisément dans la section traitant des abaques du CSTB (Fig. 61. droite).

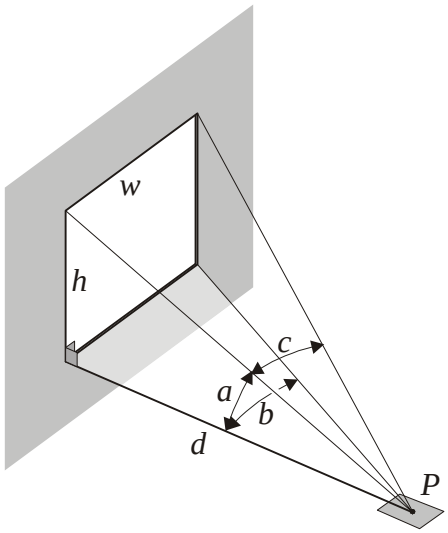


Fig. 56. Dimensions apparentes d'une fenêtre vue depuis un point *P* situé sur la normale à l'un de ses angles ; On notera que les deux angles *a* et *b* suffisent pour une ouverture rectangulaire, l'angle *c* n'étant pas indépendant des précédents.

Il est ainsi possible de déterminer la composante directe du facteur de lumière du jour *FD*[47] pour les deux cas précédents, de même que l'éclairement horizontal en un point *P* intérieur au local (avec les notations définies ci-dessus) :

$$FD = \frac{b - c\cos a}{2\pi} \qquad \text{et} \qquad E_P(a,b) = \frac{L_z}{2}\left(b - c\cos a\right)$$

dans le cas du ciel couvert uniforme,

$$FD = \frac{1{,}5\left(b - c\cos a\right) + 2\arcsin\left(\sin a \cdot \sin b\right) - \sin 2a \cdot \sin c}{7\pi} \qquad \text{et}$$

$$E_P(a,b) = \frac{L_z}{9}\left[1{,}5\left(b - c\cos a\right) + 2\arcsin\left(\sin a \cdot \sin b\right) - \sin 2a \cdot \sin c\right]$$

pour le ciel couvert CIE.

A noter que si le point de référence *P* se situe en *A* (Fig. 57.), les angles *a* et *b* sont alors égaux à $\pi/2$ et *FD* = 25 %, résultat cohérent puisque l'œil voit alors le quart de la voûte céleste ; dans l'hypothèse où il se situe en *M*, l'angle *b* a pour valeur $\pi/2$ de part et d'autre de la normale, et il suffit donc de doubler la quantité précédente ; aussi *FD* vaut cette fois 50 %, correspondant à la vision d'un demi hémisphère céleste. On comprend ainsi que la composante de ciel diminue très rapidement avec l'éloignement de *P* par rapport au plan de la fenêtre ; pour une fenêtre standard, les 25 % au nu de la façade sont divisés par dix à 2 m (Fig. 57.)...

[47] La composante directe du facteur de lumière du jour est encore appelée facteur de ciel *FC* dans l'hypothèse d'une ouverture non vitrée et d'un ciel uniforme ; elle correspond en effet très exactement à la portion de ciel vu depuis le point de référence.

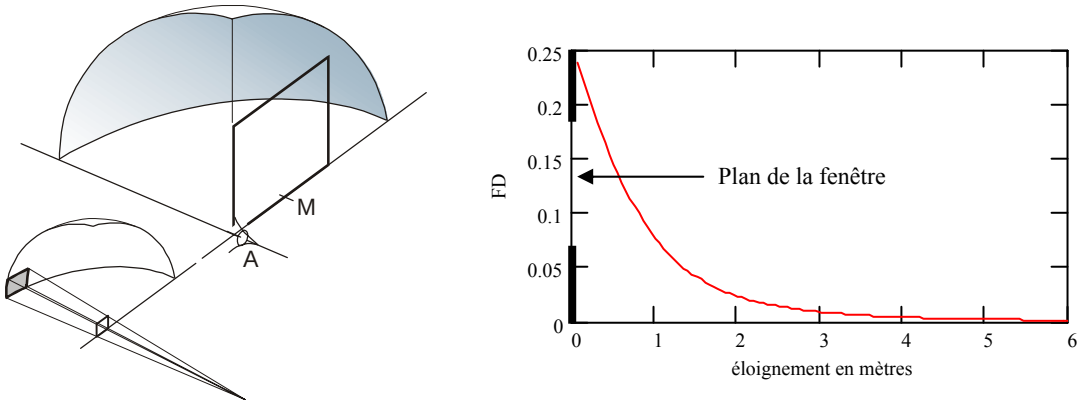


Fig. 57. A gauche, portions d'hémisphère vu depuis un point du local : en bas l'observateur est situé loin à l'intérieur du local ; en haut son oeil est au nu du vitrage et il perçoit ¼ d'hémisphère ; à droite, pour un ciel couvert uniforme, courbe de l'affaiblissement de la composante de ciel avec l'éloignement par rapport à la fenêtre (sans vitrage).

Sans entrer plus avant dans les détails, on remarquera simplement que les calculs de la composante directe du facteur de lumière du jour *FD* et de l'éclairement E_P sur un plan horizontal sont également possibles dans le cas d'une prise de jour en toiture (éclairage zénithal horizontal), et qu'ils mènent à des formulations tout à fait analogues aux précédentes[48].

5.4.1.2.2 Le diagramme de Waldram

Le principe du diagramme de Waldram consiste à reporter sur une perspective du ciel réalisée en projection cylindrique les contours limites de l'ouverture ainsi que les obstacles extérieurs qui sont vus au travers de cette ouverture ; l'ensemble est représenté depuis le point « d'observation », c'est-à-dire celui à partir duquel sera évaluée la composante de ciel. Le recours à ce type de projection, qui déforme considérablement la vue du paysage représenté, présente l'avantage de faciliter le décompte des plages de ciel à prendre en considération.

[48] Voir par exemple *New Daylight Algorithms*, P. R. Tregenza et R. Sharples, School of Architectural Studies, University of Sheffield (http://eande.lbl.gov/Task21/BRE-ETSU/intro.html).

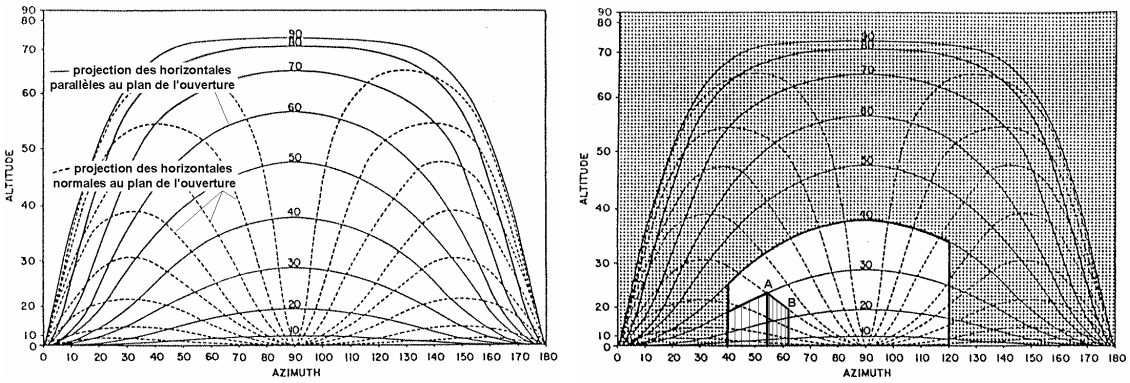


Fig. 58. Diagramme de Waldram : projection cylindrique d'un demi-hémisphère céleste, sur lequel les verticales demeurent verticales ; les horizontales se projettent selon les courbes en traits pleins, et les pointillés correspondent aux projections des normales au plan de la fenêtre (ainsi la projection de l'arête *AB* est une horizontale perpendiculaire au plan de la fenêtre), et finalement la projection d'un bâtiment parallélépipédique depuis le point de référence demeure relativement aisée.

Le diagramme permet d'évaluer la quantité de lumière qui pénètre à l'intérieur d'un local par une ouverture, ou plus exactement de la rapporter à celle disponible sur la totalité de la voûte céleste dans le cas d'un ciel couvert normalisé (voir la section 6.6.2.2). L'ensemble du diagramme représentant la projection de la moitié de l'hémisphère céleste ; il est quadrillé en 500 éléments, chacun d'entre eux représentant 0,1 % de facteur de lumière du jour (50 % correspondent donc à la vision directe de la moitié de la voûte céleste, soit la totalité du diagramme).

La lecture des ratios est effectuée par relevé planimétrique : la composante de ciel du facteur de lumière du jour (voir la section 5.3.3.2) est obtenue en comptabilisant les carreaux de ciel visibles ; elle correspond donc au rapport de la surface S_C de ciel vu, mesurée sur le diagramme, au double de la surface S du diagramme complet :

$$FD = \frac{S_C}{2S}$$

Pour la composante réfléchie externe, il suffit de comptabiliser les carreaux relatifs aux portions de masques qui sont vues depuis le point d'observation (surface obstruée S_0), affectés d'une fraction L_0 de la luminance du ciel à cet endroit, (l'apport en éclairage dû aux bâtiments extérieurs n'est que la fraction du rayonnement incident réfléchi par ces bâtiments). L_0 est en général compris entre 0,2 (surfaces claires) et 0,1 (surfaces sombres) (Fig. 59.).

$$FRE = \frac{L_0 \cdot S_0}{2S}$$

A noter que dans le cas où le ciel est uniforme et les ouvertures non vitrées, la composante de ciel correspond précisément au facteur de ciel, soit finalement à la portion de ciel vu depuis le point considéré du local.

Même si d'autres facteurs interviennent encore dans la détermination du facteur de lumière du jour, ceux qui viennent d'être évoqués (composante de ciel et composante réfléchie externe) en constituent la part essentielle, et leur somme en donne donc une bonne approximation. Il faut pourtant relativiser quelque peu la conclusion précédente en ce qui concerne la détermination de la composante réfléchie externe ; en effet la contribution, par réflexion, des édifices extérieurs est comptabilisée de la même manière que les portions de ciel qu'ils masquent (au coefficient de réflexion près évidemment) ; or si cette approche simplifiée peut convenir « en général », elle présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de masques éventuels : la vision d'un prospect, depuis une ouverture, ne présage en rien de la manière dont celui-ci reçoit l'énergie depuis la voûte céleste ; d'autres éléments de l'environnement urbain peuvent affecter de manière importante son éclairement (masques par exemple, ou au contraire surfaces à réflexion spéculaire). Dans un même ordre d'idée, cette méthode trouve rapidement ses limites dans le cas d'obstructions très proches, comme les puits de lumière, voire même les atriums, où les réflexions multiples sont susceptibles d'apporter une contribution significative, venant augmenter d'autant la valeur de cette composante réfléchie externe. Cette restriction s'applique également aux deux dispositifs qui suivent (rapporteur et diagramme de points).

A noter enfin que le diagramme de Waldram a été décliné sous diverses formes, de manière à prendre en compte plusieurs types d'ouvertures (verticales, horizontales, inclinées), et plusieurs distributions lumineuses (ciel uniforme, ciel couvert CIE, ciel clair sans soleil).

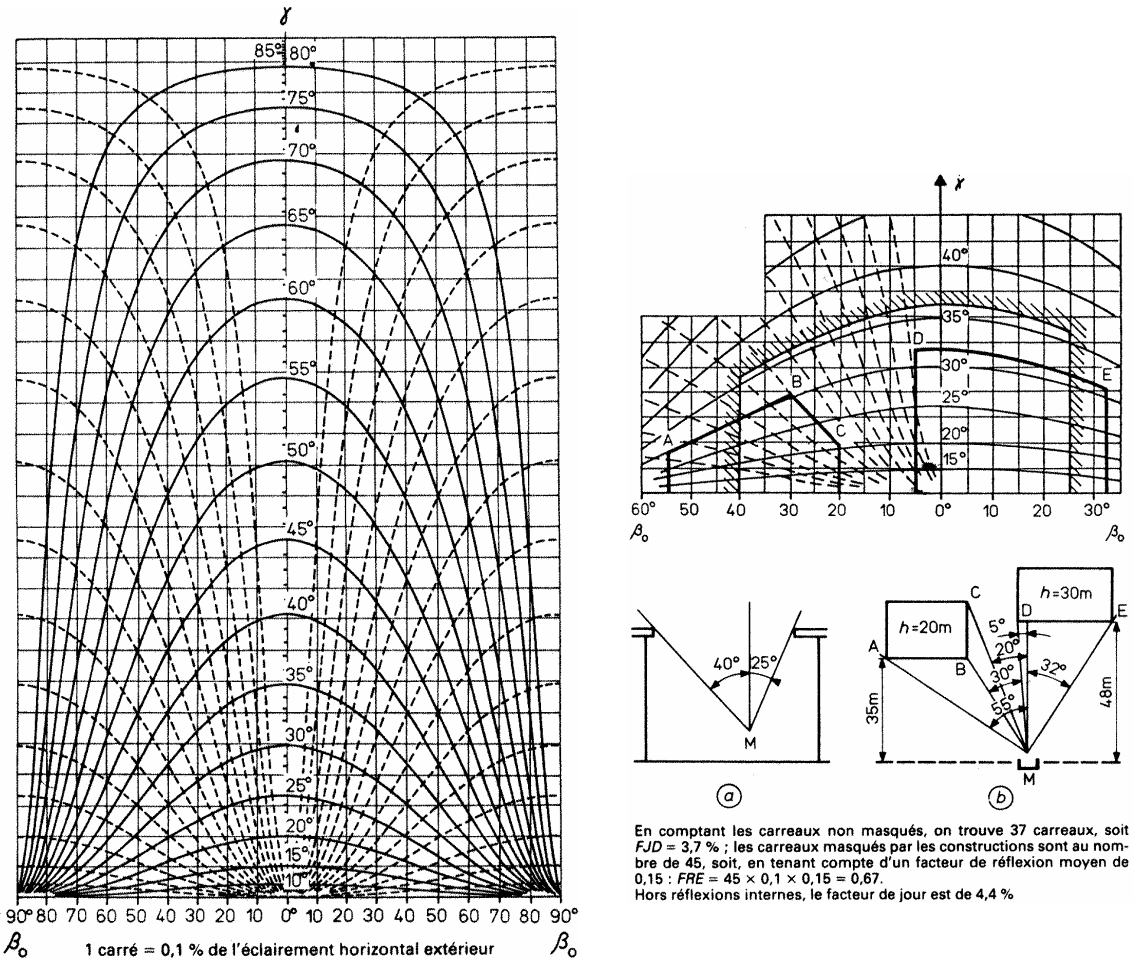


Fig. 59. Diagramme du type Waldram : à gauche le diagramme lui-même pour un ciel couvert CIE ; en bas à droite plan du local avec emplacement du point de référence et positionnement des masques extérieurs; en haut à droite projection de l'ouverture (partie de ciel visible) et des masques depuis le point de référence.

5.4.1.2.3 Les abaques du CSTB

Les abaques angulaires du CSTB[49] permettent de déterminer la composante de ciel du facteur de lumière du jour sur un plan horizontal en un point *M* à l'intérieur d'un local pour trois types de ciels (ciel couvert uniforme, ciel couvert CIE, et ciel serein), à partir des dimensions apparentes des ouvertures.

À partir du point *M* considéré sur une normale à la façade, les dimensions apparentes de la fenêtre sont repérées par les angles α et β, mesurés respectivement dans un plan hori-

[49] Abaques pour la détermination de la composante directe du facteur de lumière du jour, par ciel uniforme, ciel Moon et Spencer et ciel serein, publication CSTB (J. Dourgnon, F. Fleury et P. Chauvel).

zontal et un plan vertical ; on peut donc relever ces angles sur le plan et l'élévation du local (Fig. 56.). À noter que l'isotropie azimutale des ciels couverts uniforme et CIE rend indifférente l'orientation de l'ouverture, isotropie qui n'existe plus dans le cas du ciel serein ; par contre ce type de ciel présente un plan de symétrie vertical – celui contenant la direction solaire –, obligeant à considérer l'angle β de part et d'autre de ce plan vertical .

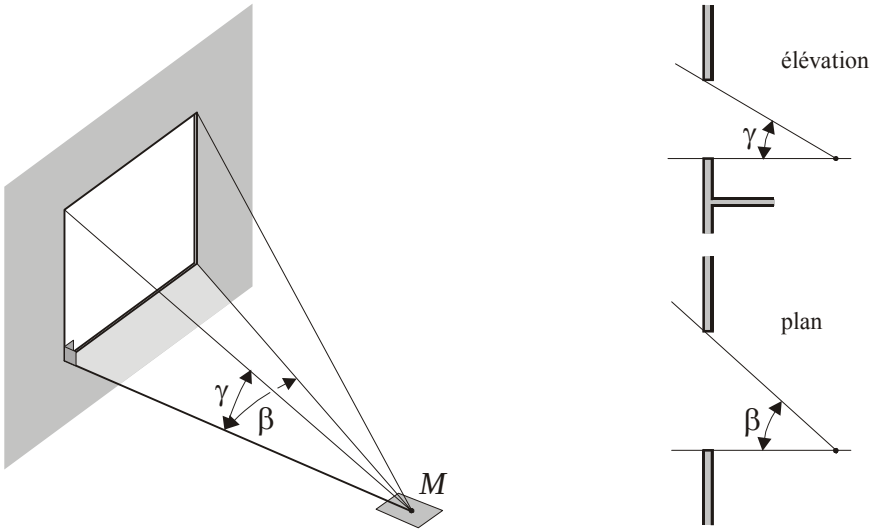


Fig. 60. Dimensions apparentes d'une fenêtre vue d'un point *M* ; relevé des angles α et β sur le géométral.

Le report des angles sur un abaque donne directement la composante directe du facteur de lumière du jour, compte tenu du vitrage (Fig. 61. gauche). Dans le cas où la normale à la façade ne coïncide pas avec un sommet de l'ouverture, la composante directe est obtenue comme somme algébrique de quatre ouvertures fictives (Fig. 61. droite) ; cet aspect *a priori* intéressant peut en fait se révéler le point faible de la méthode : si la précision est assez bonne dans le cas général, elle est très faible lorsque les différences portent sur des quantités voisines, et la méthode devient alors quasiment inutilisable. Dans le registre de la précision toujours, on peut considérer que celle-ci reste convenable pour des ouvertures plutôt étroites, mais diminue considérablement dans le cas de baies de grande largeur. La méthode convient donc pour des fenêtres « traditionnelles », mais devient inutilisable s'il s'agit de parois vitrées filantes.

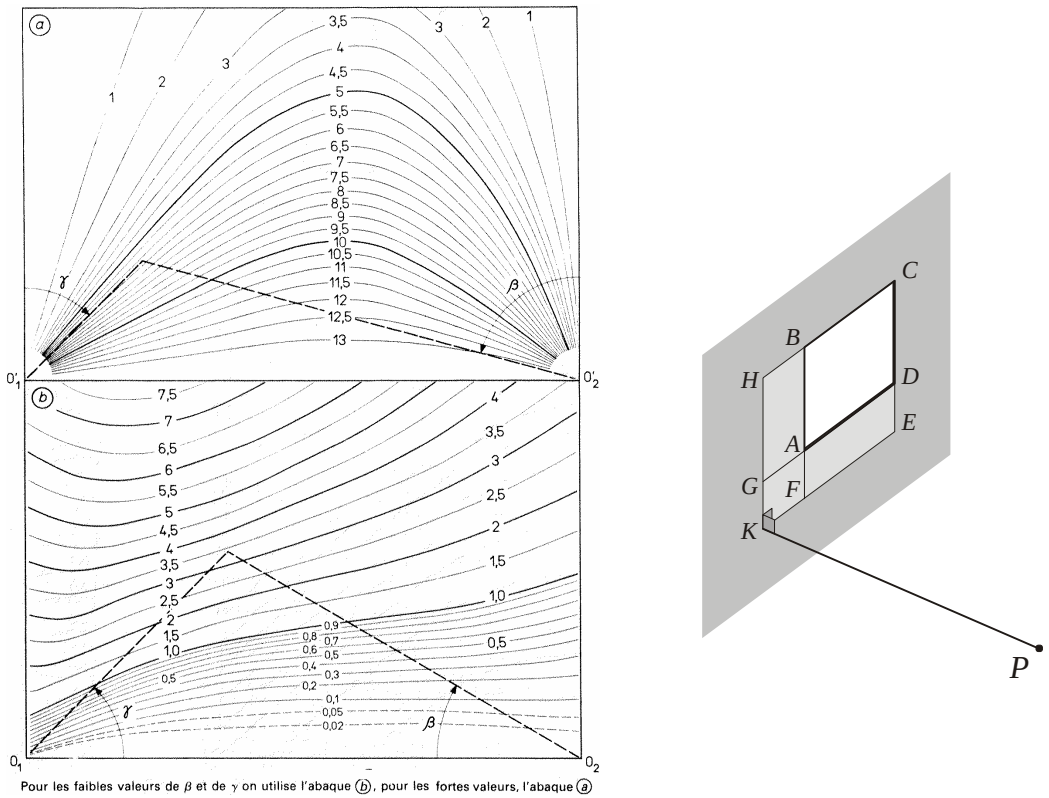


Fig. 61. A gauche, exemple d'abaque angulaire permettant la détermination de la composante directe du facteur de lumière du jour (cas d'un ciel uniforme, avec prise en compte du vitrage) ; à droite, la composante de ciel *C* pour l'ouverture *ABCD* est égale à $C_{KHCE} + C_{KGAF} - C_{KHBF} - C_{KGDE}$.

Parmi les dispositifs similaires, on trouve encore les abaques perspectifs de Gouffé, améliorés par Cadiergues pour la prise en compte de l'absorption du vitrage[50], qui donnent la valeur de la composante de ciel sur un plan horizontal et sur un plan vertical pour une baie verticale ; moyennant quelques précautions, ils peuvent également convenir pour plan horizontal et une verrière horizontale. Mais ils restent d'un intérêt limité dans la mesure où ils s'appliquent exclusivement au ciel couvert uniforme.

Ils fonctionnent par superposition du diagramme de l'auteur et de la projection perspective de l'ouverture ; l'évaluation de la composante de ciel en millièmes est effectuée par comptage du nombre de points vus au travers des ouvertures – chaque point visible correspond au millième de l'effet de l'ensemble de la voûte céleste (Fig. 62.) ; à noter également que les points ont été préférés à un carroyage pour une meilleure lisibilité. Ca-

[50] Voir *Éclairage naturel*, de R. Cadiergues ; il est également l'auteur de formulations statistiques donnant les puissances solaires des rayonnements direct et diffus sur un plan normal au rayonnement et horizontal.

diergues a montré qu'il était également possible d'utiliser ces perspectives pour la détermination de la composante due aux réflexions externes, par division des façades en bandes horizontales ; le facteur de réflexion est alors considéré comme constant dans chacune de ces bandes (Fig. 63.).

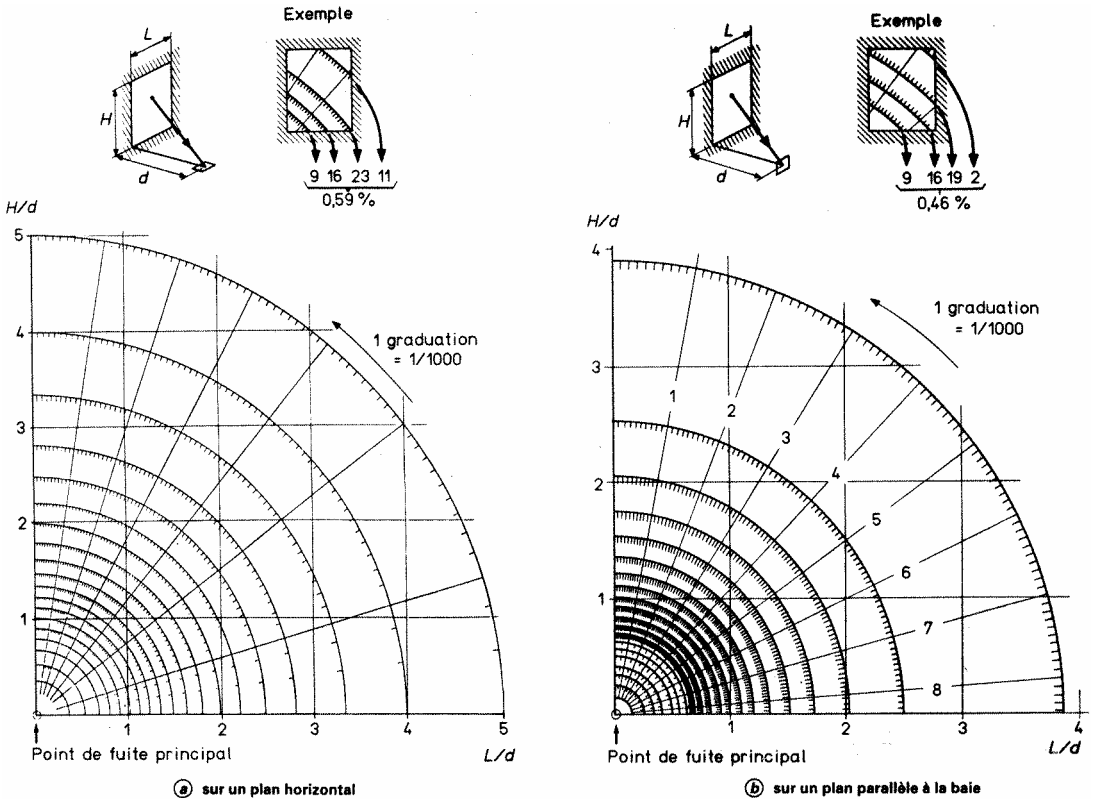


Fig. 62. À gauche, abaque pour le calcul de la composante de ciel sur un plan horizontal pour une baie verticale ; à droite, abaque pour le calcul de la composante de ciel sur un plan vertical parallèle à la baie.

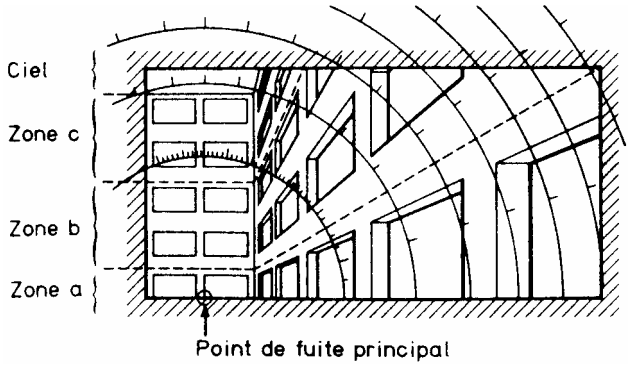


Fig. 63. Exemple de calcul du facteur de lumière du jour sur une cour intérieure, avec division des façades en bandes horizontales pour le calcul de la composante réfléchie externe, selon la méthode de Cadiergues (cette figure et la précédente d'après Techniques de l'Ingénieur, C 3315 p. 23).

Le CSTB propose encore d'autres abaques angulaires, valables cette fois par ciel serein. Contrairement aux cas précédents (ciels couverts) où l'isotropie azimutale permettait de ne pas se soucier de l'orientation des ouvertures, ici la composante directe du facteur de lumière du jour dépend directement de l'exposition de la prise de jour. Les abaques publiés par le CSTB comportent quatre séries correspondant à quatre altitudes solaires particulières : 0°, 20°, 40° et 60°. La répartition des luminances du ciel serein étant symétrique par rapport au plan vertical contenant le soleil, plusieurs types de simplifications sont possibles (voir la Fig. 64.).

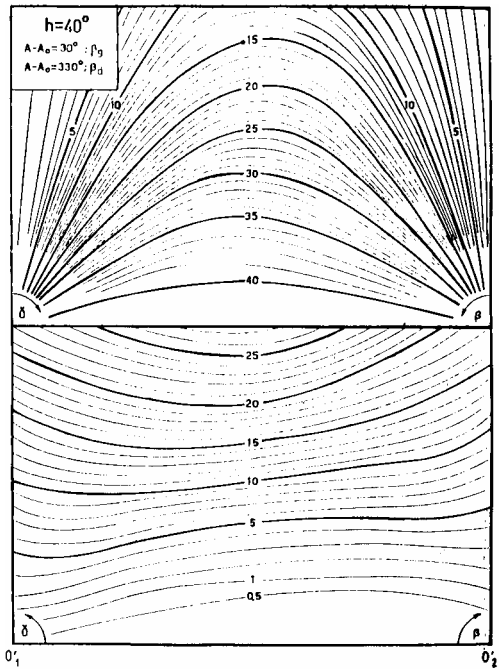


Fig. 64. Paire d'abaques pour une altitude solaire de 40° et une différence de 30° (ou de 330° compte tenu de la symétrie) entre l'azimut solaire et celui de la normale à la façade ; ils permettent de déterminer la composante directe et sont valables dans le cas d'un vitrage clair d'épaisseur 3 mm.

5.4.1.2.4 Autres méthodes

- Les rapporteurs angulaires de la B.R.S.[51], qui mesurent, sur le plan et sur une section d'un local, l'angle solide de ciel visible depuis un point de référence situé à l'intérieur de ce local ; l'échelle de mesure est non linéaire afin de prendre en compte la transmission du vitrage ainsi que la non-uniformité de la répartition des luminances sur la voûte céleste (l'appareil est disponible pour les différents

[51] Voir Longmore J., *B.R.S. (British Research Station) Daylight protractors*, HMSO, 1968.

types de ciels CIE) ; une autre correction est relative aux ouvertures « finies », c'est-à-dire toutes celles qui ne comportent pas une bande vitrée horizontale de grande longueur (Fig. 65.).

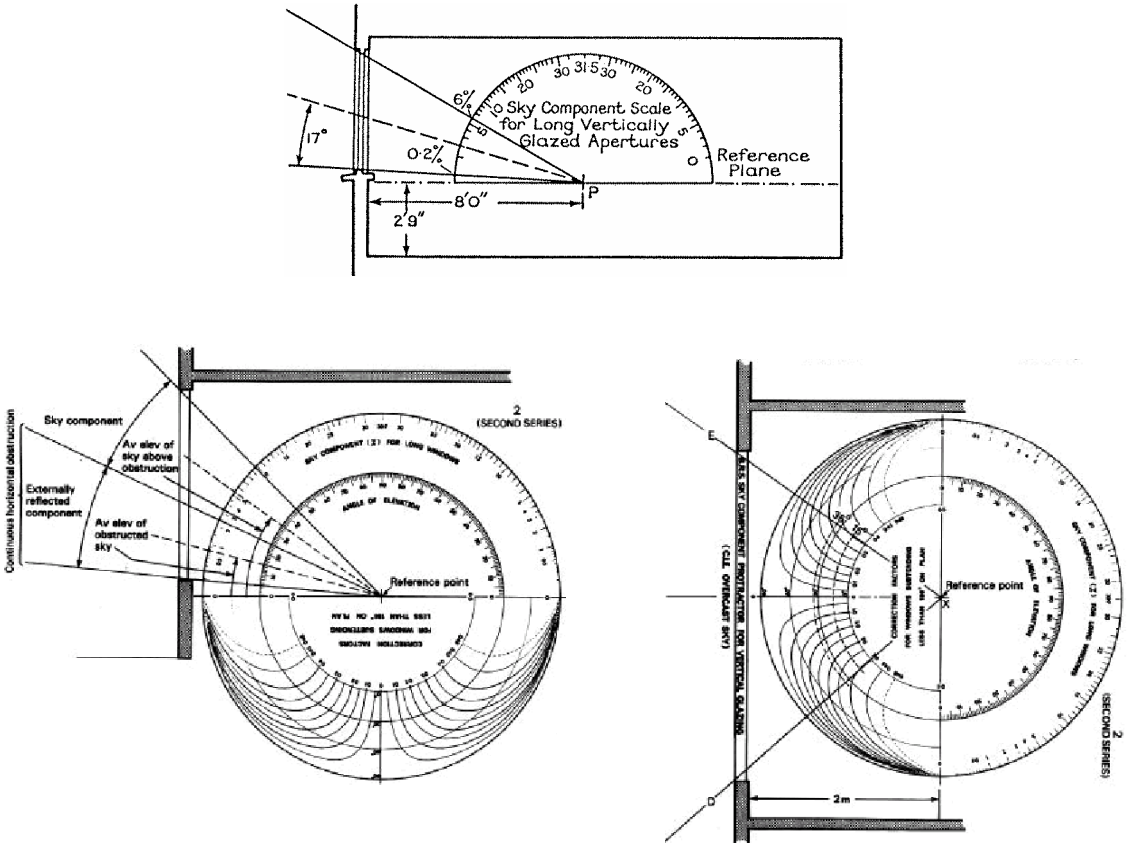


Fig. 65. Le rapporteur de la B.R.S. : en haut, principe d'utilisation ;
en bas à gauche, mesure de la composante directe du facteur de lumière du jour
(avec lecture séparée de la composante de ciel et de la composante réfléchie externe) ;
à droite, correction reliée à l'angle d'ouverture dans le plan horizontal.

- Les diagrammes de points (*dot diagrams*) sont réalisés à partir d'une projection stéréographique de la voûte céleste ; la composante de ciel du facteur de lumière du jour (pour un ciel couvert CIE) est évaluée par comptage du nombre de points visibles à l' « intérieur » de la fenêtre projetée (Fig. 66.) ; si l'opération risque de devenir laborieuse dans le cas de grandes fenêtres, la méthode permet pourtant de traiter des géométries complexes, à condition que les ouvertures soient verticales. Cette technique paraît surtout utilisée dans les pays anglophones.

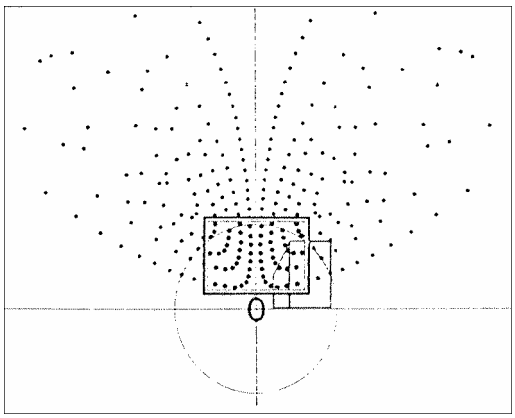


Fig. 66. Les diagrammes de points, chacun d'eux représentant 0,1% de la composante de ciel ; l'avantage principal de ce type de diagramme est de conserver la géométrie des ouvertures.

- Pour mémoire enfin on peut citer quelques méthodes analytiques, qui permettent également d'évaluer la composante directe du facteur de lumière du jour en un point donné à l'intérieur d'un local, pour des ciels couvert uniforme et couvert CIE ; leurs auteurs fournissent la plupart du temps un ou plusieurs abaques correspondant à la traduction graphique de la méthode analytique pour certains cas particuliers très simples. Parmi elles on peut citer les méthodes de Higbie (USA), Kittler & Ondrejicka (Tchécoslovaquie), Pugno (Italie), etc.. Là encore, elles diffèrent par leur capacité à traiter convenablement différentes configurations géométriques (ouvertures horizontales, verticales, inclinées), à assurer la prise en compte des pertes par transmission dans le vitrage, ou encore à considérer des cas très particuliers comme des pièces de grande longueur vitrées d'un seul côté, un environnement extérieur enneigé (dans ces conditions, le fort coefficient de réflexion du sol augmente de manière importante la luminance des ciels couverts, d'autant plus si le plafond nuageux est bas)...

5.4.2 Méthodes expérimentales

L'ensoleillement et l'éclairement sont des domaines des sciences physiques où le recours au modèle réduit est possible et, avec quelques précautions, relativement aisé à mettre en œuvre ; en effet les domaines de la thermique, de l'acoustique, de l'aérodynamiques (principales sciences physiques qui affectent les ambiances architecturales et urbaines) ne permettent que très difficilement de recourir aux modèles, souvent en raison des échelles relatives de l'élément étudié et du phénomène considéré (c'est notamment le cas en acoustique, où les longueurs d'onde et les dimensions du modèle sont du même ordre de grandeur). Au contraire, le domaine lumineux permet

une transposition aisée puisque les longueurs d'onde du visible restent très en deçà des dimensions du dispositif étudié, qu'il s'agisse de la réalité ou bien de son modèle réduit au 1/100ème ou même au 1/1000ème (le 1/100ème paraît la réduction maximale pour un niveau de détail réellement significatif).

On notera de plus que le recours à la maquette réelle présente un intérêt non négligeable sur le plan de la perception visuelle et de certains aspects psychologiques qui l'accompagnent – si elle est de dimensions suffisantes bien sûr – ; la maquette numérique virtuelle présente également cet attrait, et peut-être davantage encore puisqu'elle permet de placer l'œil de l'observateur au cœur même du dispositif étudié[52], alors que la maquette réelle n'autorise que des points de vue relativement éloignés, de type « survol », sans commune mesure avec la perception *in situ* (à moins d'utiliser une caméra miniature de type endoscope...).

Quant aux caractéristiques du modèle réduit lui-même, elle seront relatives aux problèmes d'échelle essentiellement : une échelle globale en adéquation avec celle des phénomènes étudiés (l'étude des ombres portées d'un ensemble urbain et l'évaluation de l'influence des dimensions d'une ouverture sur la tache solaire dans un local mèneront à des échelles fort différentes) ; et en corollaire le dimensionnement correct des éléments géométriques susceptibles d'avoir une incidence sur la lumière directe, c'est-à-dire l'ensemble des masques (constructions voisines et masques végétaux, qu'il soient saisonniers ou permanents) ; le modèle pourra donc être très simplifié par rapport à la réalité, mais devra néanmoins comporter les éléments essentiels au regard du ou des phénomène(s) étudié(s)[53].

5.4.2.1 Ensoleillement

Le dispositif technologique permettant de mener l'étude de l'ensoleillement est nommé *héliodon*[54] (Fig. 67.), appareil qui permet de réaliser artificiellement l'éclairage solaire direct sur une maquette du dispositif architectural ou urbain à étudier, en reproduisant la position relative de la terre et du soleil à un instant donné. La maquette est posée sur un plateau orientable en fonction de la latitude, de la date et de l'heure pour lesquelles est réalisée la simulation, et permet finalement de « dessiner » sur la maquette les zones éclairées par l'astre solaire, celui-ci étant figuré par une source lumineuse située à quel-

[52] … et d'autant plus si on utilise les techniques récentes de la réalité virtuelle, qui permet l' « immersion » du spectateur au cœur même de la scène, à condition que celui-ci soit pourvu de l'harnachement *ad hoc* : casque permettant à la fois la restitution visuelle (à l'aide de petits écrans vidéo), la restitution sonore, et muni de capteurs de déplacement pilotant la simulation…

[53] Prendre garde au fait que l'étude de plusieurs phénomènes simultanés peut éventuellement conduire à des exigences incompatibles.

[54] Le premier rapport concernant un héliodon semble être celui de Dufton & Beckett dans le RIBA Journal du 16 mai 1931.

que distance sur la verticale passant par le centre du plateau (6 à 8 fois la plus grande dimension de la maquette permet de rendre négligeable la divergence des rayons).

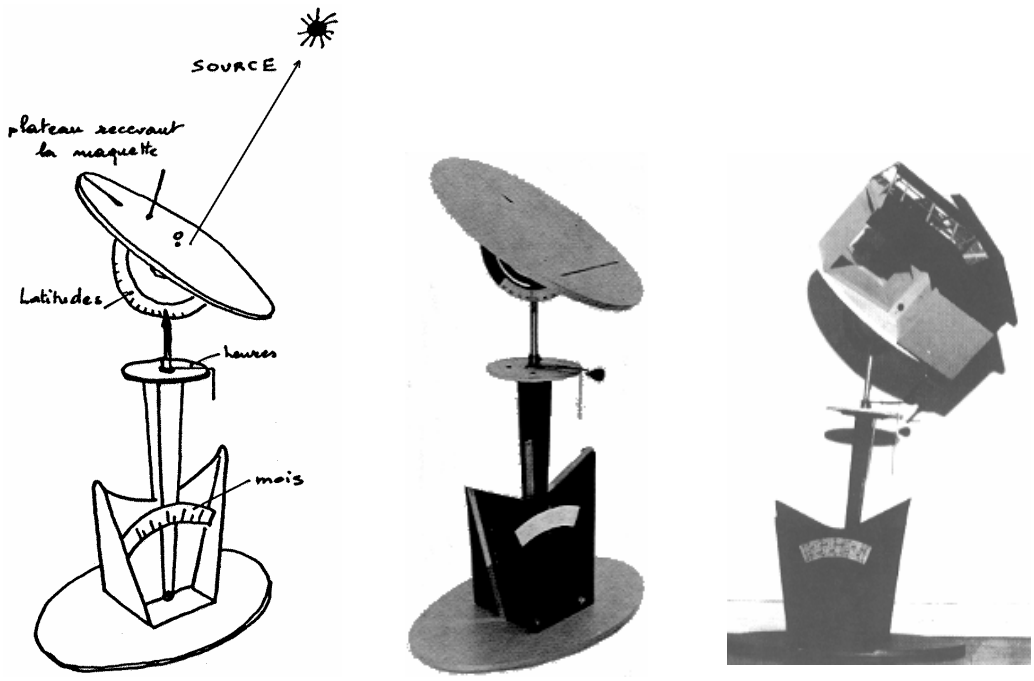


Fig. 67. Héliodon ; de gauche à droite : principaux éléments constitutifs, photographie de l'appareil, et plateau supportant la maquette à étudier.

Bien que leur principe de fonctionnement soit toujours le même, les différents types d'héliodons existants se distinguent essentiellement par les modalités de réglage de la position du plateau : entièrement manuelles pour les plus simples, par moteurs asservis pour les plus sophistiquées. Quant au modèle présenté sur la figure ci-dessous (Fig. 67.), l'indication de la saison est obtenue par basculement de l'ensemble (plateau et axe de rotation) devant un cadran analemmatique[55] ; l'« analemme » est un tracé (nommé ainsi par Vitruve dans le Livre IX, chap. 7) qui permet de construire aisément la déclinaison du soleil un jour quelconque. Enfin l'axe du plateau (axe du monde) s'appuie sur un profil tel que la hauteur du centre du plateau reste constante par rapport à la lampe, quelle que soit l'inclinaison de ce plateau...

[55] On appelle cadran analemmatique un cadran solaire de forme elliptique dont le style doit être déplacé chaque jour de l'année le long d'une droite pour indiquer l'heure sur l'ellipse.

5.4.2.2 Éclairement diffus

Les études concernant l'éclairement diffus peuvent elles aussi être menées sur maquettes. Aussi de nombreux laboratoires se sont dotés de dispositifs permettant de reproduire à échelle réduite les effets de l'éclairage provenant du soleil et du ciel (ciel artificiel). Différentes solutions techniques sont utilisées, depuis la « boîte lumineuse » parallélépipédique de petites dimensions (moins de 2 m), jusqu'à la voûte hémisphérique de plusieurs mètres de diamètre permettant l'étude de maquettes de grandes dimensions.

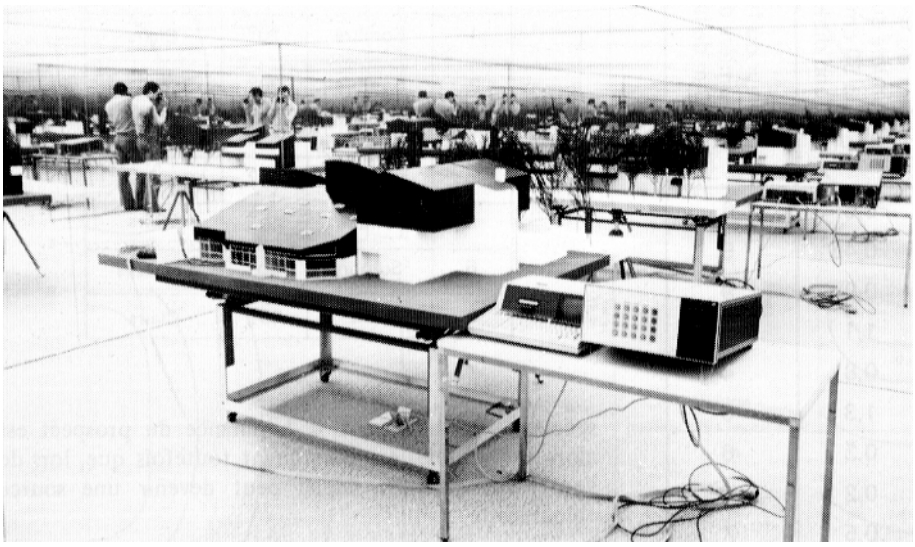


Fig. 68. Le ciel artificiel du CSTB à Nantes (local parallélépipédique avec parois à miroir).

Un exemple de ciel artificiel hémisphérique : le « Sky Simulator »

L'un des dispositifs les plus remarquables (et ambitieux…) dans le domaine est sans doute le *Sky Simulator*, développé au sein du *Center's Building Technologies Program* (situé à Berkeley). Il s'agit d'un héliodon sophistiqué, qui ne se limite pas à la visualisation des zones ensoleillées ou à l'ombre puisqu'il permet également de quantifier les niveaux d'éclairement disponibles au sein de la maquette 3D ; mais il convient surtout à l'étude et la mesure de l'éclairement diffus dans la mesure où l'ensemble de la voûte céleste peut se comporter comme une source lumineuse de distribution variable.

Cet appareillage se compose d'un dôme d'un diamètre intérieur d'environ 8 mètres, que les chercheurs utilisent pour la mesure des niveaux d'éclairement dans les constructions, et notamment pour l'étude de divers dispositifs technologiques destinés à moduler la pénétration de la lumière à l'intérieur des bâtiments en fonction de la saison, de l'orientation et de la localisation géographique.

L'intérieur du dôme comporte 108 tubes fluorescents éclairant la voûte hémisphérique ; les différentes conditions de ciel sont obtenues en modulant la puissance des tubes, individuellement ou par groupes pouvant aller jusqu'à 36. Le modèle (l'environnement urbain ou le dispositif architectural) est placé au centre du dôme, dans le plan de l'horizon, sur une plate-forme pouvant tourner et s'incliner. Le soleil est simulé grâce à une lampe halogène de 1000 watt située au foyer d'un miroir parabolique qui peut prendre n'importe quelle position en altitude, la variation de position azimutale étant assurée par la rotation de la plate-forme. Des capteurs d'éclairement lumineux reliés à un système d'acquisition de données sont installés dans la maquette qui doit être évaluée ; au moins un capteur de référence est placé à l'extérieur du modèle, sur un plan horizontal dégagé, de manière à procéder aux mesures des facteurs de lumière du jour (le facteur de lumière du jour étant le rapport de l'éclairement lumineux disponible sur un plan horizontal intérieur à celui obtenu un plan horizontal extérieur en site dégagé – voir la section 5.3.3.2).

Mais ce dispositif est d'une utilisation et d'une maintenance lourdes et coûteuses ; aussi son intérêt principal – et sa fonction essentielle jusqu'à maintenant – réside davantage dans la mise au point et la validation de modèles numériques que pour des études réelles d'environnements urbains ou de dispositifs architecturaux particuliers.

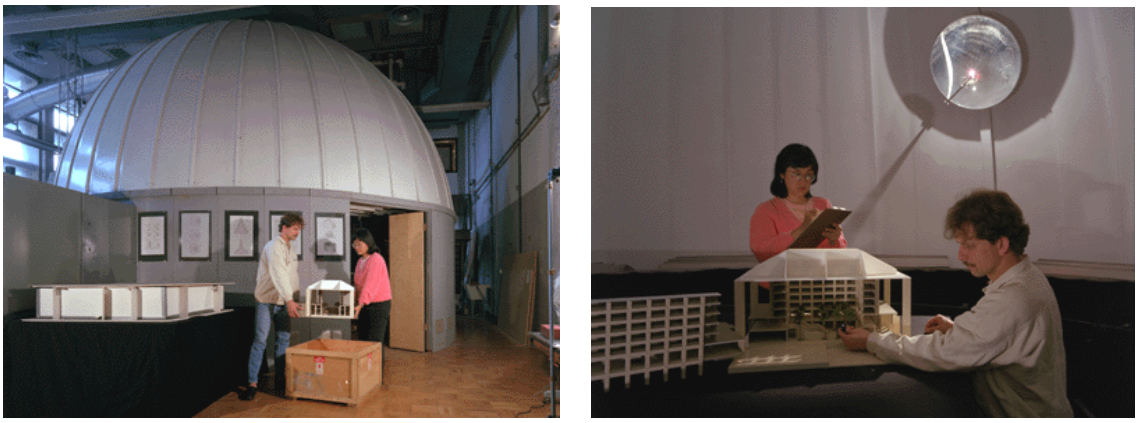


Fig. 69. Le « Sky Simulator » du CBT ; vue extérieure et mise en place d'une maquette sous le soleil artificiel.

Fig. 70. Autre ciel artificiel, vue intérieure.

Contrairement à la simulation de l'ensoleillement où seule compte la géométrie de l'ensemble étudié, la maquette employée pour la simulation de l'éclairement doit présenter des caractéristiques complémentaires et satisfaire à certaines conditions :

- À l'instar de la maquette d'étude pour l'ensoleillement, le modèle réduit pour l'analyse de l'éclairement ne nécessite pas de géométrie compliquée, c'est-à-dire comportant trop de détails de petites dimensions ; à nouveau les masques de l'environnement devront être modélisés convenablement.

- Par contre ici les aspects géométriques seuls ne suffisent plus ; il est également nécessaire de respecter les caractéristiques de réflexion des matériaux utilisés, qui affectent de manière importante la distribution de la lumière au sein du modèle ; de même en ce qui concerne leur état de surface (lisse, granuleux...), l'essentiel étant de recréer les conditions de réflexion les plus exactes possibles. Par contre, le respect de l'exactitude des couleurs ne présente d'autre intérêt que de tenter approcher la perception que le spectateur aurait de l'environnement réel (en effet deux couleurs peuvent apparaître très différentes mais avoir le même coefficient de réflexion - leur valeur est identique sur l'échelle des gris).

- L'acquisition des données est également plus complexe : elle nécessite des sondes de mesure de petites dimensions (aspect à ne pas négliger lors du choix de l'échelle du modèle), ou mieux une mini-caméra vidéo avec traitement numérique ultérieur des données enregistrées. La détermination du facteur de lumière du jour dans un local (maquette) est relativement aisée : il suffit de disposer deux sondes,

l'une à l'intérieur du local, l'autre à l'extérieur en « site » dégagé ; le facteur de lumière du jour sera le ratio des mesures obtenues par ces sondes.

À noter que l'essentiel des remarques qui viennent d'être faites est immédiatement transposable au modèle informatique : géométries quelque peu simplifiées mais respect des éléments significatifs vis à vis de la lumière, respect des coefficients de réflexion (et de transmission pour les vitrages) sont les aspects essentiels du modèle informatique ; ici le problème d'échelle ne se pose même pas...

On notera enfin que finalement, bon nombres de techniques expérimentales se sont développés parallèlement à l'émergence de l'informatique, tant pour le pilotage des dispositifs d'éclairage (en position et en « intensité ») que pour l'acquisition et le traitement des données recueillies par les capteurs de mesure.

5.4.2.3 Etudes *in situ*

Les caractéristiques solaires d'un site peuvent également être étudiées en enregistrant sur place les données nécessaires, ***i.e***. la position des masques ; ce type d'étude intéresse à la fois l'ensoleillement et l'éclairement diffus. Toutes les projections décrites précédemment ont donné lieu à des montages optiques adaptables à des appareils photographiques, mais leurs difficultés de mise en œuvre n'ont finalement laissé subsisté que deux procédés :

- L'utilisation d'un appareil photographique muni d'un *fish-eye* (l'axe de l'objectif étant dirigé vers le zénith), qui réalise une projection équidistante du site et de ses masques (que l'ont peut donc superposer à une projection équidistante des trajectoires solaires).

  Mais la technique du *fish-eye* zénithal n'est pas réservée à l'ensoleillement et à la géométrie du site ; elle est également employée pour les mesures des luminances de ciel en établissant une cartographie de l'état nuageux à un instant donné (voir la section 6.6.1).

- L'horizontoscope de Tonne[56], que sa maniabilité autorise à utiliser directement sur le site (intérieur ou extérieur), consiste à superposer, au point d'étude, les masques de l'environnement aux trajectoires solaires pour cette latitude. Il se compose d'un plateau horizontal (qu'il faut orienter convenablement et caler horizontalement) sur lequel sont représentées les trajectoires solaires selon une projection stéréographique ; celui-ci est recouvert d'une coupole transparente sur laquelle se reflète

[56] L'appareil de F. Tonne est, de manière certaine, distribué au Canada et par l'Institut Polytechnique de Stuttgart (mais plus largement sans doute).

l'environnement, que l'œil de l'observateur, placé au-dessus de l'appareil, projette visuellement sur le diagramme des trajectoires solaires. La superposition des deux « images » permet d'en déduire les durées d'insolation (Fig. 71.(b)), mais aussi d'aborder l'éclairement diffus puisque l'utilisation des diagrammes adéquats rend possible l'évaluation du *facteur de ciel*, selon une technique assez proche de celle du diagramme de Waldram (Fig. 72.). On peut noter enfin que l'enregistrement des mesures peut se faire par cliché photographique.

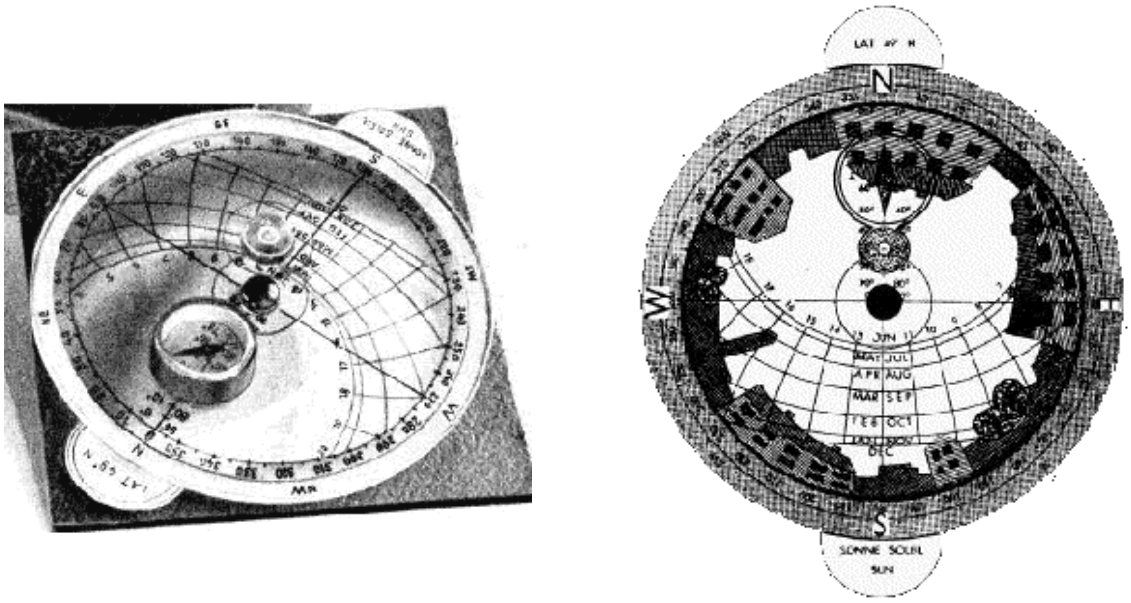


Fig. 71. a) Photographie de l'horizontoscope de F. Tonne ; on distingue le compas d'orientation et le niveau d'horizontalité en partie supérieure ;
b) Environnement urbain se projetant sur la coupole hémisphérique, venant se superposant aux trajectoires solaires tracées pour une latitude donnée.

Si cet appareil n'est guère connu dans le domaine de l'architecture, il semble l'être davantage dans celui de la sylviculture[57] ; en effet il a été montré qu'en haute montagne notamment, la croissance des jeunes semis dépendait en grande partie de la durée d'ensoleillement direct durant les mois de mai et juin. L'utilisation de l'horizontoscope *in situ* permet d'estimer simplement et avec une bonne précision cette durée, mais aussi de programmer et de positionner l'ouverture de trouées de régénération dans les pessières.

[57] Voir à ce propos un article de SCHÜTZ J. Ph. et BRANG P. dans le bulletin technique de l'Office National des Forêts (ONF), n° 28 - pp. 1-9.

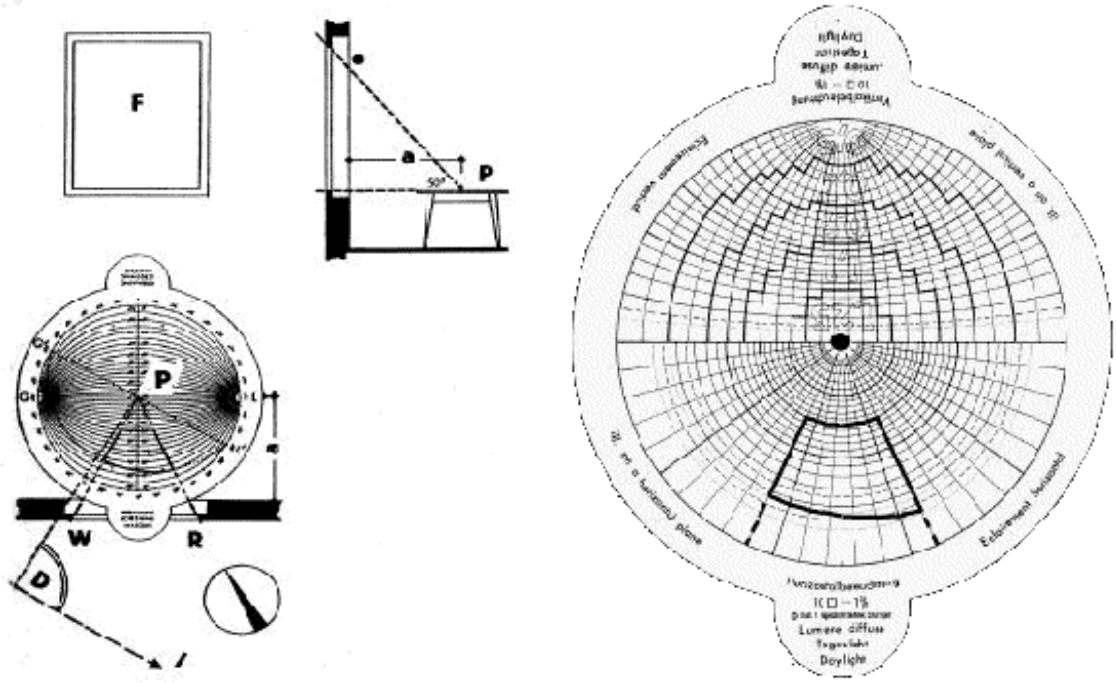


Fig. 72. L'horizontoscope dans son utilisation pour l'évaluation de la composante de ciel du facteur de lumière du jour ; l'abaque des trajectoires solaires est remplacée par une grille sur laquelle est projetée l'ouverture ; chaque élément de surface correspond à 0,1% de facteur de lumière du jour, dans le cas d'un ciel couvert.

5.4.3 Méthodes numériques

5.4.3.1 Tracés automatiques

Avant d'évoquer les techniques de simulation numériques proprement dites, il est nécessaire d'évoquer rapidement les méthodes de tracé automatique des diagrammes décrits précédemment ; en effet cadrans solaires et diagrammes solaires peuvent de nos jours être obtenus immédiatement par calcul numérique pour n'importe quelle latitude sur les ordinateurs de bureau ; en dehors des codes « maison », on trouve quelques produits dédiées spécifiquement à ces tâches : on peut citer par exemple *SHADOWS*[58] pour les cadrans solaires, ou *SUN_CHART*[59] pour le tracé des diagrammes solaires ;

[58] *Shadows* est un logiciel de tracé de cadrans solaires écrit par François Blateyron et disponible à l'adresse http://web.fc-net.fr/frb/sundials/shadows.html ; la version actuelle est 1.5.4 (17 mars 2000).

[59] *SUN_CHART*™ est un logiciel DOS développé par Optical Physics Technologies, Idaho Falls, ID, USA.

l'informatique permet d'obtenir directement le tracé des trajectoires solaires, qu'il s'agisse d'un plan d'orientation quelconque ou d'une surface cylindrique.

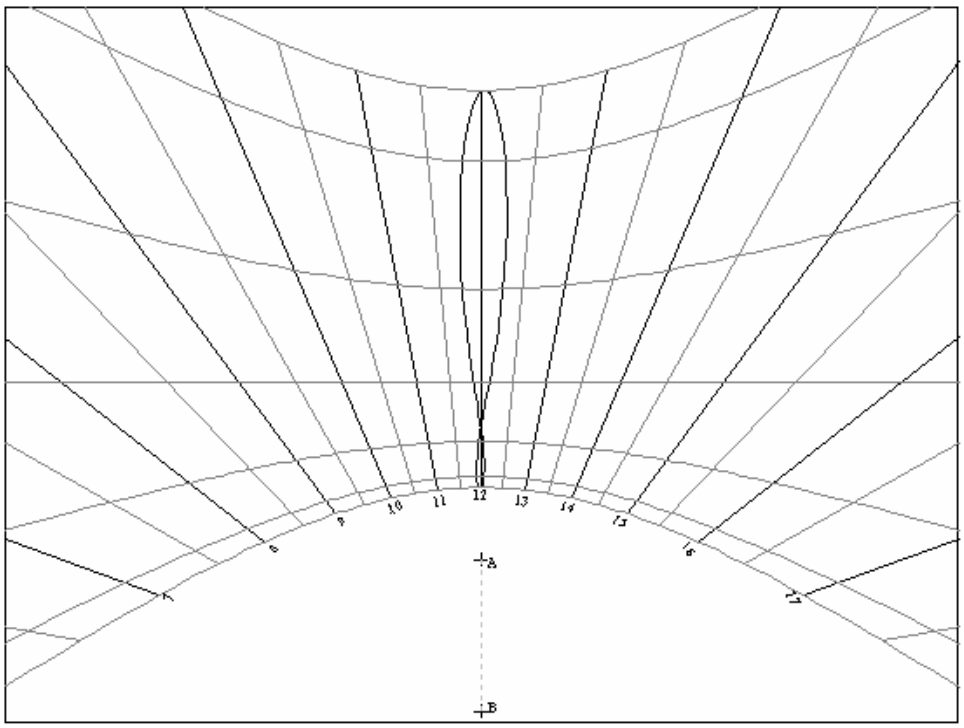


Fig. 73. Principe du cadran solaire et cadran solaire horizontal tracé par le logiciel *Shadows* pour une latitude de 47° 13' (Nantes) ; les graduations sont effectuées en heures solaires (la correction est de +66 min 12 s pour obtenir l'heure locale).

Contrairement aux produits précédents, qui ne font que tracer les trajectoires solaires en un lieu donné, l'outil Townscope II, développé à l'université de Liège[60], permet la superposition de ces trajectoires à une vue perspective du site (issue d'un fichier DXF généré par un modeleur quelconque) ; plusieurs types de projection sont disponibles : perspective à partir d'un point donné, sphérique, stéréographique. Ses domaines d'application concernent avant tout l'analyse géométrique (qualités perceptives de l'espace urbain) et l'aide à la prise de décision en phase amont du projet urbain ; il dis-

[60] Laboratoire d'Etudes Méthodologiques Architecturales (LEMA), Université de Liège, Belgique ; informations à l'adresse http://www.lema.ulg.ac.be/tools/townscope

pose également de modules d'analyse du confort thermique, ou permet encore d'évaluer les risques d'inconfort dus aux effets du vent dans des dispositions urbaines critiques.

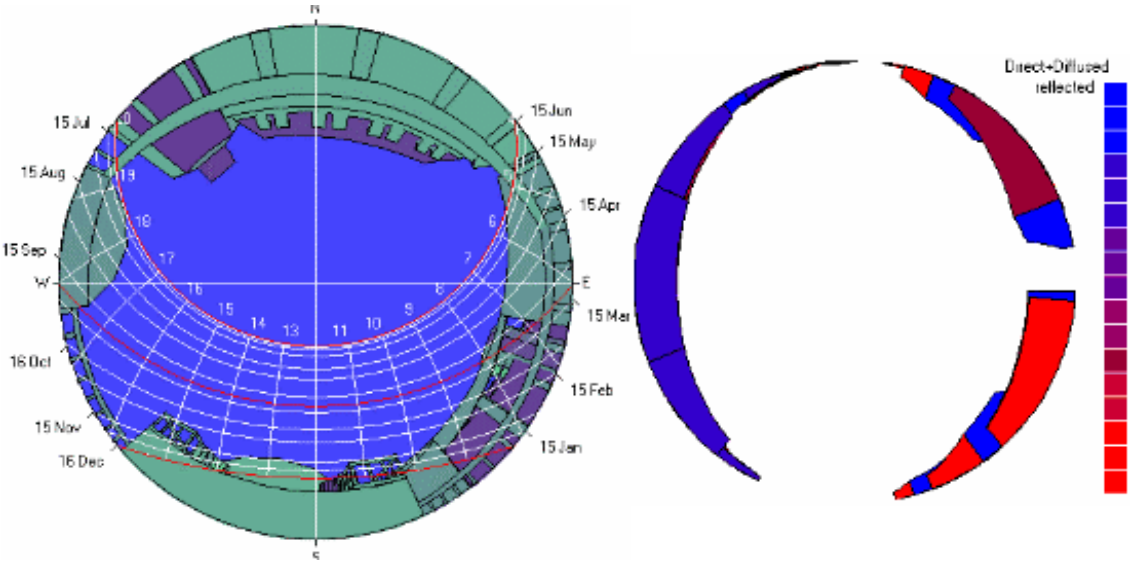


Fig. 74. Townscope II : à gauche, projection stéréographique du site et superposition des trajectoires solaires ; à droite, cartographie de l'énergie solaire totale reçue par les façades d'un site urbain.

On peut considérer que les projections stéréographiques conjointes des trajectoires solaires et du site ou bien l'héliodon « informatique », constituent déjà de véritables méthodes de simulation numériques dans la mesure ou ils nécessitent une maquette tridimensionnelle du site ou du dispositif architectural à étudier. La « vue héliodon » consiste à situer l'observateur en lieu et place de l'astre solaire, et à réaliser une projection axonométrique (parallèle) sur le plan horizontal. On a vu que le logiciel SOLENE est capable de réaliser un héliodon numérique à partir d'une maquette tridimensionnelle (chapitre 2) ; *a priori* nombre de logiciels de CAO/DAO ou d'imagerie ont également cette possibilité, encore qu'il réalisent plus exactement une « vue héliodon », et non pas un véritable héliodon numérique ; en effet la position du soleil reste souvent définie de manière plus ou moins arbitraire par son altitude et son azimut, alors que SOLENE permet de la déterminer à partir de la situation géographique (une latitude) et des données temporelles (date et heure). Il apparaît pourtant que cette fonction est de plus en plus présente dans les versions récentes des logiciels utilisés dans le monde de l'architecture, mais la préoccupation est relativement nouvelle.

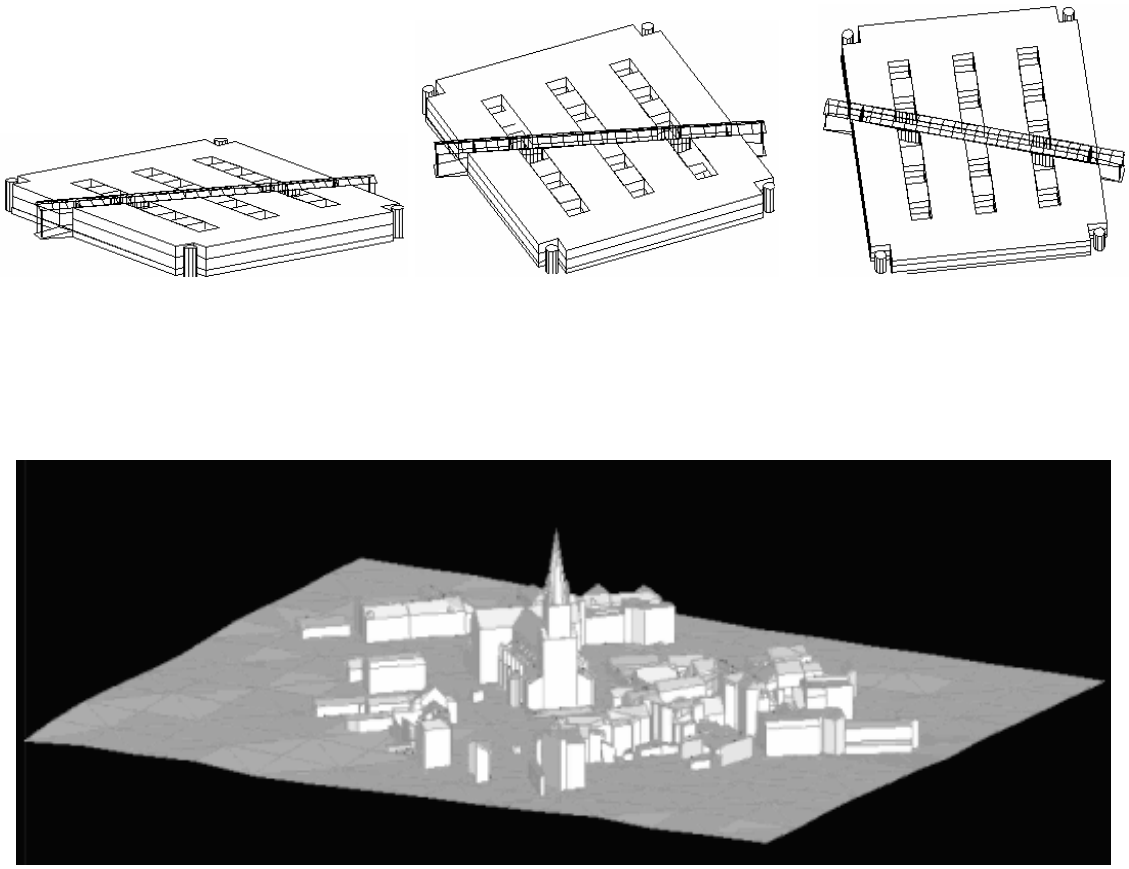


Fig. 75. En haut vue héliodon d'un bâtiment situé à Bernes (latitude 47° nord), aux solstices et aux équinoxes (21 décembre, 21 mars/septembre, 21 juin), à 12 heures solaires.
En bas héliodon numérique d'un site urbain (latitude 47°, le 21 décembre à 10 heures solaires).

5.4.3.2 Méthodes numériques proprement dites

Sous ce vocable sont regroupées toutes les méthodes de simulation, qui ne sont pourtant qu'une automatisation de calculs complexes ou itératifs, mais qui dépassent largement le domaine de la géométrie projective, seule « science » indispensable à la réalisation des tracés automatisés.

5.4.3.2.1 Les outils de « (re)présentation »

Il existe sur le marché un certain nombre d'outils logiciels permettant de « simuler » les objets du réel, ou encore d'expérimenter visuellement des formes qui n'existent pas encore au moment de la simulation (donc en projet...) ; ils ont été largement popularisés grâce à des animations virtuelles présentant des parcours d'architecture à l'intérieur de monuments partiellement ou totalement détruits (cathédrales par exemple), ou encore des survols de villes reconstituées à partir de fragments archéologiques, toutes ces cons-

tructions n'existant que sous forme de modèles numériques. Ces logiciels sont orientés au premier chef vers la production d'images de synthèse, et sont donc en ce sens très généralistes ; ils sont capables, grâce à de nombreuses primitives et à des outils modificateurs de plus en plus perfectionnés, de modéliser une scène tridimensionnelle « éclairée » par des lumières (virtuelles) et de l'afficher à l'écran selon les modes de représentation classiques de l'ingénieur ou de l'architecte (géométral, axonométrie, perspective conique). D'ailleurs les lumières sont virtuelles à tel point qu'elles n'apparaissent pas à l'écran même si elles sont situées dans le champ de vision de l'observateur ; d'autre part les logiciels offrent en général une multitude de possibilités quant au contrôle de la lumière : « puissance » de la source, couleur, direction des rayons lumineux, angle d'ouverture du cône de lumière, affaiblissement avec la distance – correspondant à l'affaiblissement réel ou non – , etc.). Mais ces possibilités multiples, si elles permettent de contrôler très finement les différents éclairages de la scène, se font toutes dans l'ignorance (au mépris ?) des lois physiques relatives au comportement des matériaux vis à vis de la lumière ; de plus ils ne permettent jamais de prendre en compte la lumière diffusée par la voûte céleste, et quant à celle dispensée par le soleil, elle est considérée sous des aspects géométriques exclusivement (lumière directionnelle aux rayons parallèles, correspondant à une position – plus ou moins – réaliste du soleil).

Finalement les images calculées par ces logiciels conduisent à des représentations dont l'objectif est de correspondre à une certaine culture visuelle des scènes lumineuses de l'architecture ; mais aussi flatteuses soient elles, ces images n'ont que bien peu de rapport avec la perception réelle du projet architectural sous des conditions lumineuses naturelles, et surtout interdisent toute analyse objective des niveaux d'éclairement. Utilisées durant la phase de conception, leur objet sera avant tout d'afficher une intention ; en phase ultime du projet, leur propos consistera essentiellement en la production d'images communicatives, voire persuasives…, essentiellement tournées vers la médiatisation du projet. Les ténors dans le domaine sont sans nul doute – et sans ordre particulier – 3D Studio Max 3.1 (Kinetix), Softimage 3.9 et XSI, LightWave 6 (Newtek), Maya 3.0 (Alias|Wavefront)...

Dans cette course au photo-réalisme[61] (mais encore faudrait-il s'interroger sur l'intérêt et surtout le sens de telles images en architecture...), les concepteurs de logiciels sont sans cesse à la recherche d'une meilleure « interaction » lumière/matière (outre les efforts concernant la modélisation des êtres vivants et de la végétation, tout deux extrêmement coûteux en temps de calcul) ; aussi les versions les plus récentes de ces divers logiciels intègrent souvent un module qui permet de simuler un comportement réaliste de la lumière (au sens physique du terme), mais encore une fois il ne permet aucune analyse précise de l'éclairement, et encore moins la mise en évidence de la morphologie du bâti sur son intensité et sa répartition. Il n'en reste pas moins vrai que c'est bien la

[61] Le terme même de « photo-réalisme » renvoie au soi disant « réalisme » de la photographie ; or on sait fort bien qu'il est illusoire dans la mesure où, sans même évoquer les multiples filtres et traitements disponibles, le cadrage peut à lui seul modifier de manière très importante la perception que l'on aurait de l'objet réel (voir à ce propos les photographies des revues d'architecture...).

commu-nauté infographique qui est à l'origine de la plupart des algorithmes de simulation de la lumière...

Sans prétendre à l'exhaustivité, les produits disponibles sur le marché qui disposent de modules élaborés de traitement des interactions lumineuses (et sans doute plus orientés vers la production architecturale que ne le sont les logiciels cités précédemment) se limitent à moins d'une dizaine ; les principaux d'entre eux sont à l'heure actuelle AccuRender[62], module de rendu par lancer de rayon et radiosité intégré à AutoCAD, Inspirer[63], Lightscape[64] (approche hybride lancer de rayon / radiosité), LightWorks[65] (lancer de rayon et radiosité), Lumen Micro[66], Renderpark[67], développé à l'université catholique de Louvain, etc..

On notera enfin qu'au-delà des aspects quelques peu abusifs et pervers que ces images peuvent éventuellement véhiculer (en raison de leur association immédiate à une forme d' « exactitude » et de maîtrise absolue du projet, elles portent en elles le risque de servir de « caution scientifique »), elles conservent pourtant un intérêt non négligeable en tant que support heuristique d'aide à la conception[68].

5.4.3.2.2 Les outils d'analyse

On évoquera dans cette section quelques codes dont l'objectif premier n'est pas le rendu mais une analyse des niveaux lumineux ; parmi ceux-ci le premier cité, RADIANCE, constitue sans doute une exception : bien que plutôt ciblé vers l'imagerie à ses origines, la qualité de ses algorithmes, son ouverture et sa disponibilité... gratuite (sous licence toutefois) ont incité de nombreux laboratoires (dépendant parfois d'écoles d'architecture) à son utilisation (c'est par exemple en France le cas du GAMSAU[69] à Marseille), et ce malgré les difficultés exposées plus loin. En outre certains d'entre eux ont proposé, dans le cadre d'applications spécifiques, des développements complémentaires, venant ainsi enrichir le produit.

---

[62] http://www.accurender.com/

[63] http://www.integra.co.jp/eng/products/inspirer/

[64] http://www.lightscape.com/

[65] http://www.lightwork.com/

[66] http://www.lighting-technologies.com/

[67] http://idefix.cs.kuleuven.ac.be/~graphics/RENDERPARK/

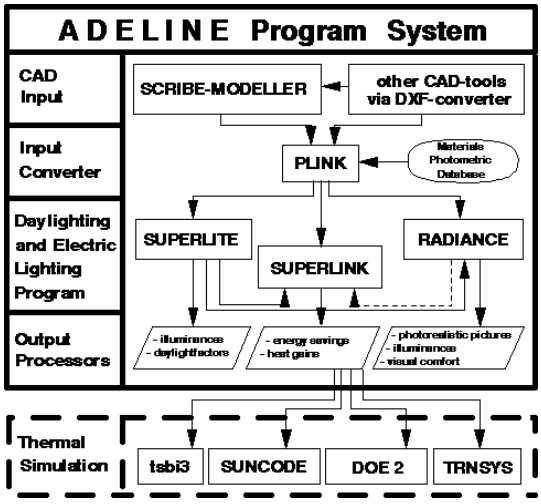
[68] Voir à ce propos Lescop L., *La représentation des ambiances architecturales et urbaines ; introduction à une pédagogie des ambiances*, Thèse de doctorat, 1999.

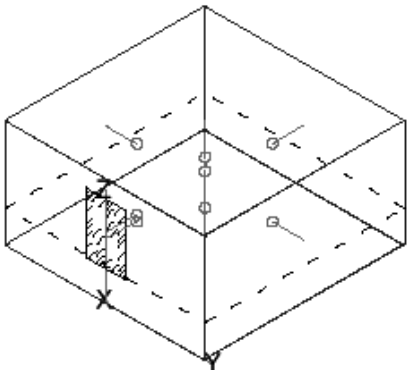
[69] Groupe d'études pour l'Application des Méthodes Scientifiques à l'Architecture et à l'Urbanisme.

- Radiance

RADIANCE[70] constitue sans doute le plus abouti et le plus utilisé parmi les codes d'imagerie conçus dans un laboratoire de recherche ; il s'agit d'un ensemble de programmes développés depuis plus d'une dizaine d'années par l'équipe de Greg Ward [82] au Lawrence Berkeley Laboratory (Californie). Cet ensemble comporte plusieurs dizaines de programmes indépendants écrits en langage C qui fonctionnent sous système UNIX en mode commande uniquement, ce qui rend le produit peu convivial et d'un apprentissage plutôt laborieux. Parallèlement à celle de G. Ward, une équipe du Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (E.P.F.L.) en propose une version sous MS-DOS dans un « package » qui inclue le modeleur SCRIBE MODELLER, une base de données permettant d'assigner des propriétés photométriques aux matériaux (PLINK), les données climatiques (PLINK), un programme simplifié d'analyse de la lumière naturelle (SUPERLITE), et enfin RADIANCE ; cet ensemble, baptisé ADELINE[71], peut encore être complété par d'autres modules susceptibles d'effectuer le lien vers des outils d'évaluation de l'énergie (SUPERLINK ou RADLINK).

Qu'il s'agisse de RADIANCE ou de ADELINE, la prise en compte réaliste de la lumière naturelle peut être effectuée à condition de compléter cet ensemble par le module GENSKY (programme C également), qui permet de modéliser à la fois le soleil et différents types de ciels.





[70] L'ensemble RADIANCE est disponible au LBL à l'adresse suivante : http://radsite.lbl.gov/radiance ; le code source est compilable sous UNIX (SGI et SUN), la dernière version disponible (janvier 1998) portant la référence 3.1.8.

[71] ADELINE est également disponible au LBL à l'adresse : http://radsite.lbl.gov/adeline.

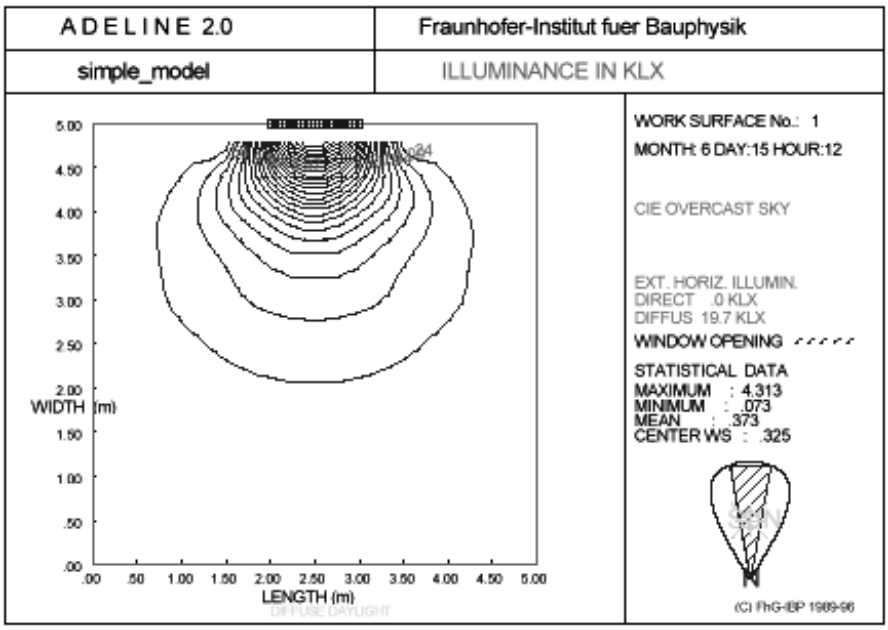


Fig. 76. Page précédente à gauche, synoptique des modules et des fonctions de Adeline 2.0 ; page précédente à droite, modèle de pièce parallélépipédique munie d'une ouverture ; en bas, la même pièce en plan avec le tracé des isocontours correspondant à l'éclairement lumineux naturel sur un plan horizontal.

Depuis très peu de temps (1999), une autre équipe du LBL, en collaboration avec le Pacific Energy Center, propose pour l'univers Windows le logiciel DESKTOP RADIANCE[72], ensemble assurant l'intégration de RADIANCE au très fameux AUTOCAD, ce dernier permettant à la fois de simplifier et d'enrichir un processus de modélisation jusqu'alors très fastidieux, puisque concerné par le mode commande également ; il était néanmoins possible de contourner cet obstacle en utilisant un modeleur extérieur complété par une conversion du fichier au format RADIANCE – plusieurs convertisseurs DXF/RADIANCE ont d'ailleurs été développé, avec toutefois des bonheurs divers... En effet la procédure pose toujours plusieurs types de problèmes ; en premier lieu l'orientation de la normale aux facettes, qui reste aléatoire si le logiciel de modélisation produit des facettes non orientées ; même avec les convertisseurs les plus performants subsistent certaines erreurs, qui sont souvent difficiles à identifier et donc à corriger. En outre les surfaces courbes élémentaires (des primitives telles que cylindre, cône, sphère...) sont définies par facettes triangulaires dans les programmes CAD, alors qu'elles sont représentées par leur équation dans RADIANCE, simplifiant d'autant l'intersection d'un rayon lumineux

[72] DESKTOP RADIANCE est disponible à l'adresse http://radsite.lbl.gov/deskrad/ ; à l'heure actuelle (septembre 06), la version disponible est référencée 1.02, est compatible avec AUTOCAD 14, 2000 et 2000*i*, et fonctionne sous les systèmes Windows 9x et NT.

avec cette surface ; ce problème d'intersection est ainsi très rapide à résoudre, alors qu'une représentation par facettes oblige à des tests multiples, impliquant des temps de calcul beaucoup plus importants ; et le problème surgit donc pour toute surface courbe... Le passage par l'interface DESKTOP RADIANCE présente dans ce domaine un avantage certain puisque la plupart des objets du moteur 3D ACIS d'AUTOCAD sont reconnus par RADIANCE, même si certains d'entre eux ne bénéficient pas encore de cette compatibilité (c'est le cas du tore par exemple, ou encore des opérations booléennes).

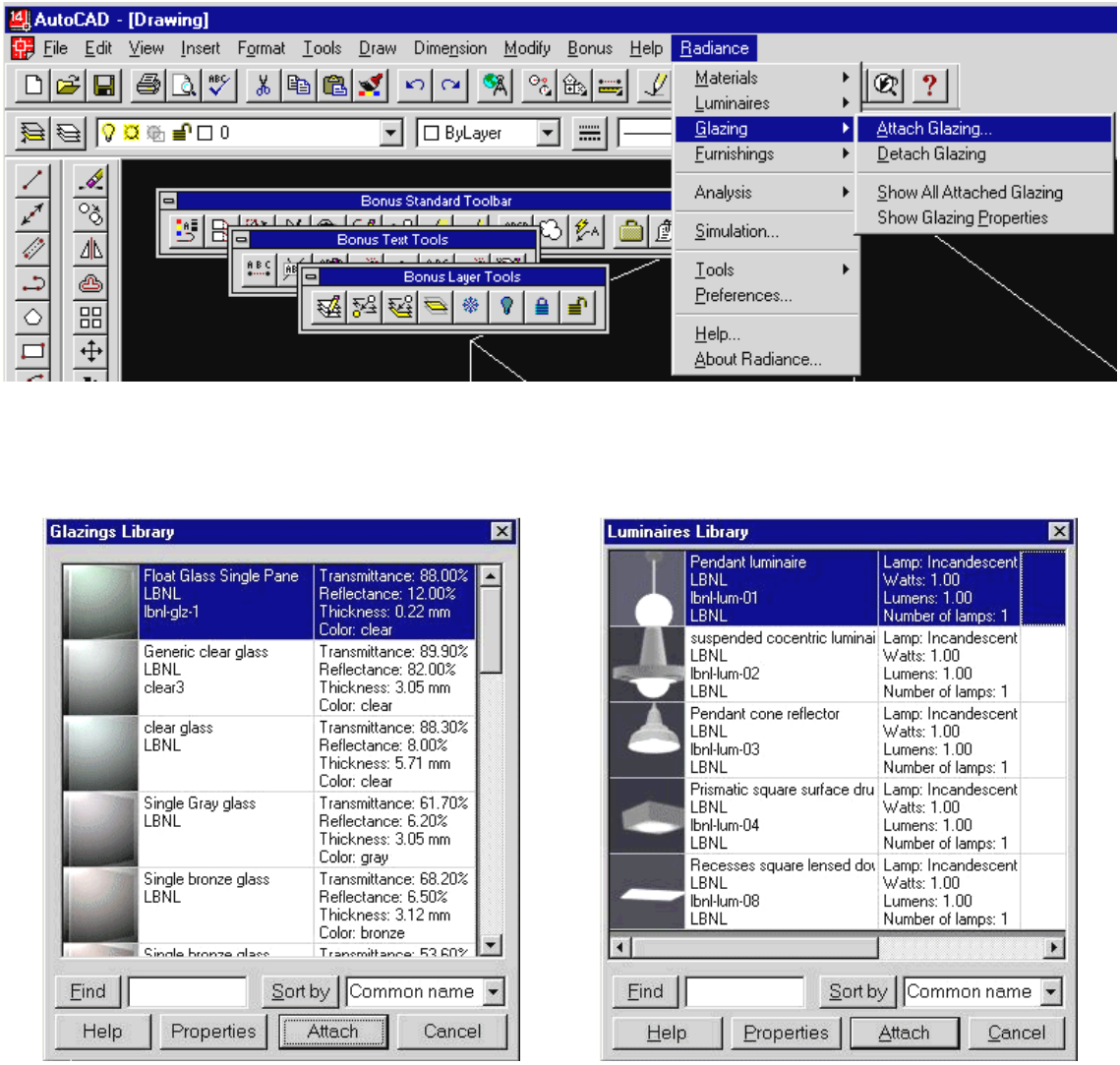


Fig. 77. Menu RADIANCE intégré à la barre de menu d'AUTOCAD ; en bas les librairies de vitrages (la normale au vitrage doit impérativement être orientée vers l'intérieur du local), et de luminaires (DR dispose également d'une librairie de mobilier !).

En revanche, RADIANCE apporte, par rapport aux logiciels d'imagerie, des avancées significatives dans le traitement de la lumière puisqu'il propose, en plus du lancer de rayons classique, une évaluation de la réflexion diffuse à partir d'une méthode de lancer de rayons aléatoires itérative (méthode de Monte-Carlo), qui adapte la densité des points de calcul à la variation de la composante diffuse indirecte, dont l'évolution est en général assez lente ; une interpolation linéaire termine le processus. Les sources de lumière artificielles ont cette fois une existence « réaliste » ; il ne s'agit plus de sources ponctuelles invisibles lors du rendu, mais d'objets tridimensionnels quelconques auxquels sont affectés des types de sources prédéfinis. RADIANCE peut également utiliser les données photométriques fournies par les constructeurs d'appareils d'éclairage ; les caractéristiques d'une cinquantaine de dispositifs d'éclairage différents au standard IES[73] peuvent être convertis au format RADIANCE (ASCII). La précision et la rigueur de RADIANCE dans le traitement de la lumière – plusieurs publications en font état – ont conduit en quelque sorte à son « appropriation » par divers laboratoires d'écoles ou d'universités d'architecture, et en conséquence au développement de multiples programmes complémentaires. Certains concernent spécifiquement la problématique architecturale, et plus particulièrement la prise en compte de la lumière naturelle. Parmi ceux-ci on peut citer le programme GENSKY, conçu et écrit par Jean-Jacques Delaunay [15] ; son propos est de considérer cette fois de manière sérieuse l'éclairage naturel, en envisageant les sources directe et diffuse que sont le soleil et le ciel, ce dernier à partir du modèle de distribution de Perez – voir la section 6.6.6).

Les modules de calcul du logiciel permettent évidemment de restituer une image « photoréaliste », mais aussi d'afficher les niveaux de luminance sur les différentes surfaces de la scène (Fig. 78.), ou d'y représenter les contours d'isoluminance (Fig. 79.), ou encore d'y indiquer ponctuellement la valeur de l'éclairement lumineux en lux (Fig. 80.). Malgré ce potentiel analytique, il est clair que la fonction première de RADIANCE est nettement orientée vers le rendu « photo-réaliste » (dans le vrai sens du terme cette fois), bien plus que vers des aspects analytiques *stricto sensu*. Il s'agit donc d'un produit plutôt généraliste, n'ayant à l'origine aucune spécificité vis à vis du domaine architectural ; comme précisé dans l'introduction, ce sont avant tout ses qualités concernant le traitement de la lumière qui l'ont fait adopter par de nombreux laboratoires au sein des écoles et universités d'architecture ; en revanche très peu d'architectes l'utilisent en raison de la lourdeur de la modélisation et de son fonctionnement sur station de travail, aspects que le produit DESKTOP RADIANCE (lien avec AUTOCAD + système d'exploitation Windows) pourrait amener à changer radicalement, puisque nombre de projets utilisent AUTOCAD comme système de DAO ; il reste néanmoins indispensable de dépasser les limitations de l'actuelle version de développement.

[73] Illuminating Engineering Society.

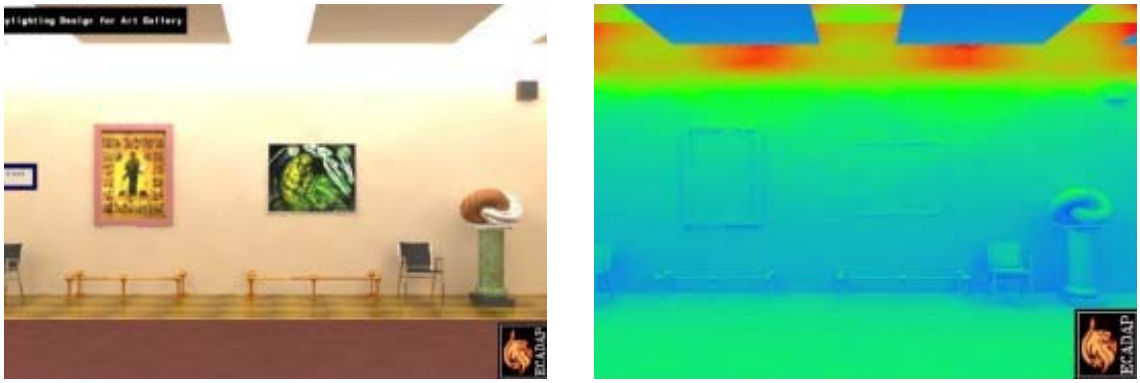


Fig. 78. RADIANCE : à droite, rendu en « fausses couleurs » de la scène de gauche, permettant une évaluation visuelle des niveaux relatifs d'éclairement lumineux (en lux) ; ici, mise en évidence d'une relative homogénéité sur la hauteur « utile » – l'intervalle moyen dans lequel se situent la plupart des tableaux.

Fig. 79. RADIANCE : contours d'isoluminance superposés au rendu « photoréaliste » ;
On notera que la lecture des contours d'isoluminance sur une scène d'une telle complexité (c'est-à-dire avec de nombreux éléments amenant ombres propres et ombres portées) devient assez difficile, d'autant plus que la multiplicité de ces contours au niveau du piétement des tables à dessin n'apporte aucune information significative ; ce mode de représentation convient davantage à la mise en évidence d'un gradient de luminance sur le sol, les parois, ou sur un plan de travail.

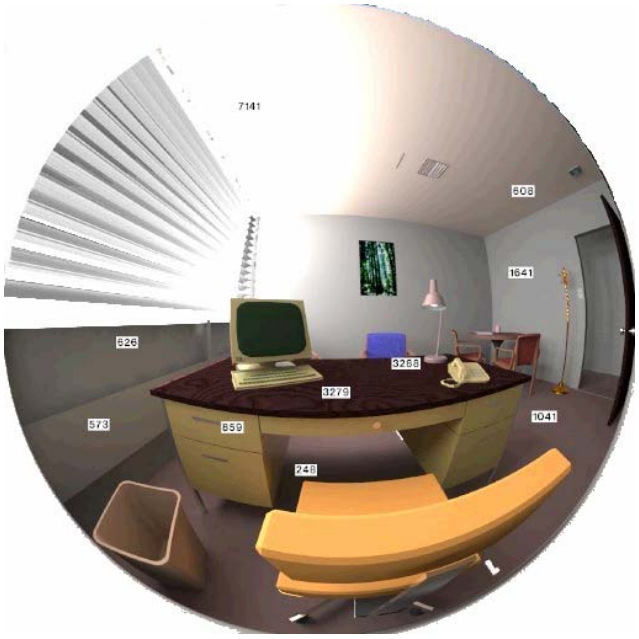


Fig. 80. RADIANCE : éclairements lumineux ponctuels sur une vue très grand angle de la pièce ; la valeur en lux est affichée instantanément après sélection d'un point à l'écran.

- Génélux

Parmi les quelques autres codes existant, on peut citer GENELUX-*R* et GENELUX-*WEB* (version simplifiée de la précédente disponible en ligne), tous deux développés au LABoratoire des Sciences de l'Habitat de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (LASH/ENTPE) à Lyon, dirigé par Marc Fontoynont ; le logiciel utilise la technique de suivi de rayons (*ray-tracking*) de la source vers les surfaces, associée à une méthode de Monte-Carlo pour les réflexions diffuses (Fig. 81.).

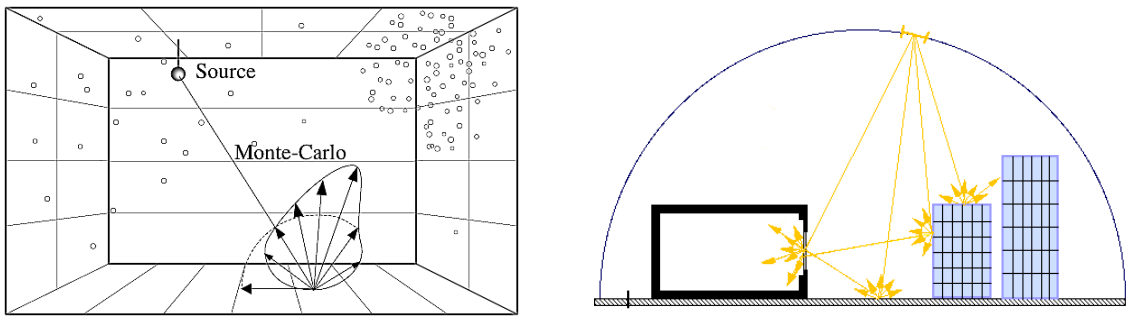


Fig. 81. Principes utilisés dans Génélux : à gauche, la très classique méthode de Monte-Carlo ; à droite, génération de rayons lumineux depuis la source vers les éléments de surface de la scène (*ray-tracking*), au contraire de RADIANCE, qui lance les rayons de la scène vers les sources de lumière (*backwards ray-tracing*).

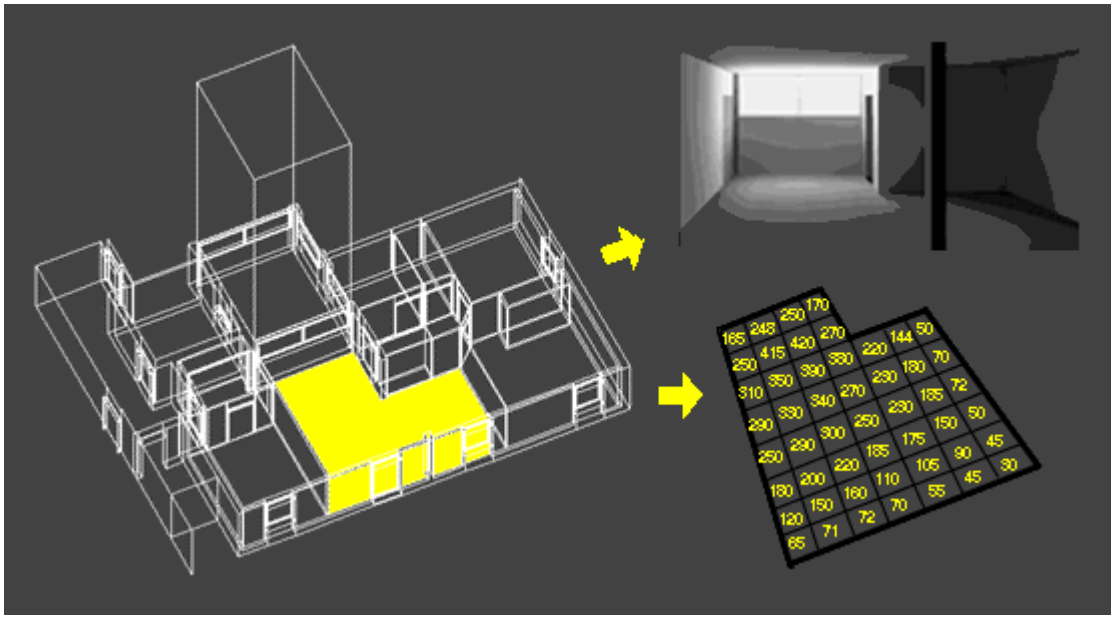


Fig. 82. Génélux, l'une des pages Internet détaillant les possibilités du logiciel.

- Gin

On peut citer également le logiciel GIN, développé par les chercheurs du CSTB[74]. GIN a notamment été utilisé pour étudier l'efficacité des stores en toile de la salle des peintures italiennes du musée du Louvre, les effets de reflets sur les tableaux situés en face des fenêtres et les effets de contre-jour pour ceux situés en dessous des fenêtres, ou encore pour l'étude des ambiances lumineuses de tunnels autoroutiers et la visualisation du vieillissement des matériaux.

- Good Lux

On trouve également référencé au CSTB des travaux publiés en 1991[75], prémices d'un logiciel nommé actuellement GOOD LUX, et dont le développement a été poursuivi par le même auteur[76]. Le produit est clairement orienté vers le rendu photo-réaliste et donc

---

[74] Contact : Laurent David, CSTB, BP 82341, 44323 Nantes cedex 3 ; email : david@cstb.fr

[75] P. TELLIER, Synthèses d'images réalistes (simulation d'éclairage intérieur et extérieur mixte), CSTB Nantes, 1991.

[76] P. TELLIER, LSIIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection), Université Louis Pasteur, Strasbourg.

la visualisation d'ambiances lumineuses plutôt que vers l'analyse, mais il permet tout de même, à l'instar de RADIANCE, d'afficher la valeur des contours d'isoluminance directement sur les surfaces de la scène. Il prend également en compte les ciels normalisés CIE et permet de traiter les scènes extérieures et intérieures, ou plus exactement les scènes extérieures *ou* les scènes intérieures : en effet, dans un souci de simplification et donc d'économie de calcul, les fenêtres (les interfaces) sont traitées comme des sources de lumières parfaitement diffuses, comme le montre très clairement la Fig. 83.

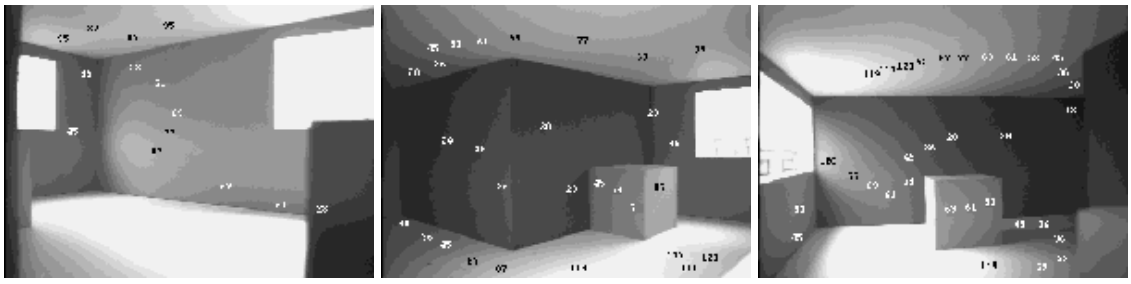


Fig. 83. Simulations d'un espace intérieur effectuées avec le logiciel GOOD LUX, avec valeurs des contours d'isoluminances. On remarquera les « fenêtres » traitées sous forme de sources parfaitement diffuses (voir texte ainsi que la section 8.3.1.1).

Malheureusement cette simplification a pour effet de dissocier totalement la relation extérieur/intérieur et de considérer les apports lumineux comme indépendants de la morphologie du bâti extérieur (même si la luminance « moyenne » de l'ouverture dépend effectivement de l'ensemble des éléments du bâti susceptibles de réduire le flux parvenant à sa surface, il n'est tenu aucun compte de leur disposition...).

- Autres outils

Sont référencés dans cette section des outils qui ne peuvent s'inscrire dans la catégorie précédente dans la mesure où les simulations qu'ils proposent restent relativement basiques et ne s'adressent qu'à des géométries très simplifiées ; il s'agit presque essentiellement d'outils à vocation didactique, à l'exception peut-être du second d'entre eux (*Building Design Advisor*) qui, d'après la description qu'en font leurs auteurs, paraît avoir une vocation différente et une ambition plus étendue à terme – dans l'immédiat ses potentialités le situent dans la catégorie des autres produits listés.

Il est bien évident que les quelques produits décrits ci-dessous ne constituent pas un panel exhaustif ; néanmoins ces logiciels sont assez représentatifs d'une tendance qui semble s'amorcer à l'heure actuelle : fort de l'expérience du développement et de l'utilisation de produit lourds et complexes, plusieurs laboratoires de recherche, le plus

souvent affiliés à des écoles d'architecture, où la préoccupation majeure est d'intéresser la communauté architecturale (étudiants, praticiens, maîtres d'ouvrage, etc.) à la prise en compte des ambiances dans le projet, infléchissent leur production logicielle vers des outils beaucoup plus simples et rapides d'utilisation, ne pouvant traiter que des configurations élémentaires mais par contre très démonstratifs. L'intérêt de tels produits est donc loin d'être négligeable sur le plan de la compréhension de certains phénomènes simples de la physique du bâtiment, notamment dans le cadre de l'enseignement.

- DIAL

Leso-DIAL est un « outil informatique d'aide à la décision » dont l'objectif est de fournir des informations qualitatives et quantitatives en phase amont du processus de conception ; il est développé à l'École Polytechnique de Lausanne depuis les années 1995 par B. Paule et J.-L. Scartezzini[77]. Il s'agit sans doute du plus simples des outils présentés dans cette section, facilement accessible au non-physicien ; son propos est le calcul du facteur de lumière du jour (sur des pièces rectangulaires exclusivement, de plus discrétisées assez grossièrement), ainsi qu'une évaluation de l'autonomie en éclairage naturel (à partir des climats suisses...). Le logiciel fait appel à une technique nouvelle de programmation, basée sur la logique floue, facilitant l'établissement du diagnostic et l'élaboration de conseils. Si son utilisation reste limitée à des géométries très simples, son aspect didactique allié à une grande facilité d'utilisation en font un produit particulièrement intéressant dans le cadre de l'enseignement.

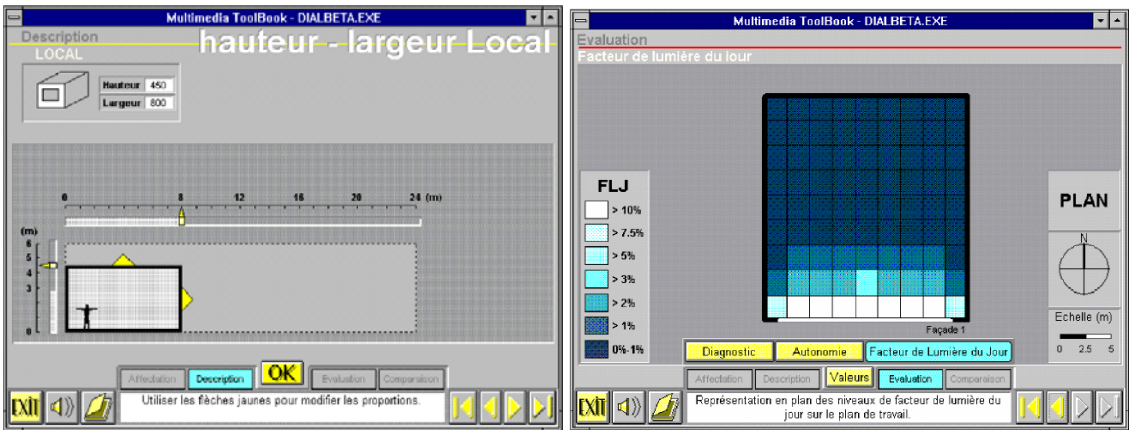
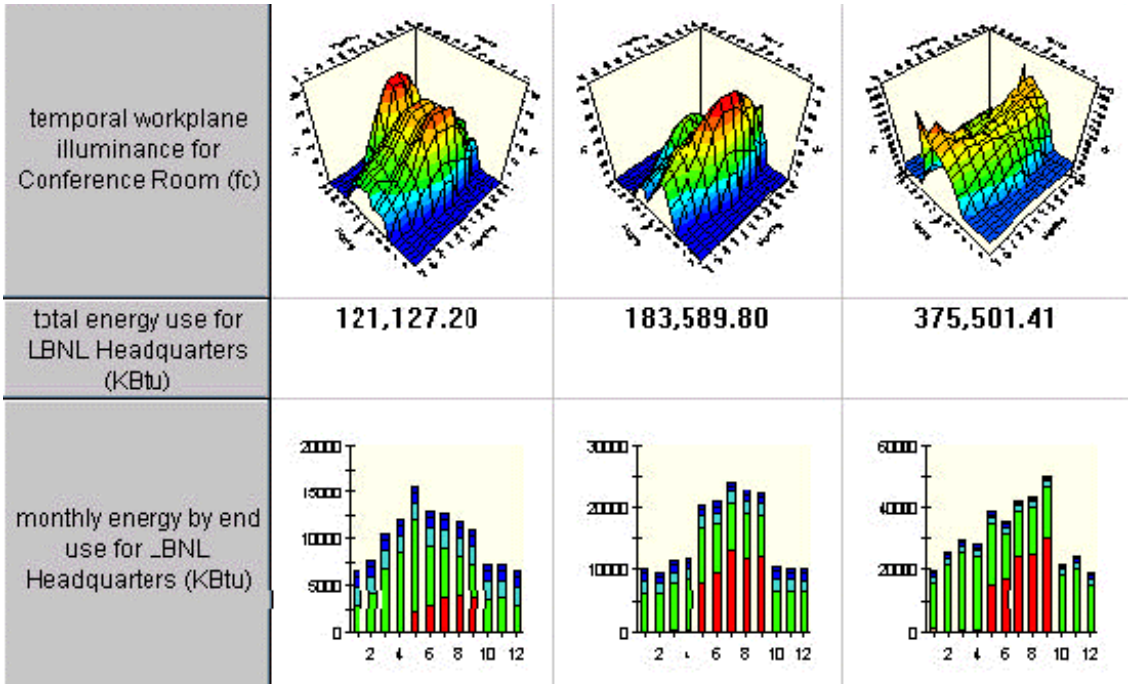


Fig. 84. L'utilisateur définit les dimensions de la pièce ainsi que la taille et le nombre des ouvertures (à gauche) ; à droite un écran résultat correspondant au calcul du facteur de lumière du jour dans le local ; en outre le programme propose des commentaires de type qualitatif (dans l'exemple ci-dessus une profondeur de pièce trop importante).

[77] Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL - LESO-PB) ; adresse Internet http://lesomail.epfl.ch/francais/Leso_f_software_lesodial.html

- Building Design Advisor

Le BDA[78] est un environnement logiciel qui intègre, selon les auteurs du produit, des « outils d'analyse et de visualisation intéressant l'ensemble du processus de conception, depuis les phases initiales jusqu'au spécification précises des composants et des systèmes ». Son propos est en premier lieu une intégration automatisée de divers outils de simulation et de bases de données intéressant le domaine de la construction : aspects lumineux, transferts thermique, flux aérodynamiques... ; mais les outils d'analyse lumineuse restent pour l'instant assez sommaires, et des liens vers les procédures de calcul de DOE-2 (pour l'analyse thermique et l'estimation des coûts énergétiques), ainsi qu'à celles de Radiance (pour l'analyse lumineuse et le rendu) sont actuellement en projet. Vouloir fédérer ces différentes simulations paraît fort intéressant, mais il nous semble qu'il s'agit là d'un projet extrêmement ambitieux ; en effet les méthodes de simulation dans les différents champs visés diffèrent énormément, certains aspects demandant une attention particulière (niveau de détail, texture et couleur des matériaux), qui dépendent précisément du domaine étudié. Il semblerait donc que le produit tende à vouloir s'éloigner de sa vocation didactique initiale (mise en relation et comparaison de différentes configurations simples) pour ne plus constituer qu'une sorte d'interface commune à divers types de simulations externes, avec les risques qui viennent d'être évoqués.



[78] Le Building Design Advisor est développé par K. Papamichael, J. La Porta et H. Chauvet, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory ; voir http://kmp.lbl.gov

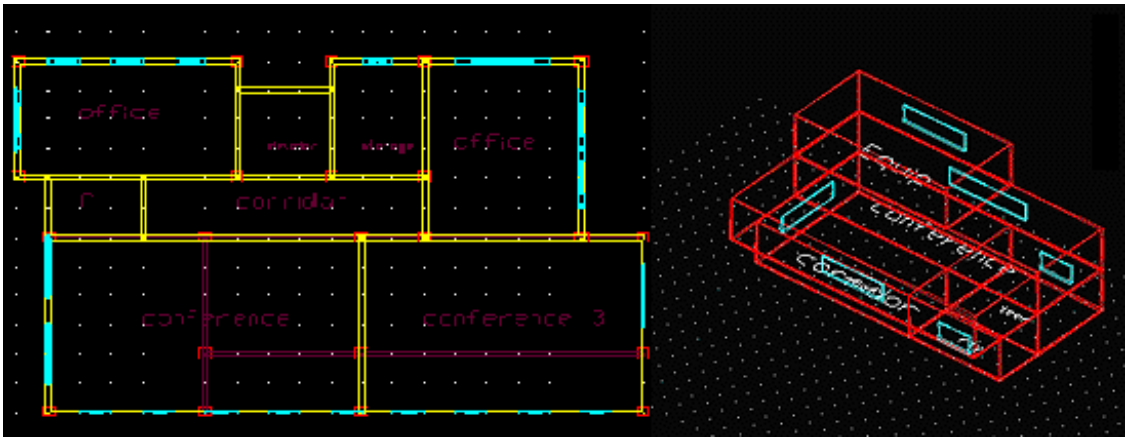


Fig. 85. Building Design Advisor : page précédente, le module *Decision Desktop*, qui permet de confronter les résultats de plusieurs configurations ; ci-dessus le module *Schematic Graphic Editor*, qui permet la modélisation de configurations simples (espaces parallélépipédiques essentiellement).

- DIAS[79]

DIAS (Données Interactives d'Architecture Solaire) est développé au Centre Universitaire d'Étude des Problèmes de l'Énergie (CUEPE) de l'université de Genève ; il consiste en un outil interactif qui réunit une base de données, un dictionnaire, et une boîte à outils. La base de données propose la présentation d'une vingtaine de projets exemplaires (documentation photographique, plans, détails, concept, analyse énergétique, simulation 3D) ; le dictionnaire, concentré sur le thème de l'énergie est structuré selon les phases de conception et de réalisation du projet architectural (type d'affectation, volumétrie, ensoleillement, éclairage naturel, principes et dispositifs d'architecture solaire, etc.). Quant à la boîte à outils, elle comporte un ensemble de modules interactifs d'aide à la conception de bâtiments à basse consommation d'énergie (bilan énergétique, calcul du coefficient *k*, évaluation d'ombres portées, analyse des consommations de bâtiments existants, conversion d'unités, comparaison des bilans énergétiques de plusieurs projets.

Il ne s'agit pas à proprement parler d'un outil de simulation susceptible de traiter des configurations complexes, mais davantage d'une approche à caractère didactique dont l'essentiel des information est de type qualitatif ; si les simulations restent basiques (pièces rectangulaires uniquement), elles n'en demeurent pas moins très démonstratives,

[79] Dias est développé pour le système d'exploitation MS Windows ; la version disponible à l'heure actuelle est référencée 2.0 ; une version de démonstration bilingue (français et allemand), mais (très) limitée est disponible à http://www.unige.ch/cuepe/energet/dias.html

ce qui rend le produit facile à aborder, même pour un utilisateur sans compétences particulières dans ces domaines.

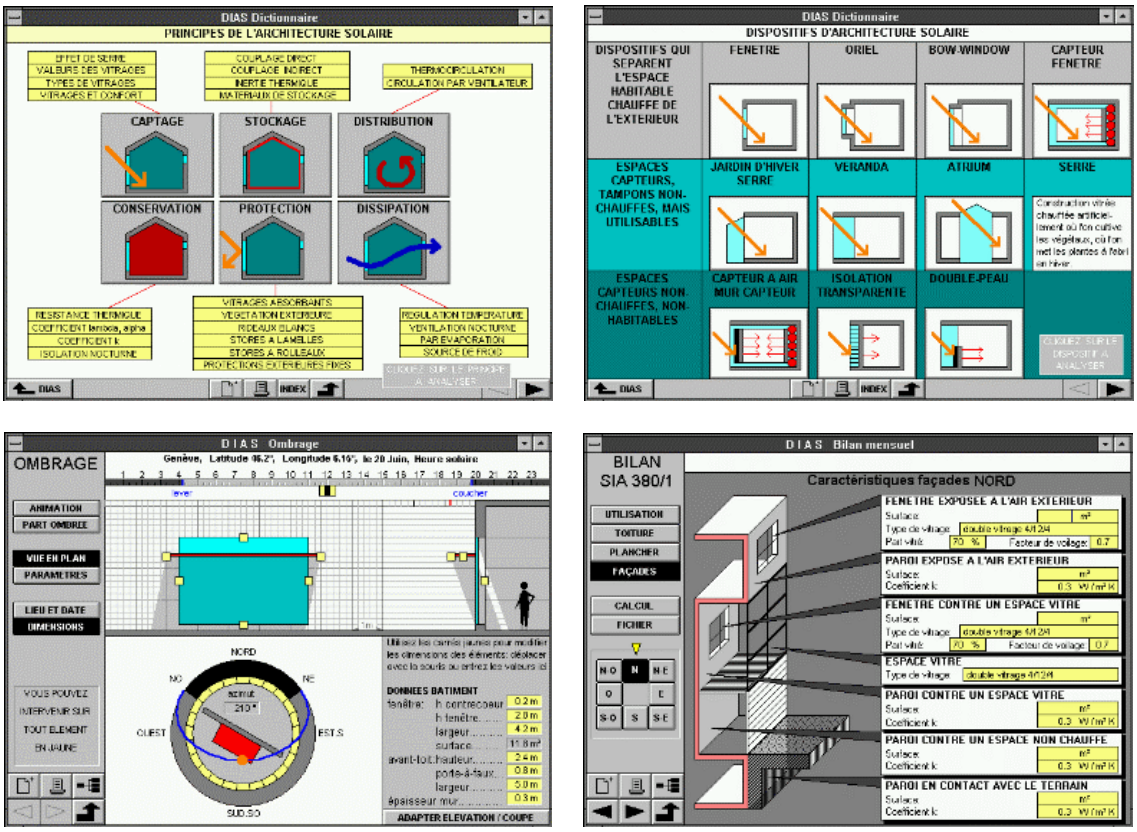


Fig. 86. Quelques écrans DIAS (de gauche à droite et de haut en bas) : Principes de l'architecture solaire ; dispositifs d'architecture solaire ; évaluation des ombres portées de balcons et d'avant-toits pour différentes saisons ; bilan énergétique.

- Les outils solaire *Audience*

Audience est un projet européen (programme Léonardo) d'auto-formation à distance, qui vise en premier lieu les secteurs du bâtiment, de l'environnement, de la réhabilitation (architectes, maîtres d'ouvrages, bureaux d'étude...) ; il se traduit concrètement par un site Internet donnant accès à différents types d'informations relatives au contrôle des ambiances dans le projet architectural ; elles concernent l'ensoleillement, l'éclairement naturel, l'acoustique, la ventilation naturelle et la thermique. Le site est organisé autour de quatre axes principaux : la formation, elle-même déclinée en quatre rubriques (référence, dispositif, effet, théorie) ; des outils de travail interactifs susceptibles de fournir à l'utilisateur des solutions dans le cadre du projet ; des exercices d'application ; un forum de discussion (échange d'informations, avis et envies des utilisateurs...). Ce sont

évidemment les outils interactifs qui nous intéressent ici, qui sont pour l'instant orientés essentiellement vers les aspects solaires.

L'intérêt majeur d'une telle approche, et plus particulièrement des outils qui viennent d'être évoqués, réside, sur le plan didactique, dans l'aspect interactif que leur confère une programmation utilisant les classes Java ; les différents paramètres des simulations (géométries simplifiées, lieu, temps, caractéristique des matériaux, etc.) sont donc choisis par l'utilisateur, qui peut ainsi proposer à la simulation sa propre configuration, sans doute quelque peu simplifiée, néanmoins voisine dans ses principes généraux. Comme on vient de l'évoquer, ces outils doivent rester, dans l'état actuel de la technologie, relativement simples, ou tout au moins ne nécessiter que des échanges de données assez « légers » puisque les communications via Internet restent très limitées en termes de vitesse d'échange des informations – à moins d'installations spécifiques encore très onéreuses – ; mais on peut raisonnablement penser que la technologie permettra, d'ici quelques années, des échanges plus importants en volume et rapidité, de telle sorte que des propositions similaires sont sans doute amenées à se développer. L'autre intérêt essentiel d'une telle approche est sa totale indépendance vis à vis du système d'exploitation « local », c'est-à-dire celui de l'utilisateur final. Nombre de concepteurs de logiciels, et non des moindres, travaillent actuellement en ce sens, dans la mesure où le portage d'une même application sur plusieurs systèmes différents (le plus souvent Unix, Windows NT et Mac OS) revient extrêmement cher et ne réussit jamais à lever toutes les incompatibilités...

Pour en revenir au site *Audience*[80], hébergé et développé dans sa majeure partie par le CERMA, l'utilisateur dispose, dans la phase actuelle de développement, de cinq outils solaires interactifs :

- *Info_Solaire* fournit des informations relatives à la position du soleil (hauteur, azimut, déclinaison, heures de lever et coucher, trajectoire solaire) en fonction de la latitude du lieu, de la date et de l'heure. Les résultats sont fournis sous forme de tableaux de valeurs ainsi que de graphiques (notamment la longueur et la direction de l'ombre portée d'une tige verticale sur un plan horizontal).

- *Info_Récepteur_Solaire* permet d'obtenir des informations d'ensoleillement et d'énergie solaire pour un récepteur plan d'inclinaison et d'orientation quelconque. Sont distinguées les composantes du flux solaire (directe, diffuse, et globale), ainsi que les caractéristiques du matériau récepteur, qu'il s'agisse d'un matériau opaque ou d'un vitrage (avec ses coefficients de réflexion, absorption, et transmission).

- *Ecran_Solaire* a pour objet l'évaluation des protections solaires placées devant un vitrage. En combinant divers types d'écrans, l'utilisateur peut composer un brise-

[80] Ce projet comporte sept partenaires, l'organisme contractant étant le CNRS ; son site Internet a pour adresse http://audience.cerma.archi.fr/index.html

soleil particulier. Le programme évalue ensuite l'efficacité de la protection sous forme d'un facteur de masque et d'une valeur de flux solaire transmis par le vitrage muni de sa protection (Fig. 87. en haut).

- *Lames_Parallèles_Solaire* permet de tester rapidement l'efficacité des brise-soleil constitués de lames parallèles, en fonction de la géométrie des lames (largeur, espacement), de leur inclinaison et de l'orientation du bâtiment. Les principaux résultats obtenus le sont en termes de degré d'occultation (surface masquée, en pourcentage, du panneau vitré situé en arrière des lames parallèles), et de flux solaire atteignant le vitrage (comparaison des cas avec lames et sans lames) (Fig. 87. en bas).

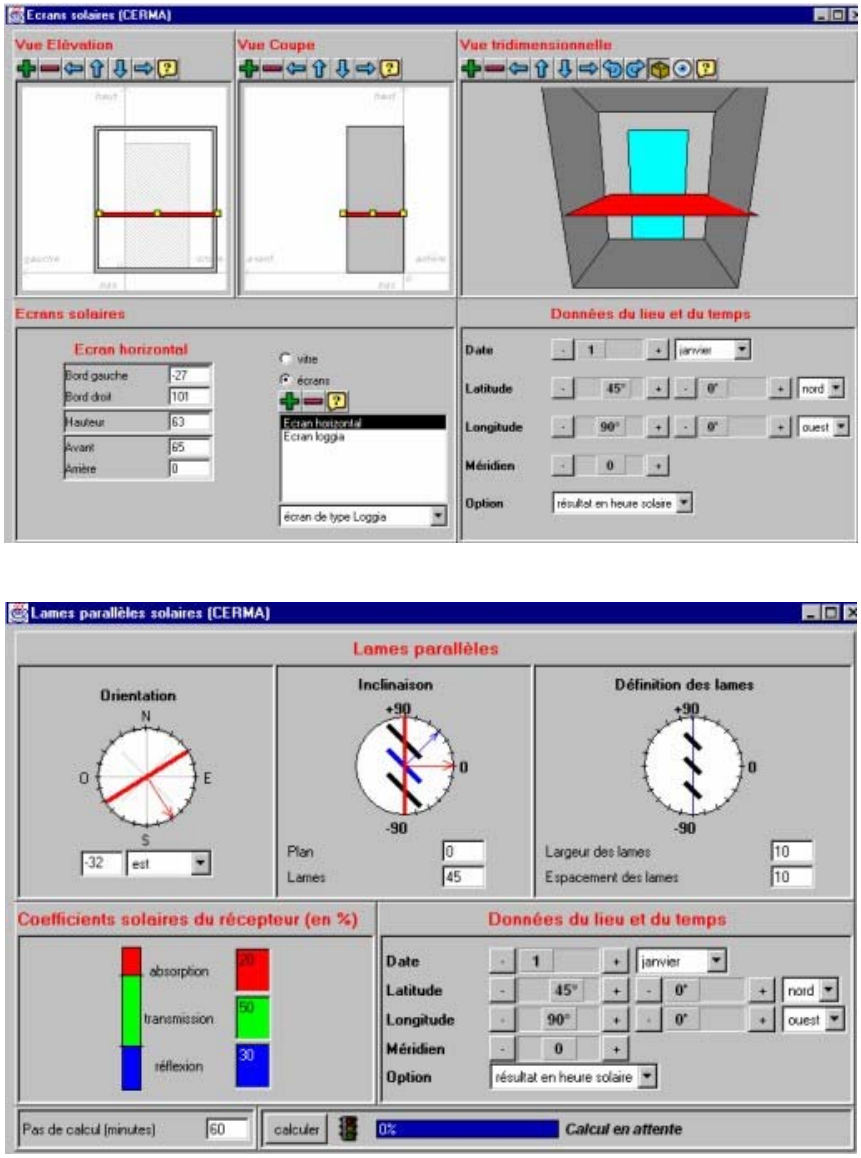


Fig. 87. En haut, l'écran de définition des paramètres de l'outil *Ecran_Solaire* ;
en bas, l'écran de définition des paramètres de l'outil *Lames_Parallèles_Solaires*.

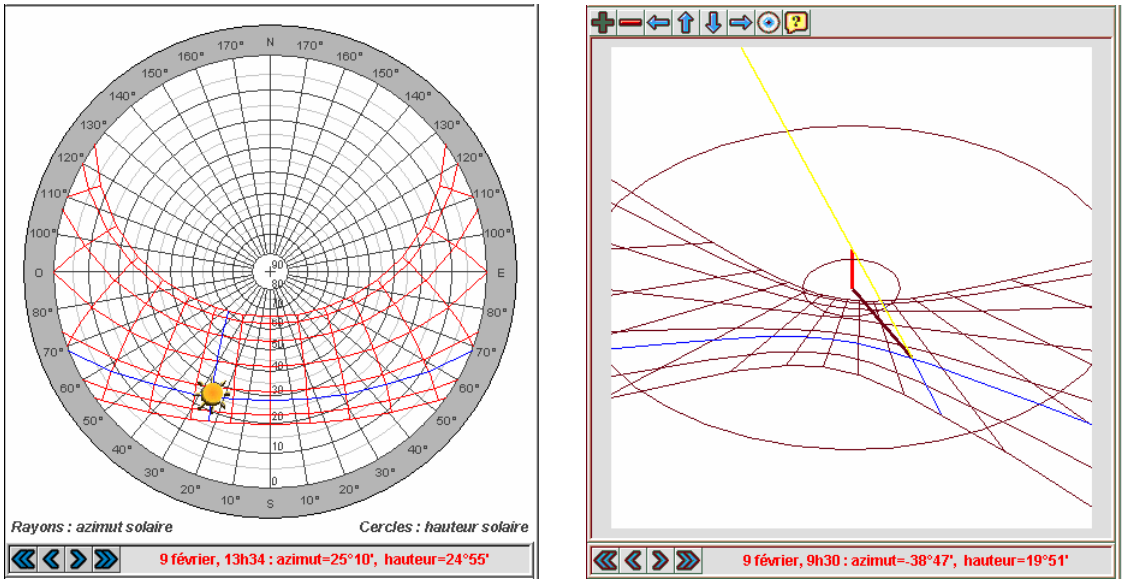


Fig. 88. Projection stéréographique des trajectoires solaires et le gnomon 3D (outil *Diagramme_Solaire*).

- *Diagramme_Solaire* correspond à la version informatisée de l'abaque solaire Girasol décrit précédemment ; il permet donc de construire différents types d'abaques et de diagrammes solaires pour diverses latitudes, mais les aspects de représentation sont complétés ici par deux représentations gnomoniques, l'une traditionnelle plane et horizontale, l'autre plus originale sous la forme d'un gnomon tridimensionnel dont l'orientation est, de manière interactive, modifiable par l'utilisateur – voir la Fig. 88.

L'éventail de ces outils est bien évidemment amené à se développer, notamment dans les domaines du diffus et des transferts thermiques ; subsiste l'écueil, pour ce qui concerne le traitement du diffus, des lourds calculs liés principalement à la détermination des facteurs de forme (voir la section 7.2.3.2) ; sans doute est-il nécessaire de simplifier quelques procédures, ou encore, dans l'hypothèse où les géométries sont très simplifiées (pièce rectangulaire exclusivement), de procéder par pré-calculs de ceux-ci...

5.4.3.3 Les outils de l'ingénieur

L'ingénierie propose également ses outils d'analyse, toujours basés sur les réalités physiques (donc sur l'interaction lumière/matière) ; mais ce sont les aspects relatifs à la visualisation qui cette fois, restent parents pauvres en général : courbes et/ou tableaux de valeurs sont la plupart du temps les modes de restitution privilégiés de ces simulations ; or ils nécessitent une solide connaissance des phénomènes étudiés et une bonne habitude de ce type d'approche pour une interprétation correcte et efficace les valeurs restituées. On peut toutefois relativiser les observations précédentes dans la mesure où, de-

puis quelques années, les progrès fulgurants de l'informatique graphique (alliés à une diminution considérable du coût des dispositifs d'affichage graphique) font que la plupart des logiciels d'ingénierie disposent de leur propre module de restitution graphique (module propriétaire en général) ; dans le cas contraire, il est toujours possible de placer en fin de chaîne d'utiliser un dispositif de visualisation indépendant, interfacé avec les résultats obtenus lors des simulations, dont le seul propos est la traduction et la restitution graphique, permettant *a priori* une meilleure exploitation des résultats par l'architecte ; on peut citer parmi les plus connus et couramment utilisés dans les laboratoires de recherche IBM Open Visualization Data Explorer, OpenDX, Khoros, VTK, Picasso (développé à l'EPFL également), etc. Ces produits possèdent des fonctions relativement différentes (des coûts fort différents également, certains d'entre eux étant même gratuits) dont il convient d'analyser soigneusement les potentialités si l'on veut aboutir à la meilleure adéquation possible entre le type de simulation effectué, les phénomènes à visualiser et les potentialités mêmes du logiciel de visualisation.

Il n'en reste pas moins que ces outils d'analyse paraissent assez peu adaptés à la problématique quotidienne de l'architecte dans la mesure ou leur mise en œuvre est trop complexe (trop longue et trop onéreuse donc), et requièrent impérativement un utilisateur chevronné. Le recourt à de tels logiciels peut pourtant se justifier dans le cas de projets dont les dimensions, la complexité, ou de manière plus évidente encore la fonction font de la lumière naturelle l'une des aspects prioritaires du projet ; c'est évidemment le cas des musées, des bibliothèques, et plus généralement de tous les espaces publics de grandes dimensions (salles de sport, halls d'exposition, etc.). La demande d'une telle étude est en général explicitement formulée (par le client ou le maître d'œuvre) et en principe budgétisée.

5.5 Conclusion

Il est à remarquer que la grande majorité des méthodes et logiciels proposés dans les pages précédentes ont pour finalité exclusive la quantification de la lumière naturelle parvenant à l'intérieur d'un local (et le plus souvent la détermination du niveau de l'éclairement lumineux sur un plan horizontal), dans des configurations géométriques très simplifiées parfois ; par contre les aspects relatifs à l'urbain ne sont quasiment jamais envisagés, évacuant de fait tout le pan de la micro-climatologie urbaine, pour lequel les aspects solaires directs et lumineux diffus constituent des paramètres essentiels (même si ce ne sont pas les seuls évidemment) ; même remarque dans le champ relatif à la perception visuelle de l'espace urbain, avec ses alternances ombre / lumière plus ou moins marquées selon les conditions d'insolation, ses rythmes lumineux éventuels, etc. Seul l'ouvrage de M. Twarowski, *Soleil et architecture* [79] peut prétendre constituer une exception d'importance aux affirmations précédentes.

Si certains de ces outils proposent pourtant des méthodes d'analyse plus précises, ils se heurtent alors à d'autres sortes de problèmes ; c'est particulièrement le cas dans le traitement des vitrages[81], pour lesquels les solutions proposés tendent à isoler totalement intérieur et extérieur (la prise de jour étant considérée comme une « nouvelle » source parfaitement diffuse sur l'ensemble de sa surface...).

L'utilisation de ces différentes méthodes dans la conception architecturale reste donc ou bien de l'ordre du didactique (c'est précisément le propos des outils solaires du site Audience par exemple, qui permettent de trouver réponse à une multitude de « petits » problèmes indépendants), ou au contraire se positionnent clairement dans le champ de l'imagerie, mais ne permettent d'autre « analyse » que d'ordre visuel (avec tout le problème de représentation d'un « simulacre du réel » sur un support à la dynamique de luminance très réduite par rapport à la réalité – le moniteur) ; les plus intéressants d'entre eux (par rapport à notre problématique évidemment, c'est-à-dire ceux présentant de réelles potentialités d'analyse) permettent l'affichage des niveaux de luminance à la fois sous forme numérique, en fausses couleurs, ainsi que la représentation des contours d'isoluminance sur les différentes surfaces de la scène. Néanmoins il est important de remarquer que le principe utilisé pour extraire ces informations repose essentiellement sur une analyse de l'image de synthèse produite par le logiciel ; le travail est réalisé par un « analyseur d'images », programme en fait totalement indépendant du reste de la procédure.

La remarque est d'importance car elle distingue fondamentalement ce type de produit de l'outil logiciel décrit dans la suite du présent document ; dans ce dernier en effet, chaque élément de surface de la scène discrétisée est porteur d'une ou de plusieurs informations (les descripteurs évoqués dans la section 2.3.2), « l'image » affichée à l'écran n'étant qu'une traduction graphique de ces informations (sous forme d'une séquence de couleurs en principe). On a vu également dans ce chapitre qu'un même élément pouvait être porteur de plusieurs types d'informations, sans qu'il existe nécessairement le moindre lien entre elles ; et c'est évidemment cet aspect qui constitue tout l'intérêt de SOLENE, en lui conférant un potentiel interdisciplinaire : l'ensemble des éléments de surface de la scène peut tour à tour afficher n'importe lequel des descripteurs disponibles (en principe un descripteur résulte d'une simulation), ou bien une opération (au sens mathématique du terme) entre deux ou plusieurs de ces descripteurs.

▼ Ces différents aspects, et plus exactement encore l'ensemble des caractéristiques du modèle d'éclairement mis en œuvre dans SOLENE, constituent précisément l'objet du chapitre suivant.

---

[81] Il s'agit d'un problème spécifique traité au chapitre 8.

6 *Le modèle d'éclairement développé pour SOLENE*

Ce chapitre constitue en quelque sorte un « état de l'art » des différents modèles qui permettent de décrire les conditions d'insolation et d'éclairement, au sein desquels viennent s'insérer nos propositions. Celles-ci auraient certes pu être effectuées de manière plus abrupte, mais le balayage proposé s'est avéré indispensable afin de dégager les éléments nécessaires à la construction du modèle implémenté dans SOLENE. D'autre part il nous a paru important de resituer les modèles traditionnellement adoptés, aux formulations statistiques déjà anciennes, parmi nombre de propositions plus récentes, validées au regard des données climatiques relevées en différents lieux géographiques.

6.1 Introduction

Comme on l'a évoqué dans un précédent chapitre, l'estimation de la quantité d'énergie interceptée par une surface d'orientation donnée d'une scène 3D nécessite la connaissance de l'énergie provenant des sources naturelles que constituent le *soleil* (la source primaire ponctuelle), et *l'ensemble de la voûte céleste* (la source secondaire diffuse). Ces deux aspects constituent le modèle d'éclairement (énergétique ou lumineux) qui est décrit dans la suite.

Le « modèle de soleil » et le « modèle de ciel » visent donc à établir une cartographie en trois dimensions des conditions naturelles d'ensoleillement et/ou d'éclairement, conditions auxquelles seront exposés les différents éléments de surface de la scène à étudier. L'insolation possible en un lieu donné sera toujours conditionnée par la position du soleil (à l'exception de ciels extrêmement couverts peut-être), ceci indépendamment des obstacles éventuels (relief, plantations, constructions, etc.) ; ces obstructions, qui appartiennent à la scène urbaine proprement dite, font l'objet d'un traitement indépendant – le traitement des « parties cachées » est dorénavant un classique de l'imagerie numérique.

De tels modèles doivent finalement renfermer deux aspects :

- l'un géométrique, qui concerne la géométrie céleste, c'est-à-dire la position et la représentation tridimensionnelle du soleil et de la voûte céleste.

- l'autre physique et statistique, relatif à la quantité d'énergie émise par le soleil (et de celle reçue sur la terre compte tenu des aspects météorologiques au sein de l'enveloppe atmosphérique), ainsi qu'aux fonctions de distribution de la luminance sur l'hémisphère céleste.

6.2 Cosmogonie

L'astre solaire a constitué, pour de nombreuses civilisations anciennes, un aspect important de leur mythologie, sinon le tout premier dans leur rapport à l'univers qui les entourait ; parmi les divinités solaires les plus connues, on peut citer par exemple Rê chez les Égyptiens, Surya dans la mythologie hindoue, ou encore Amatérasu, déesse du soleil dans la religion shintoïste... Mais avec l'émergence de la philosophie grecque et son anthropocentrisme, le modèle théologique d'une terre plate en forme de disque flottant sur une sorte de substance qui donne l'air par évaporation commence à disparaître, et le soleil ne devient plus qu'un simple élément matériel similaire aux autres astres ; un peu plus tard encore, les mouvements de ces astres seront décrits comme étant régis par ceux de sphères et de cercles emboîtés de manière concentrique (27 sphères au total, toutes centrées sur la terre), modèle mieux adapté aux occurrences périodiques de leur position[82]. Jusqu'au 6ème siècle avant J.-C., la lune et le soleil sont placés sur un même plan, et ce n'est qu'à cette époque que Thalès comprend que la nuit correspond à une absence de lumière et que le soleil est l'agent unique de la lumière du jour. Le premier astronome de l'école d'Alexandrie, Aristarque de Samos (vers 290 av. J.-C.), affirme que non seulement la terre tourne sur elle-même (comme l'avait observé Héraclite), mais qu'elle décrit une orbite circulaire autour du soleil, qui devient ainsi le centre de tous les mouvements.

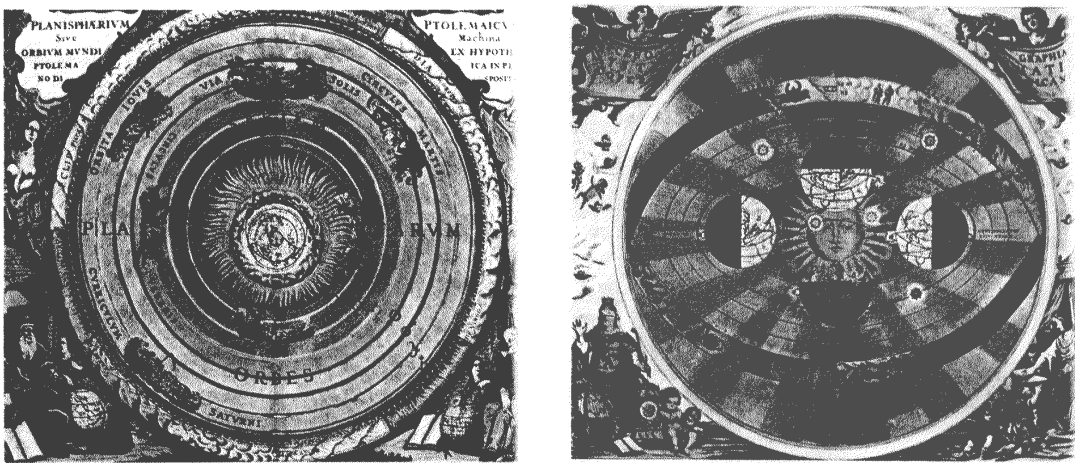


Fig. 89. Estampes du 17ème siècle représentant les deux conceptions jusqu'alors opposées de « l'Univers » : à gauche la conception géocentrique de Ptolémée, à droite la vision héliocentrique de Copernic.

[82] C'est à Eudoxe (408-355), élève de Platon, que l'on doit cette première tentative de représentation du mouvement des astres par des moyens purement géométriques ; il constitue sans aucun doute l'origine de tous les systèmes qui, jusqu'à Copernic, seront utilisés pour prévoir le mouvement des astres – même s'il est beaucoup moins connu que d'autres modes de représentation, comme celui de Ptolémée, de cinq siècles postérieur.

La théorie d'Aristarque n'aura guère de retentissement et les observations faites pendant cinq siècles par l'école d'Alexandrie aboutiront à la théorie des épicycles, décrite par Ptolémée dans le seul ouvrage d'astronomie qui nous soit parvenu de cette époque, l'Amalgeste. Cette théorie fera foi jusqu'à Copernic, mais elle est pourtant en retrait sur celle d'Aristarque puisque la terre y est redevenue fixe au centre du monde...

Après la léthargie du Moyen-âge, le renouveau intellectuel est principalement dû, dans le domaine de l'astronomie, à Copernic (1473-1543). L'année de sa mort paraît *De revolutionibus orbium coelestium*, ouvrage dans lequel Copernic reprend le modèle sphérique des grecs, mais abandonne le dogme géocentrique et accorde à nouveau une place centrale au soleil, de même que l'hypothèse de la double rotation de la terre (sur elle-même et autour du soleil).

Ensuite Kepler (1571-1630) confirmera la justesse de cette représentation héliocentrique en calculant les trajectoires elliptiques des planètes autour du soleil, grâce en partie à la remarquable précision des observations du danois Tycho Brahe (1546-1601), qui est à l'origine du premier observatoire astronomique en occident (d'autres existaient déjà en Inde et en Chine). Au milieu de certaines hypothèses curieuses (voir la Fig. 90.), Kepler a établi le mouvement réel des planètes autour du soleil : elles se déplacent sur des ellipses dont le soleil occupe l'un des foyers, leur vitesse de rotation est liée à la position de la planète sur l'ellipse, et leur période de révolution aux dimensions moyennes de cette ellipse ; par contre il n'entreverra pas que la cause première de ces mouvements est la force de gravitation, découverte qui fera la gloire de Newton...

> *« Deux corps quelconques s'attirent en raison directe de leurs masses, et en raison inverse du carré de la distance de leur centre de gravité ».*

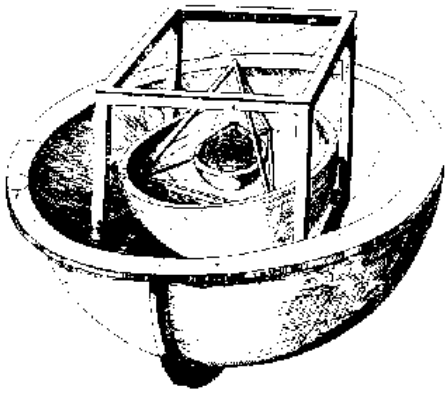


Fig. 90. Kepler, dans son *Mysterium cosmographicum* (1596), poursuit dans le sens d'une loi d'harmonie universelle chère aux platoniciens : les orbites des 6 planètes connues à l'époque s'imbriquent dans les sphères inscrites et circonscrites aux polyèdres réguliers convexes (il découvrira d'ailleurs les polyèdres réguliers étoilés). Kepler considère une sphère tangente à la trajectoire de Saturne (la dernière planète connue) ainsi que le cube inscrit dans cette sphère ; la sphère inscrite dans le cube précédent vient alors circonscrire l'orbite de Jupiter ; si maintenant un tétraèdre est inscrit dans cette sphère, la sphère inscrite dans le tétraèdre englobe l'orbite de Mars ; de la même manière le dodécaèdre régulier et ses sphères circonscrite et inscrite se situe entre l'orbite de Mars et celle de la Terre ; entre le Terre et Vénus vient se placer l'icosaèdre, entre Vénus et Mercure l'octaèdre ; d'où la cohérence parfaite avec les 5 polyèdres réguliers convexes ou polyèdres platoniciens...

Même si l'on sait maintenant que le centre de l'univers se situe bien au-delà de notre galaxie, le modèle de Kepler est suffisamment précis pour décrire de manière tout à fait satisfaisante, à l'échelle de l'habitat humain, les conditions d'irradiation de notre planète et les quantités énergétiques que le soleil dispense sur la terre !

L'histoire de l'astronomie ne s'arrête évidemment pas à Kepler, mais les bases de la géométrie céleste sont dès lors définitivement jetées ; le 18ème siècle continuera bien sûr à en affiner les principes, mais la période de l'histoire qui vient d'être décrite suffit à mettre en évidence les différentes approches de la géométrie céleste, et notamment la question cruciale – et parfois même dangereuse – concernant la position du centre du monde. Ces quelques remarques, relatives au passage historique progressif d'une vision géocentrique à une vision héliocentrique du monde, ne sont pas dénuées d'intérêt si l'on considère la diversité des modèles géométriques mis au point pour décrire les trajectoires des différents astres, chacun de ces modèles étant basé (c'est-à-dire centré géométriquement et spatialement repéré, au sens mathématique du terme) sur l'un des éléments de l'ensemble du système.

6.3 Géométrie céleste (cosmographie)

6.3.1 Généralités

Le soleil est un sphère gazeuse de $1{,}4 \cdot 10^6$ km de diamètre autour de laquelle la terre décrit une trajectoire quasi circulaire, une révolution complète s'effectuant en 365,25 jours. Le rayon moyen de cette trajectoire est égal à $149{,}6 \cdot 10^6$ km, et depuis la terre, le soleil est vu – en moyenne toujours – sous la forme d'un disque de 32 minutes de diamètre angulaire (Fig. 91.). A moins de recherches très particulières, il sera généralement modélisé sous la forme d'une source ponctuelle suffisamment éloignée pour que les rayons qui atteignent la terre puissent être considérés comme parallèles (on a vu que les simulations sur maquettes à l'aide de l'héliodon se contentent d'une précision bien moindre ; cette approximation sera utilisée dans la présente étude.

La position relative terre / soleil peut être envisagée de différentes manières : on peut notamment distinguer une approche globalisante, considérant l'ensemble des astres en mouvement (un observateur « extra-terrestre », c'est-à-dire extérieur aux éléments du système observé, a dans son champ de vision le soleil et la terre, sur laquelle sont repérés à la fois le lieu d'observation et la direction solaire) ; ou encore une approche locale, en isolant l'un des astres en mouvement et en observant le déplacement des autres relativement à celui-ci (comment l'observateur, qui appartient alors à l'un des éléments du système, en l'occurrence la surface terrestre, peut-il repérer le soleil et décrire ses trajectoires au fil des heures et des saisons ? – approche géocentrique).

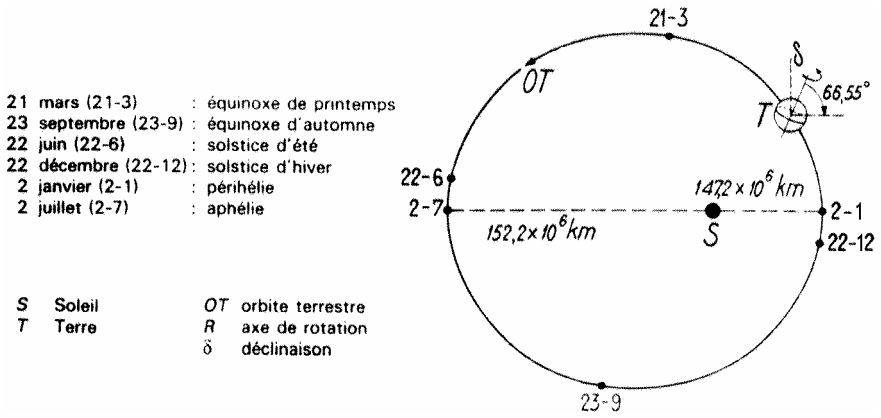


Fig. 91. Géométrie du mouvement de la terre autour du soleil.

Comme on vient de l'évoquer, ces différences dans la manière d'aborder le repérage des corps célestes sont à l'origine de la coexistence de plusieurs systèmes de coordonnées, chacun d'eux étant en principe particulièrement adapté à la nature des phénomènes étudiés ; les systèmes de repérage de la géométrie sphérique les plus employés dans le cadre d'une exigence de précision « ordinaire », et qui correspondent à la distinction précédente global / local, sont les coordonnées horaires et les coordonnées horizontales ; les autres systèmes de coordonnées comprennent les coordonnées écliptiques (système particulièrement adapté au repérage des astres du système solaire), et les coordonnées équatoriales, système voisin des coordonnées terrestres utilisées par les géographes. Les systèmes de coordonnées horaires et de coordonnées horizontales seront les deux seuls utilisés dans la suite de cette étude (Fig. 92.)

- Les coordonnées horaires : il s'agit d'un système défini par le plan de l'équateur et le méridien du lieu. La position du soleil (ou de n'importe quel astre) est alors repérée par l'angle horaire ω et la déclinaison δ, alors que la position d'un point P de la surface terrestre l'est par sa longitude *long* et sa latitude *lat*. Les angles ω et δ peuvent être mesurés par un théodolite.

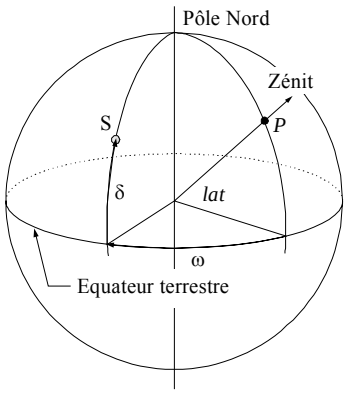
- Les coordonnées horizontales : il s'agit d'un système local, défini par le plan horizontal du lieu et le plan méridien. À un instant donné, la position du soleil dans ce repère est donnée par son altitude h et son azimut α ; la hauteur correspond à l'inclinaison[83] des rayons solaires, égale à l'élévation angulaire du soleil au-dessus du plan de l'horizon local, et l'azimut à l'orientation du plan vertical contenant la direction des rayons solaires par rapport à la direction du sud (Fig. 93.). Ce sys-

[83] A noter que le mot *climat* provient du grec *klima* qui signifie « inclinaison » de la terre par rapport au soleil.

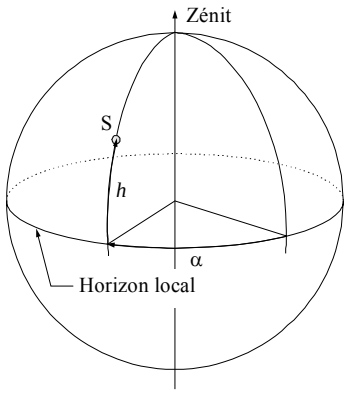
tème est moins « objectif » que le précédent dans la mesure où il dépend de l'heure solaire et de la position de l'observateur.

Si les deux systèmes dépendent de la latitude du lieu et de l'heure légale d'observation, le premier présente un avantage certain : dans le cas des coordonnées horaires, un seul des paramètres dépend du temps (l'angle horaire, comme son nom le laisse supposer, qui donne, si l'astre observé est le soleil, le temps solaire local vrai), alors que pour les coordonnées horizontales, les deux angles (angle horaire et déclinaison) varient au cours du mouvement diurne. Le passage d'un système à l'autre s'effectue sans difficultés majeures à partir des relations de la trigonométrie sphérique.

Coordonnées	Nomenclature	Origines (géométriques)	Sens de mesure	Remarques
Horaires	Angle horaire ω Déclinaison δ	Plan fondamental : équateur Grand cercle : méridien du lieu	h compté de 0 à 24 h dans le sens rétrograde δ compté de 0 à 90° dans l'hémisphère nord, de 0 à -90° dans l'hémisphère sud	Pour le soleil, l'angle horaire donne le temps solaire vrai
Horizontales	Azimut α Hauteur h	Plan fondamental : horizon du lieu Cercle vertical : méridien du lieu	α compté de 0 à 360° dans le sens rétrograde h compté de 0 à 90° au-dessus de l'horizon	Coordonnées des astres variables en fonction du temps



Coordonnées horaires : le soleil est repéré par son angle horaire ω et sa déclinaison δ.



Coordonnées horizontales : le soleil est repéré par sa hauteur h son azimut α.

Fig. 92. Les deux systèmes de coordonnées sphériques : coordonnées horaires et coordonnées horizontales. Si le schéma de gauche représente le globe terrestre, le second symbolise l'hémisphère céleste au-dessus du plan horizontal local, soit précisément celui que voit un observateur situé à la surface terrestre.

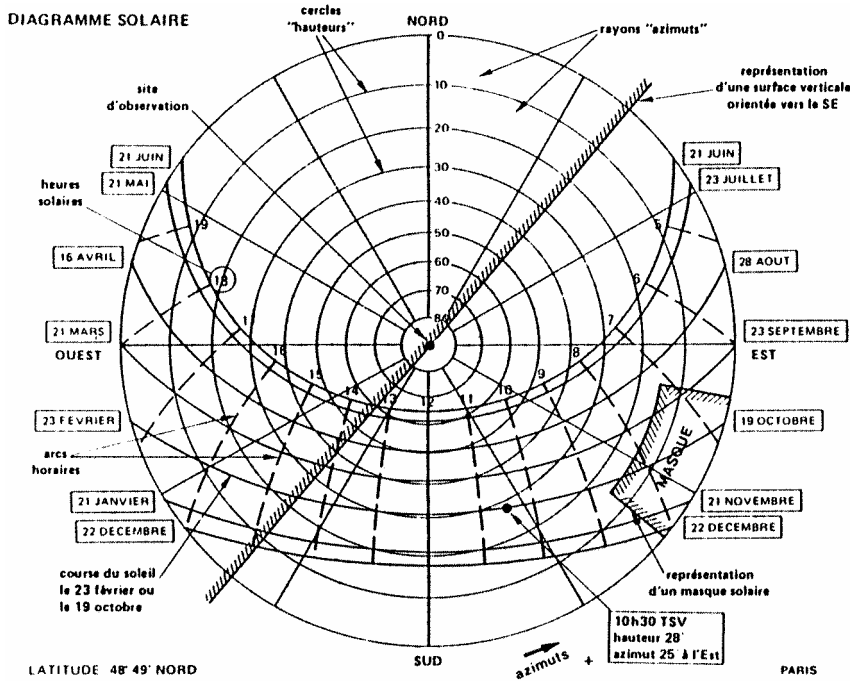


Fig. 93. Hauteur et azimut du soleil (latitude 49° N environ). La hauteur du soleil à midi solaire à Paris varie approximativement entre 18° au solstice d'hiver et 65° au solstice d'été.

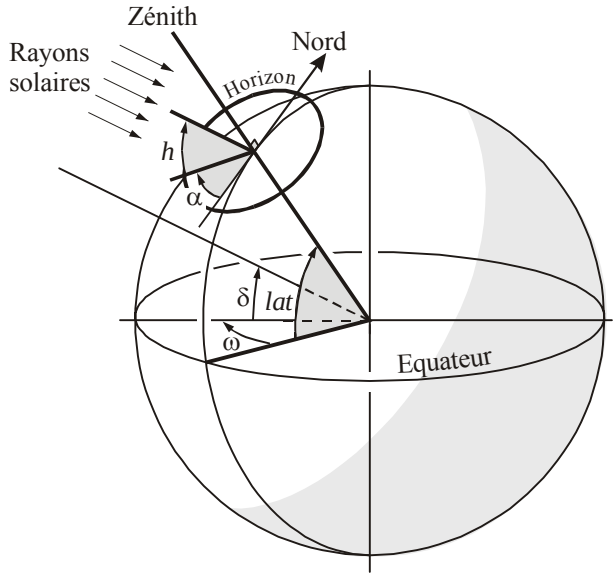


Fig. 94. Géométrie de la position du soleil : la déclinaison δ comptée à partir de l'équateur et l'angle horaire ω à partir du midi vrai dépendent de la saison et de l'heure ; la hauteur h mesurée à partir de l'horizon et l'azimut α à partir du sud dépendent en plus de la latitude *lat*.

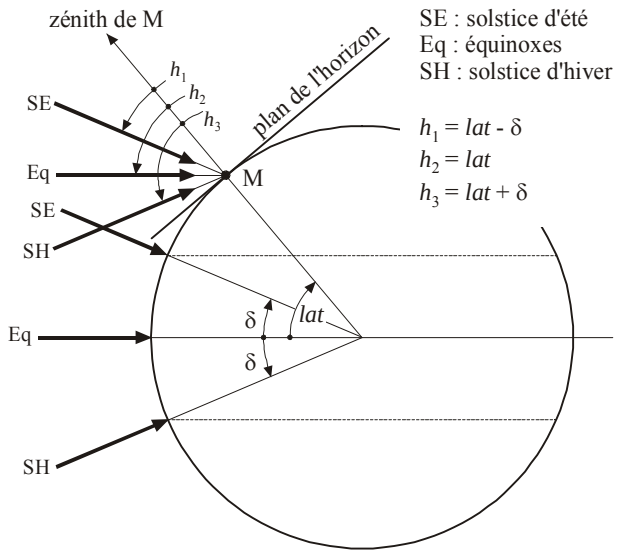


Fig. 95. Section par un plan méridien à midi heure solaire (contenant donc le soleil), et représentation des directions solaires aux équinoxes et aux solstices.

6.3.2 Le mouvement apparent de la terre autour du soleil

La position du soleil sur la voûte céleste visible depuis un point de la surface terrestre est une fonction du temps, définie par le mouvement relatif terre / soleil ; pour un observateur terrestre, la trajectoire diurne du soleil sur la voûte céleste a l'apparence d'un arc de cercle d'inclinaison constante (égale à la colatitude du lieu), symétrique par rapport au plan méridien du lieu d'observation ; l'assimilation à un arc de cercle est fausse en toute rigueur (la trajectoire est en fait une spirale) ; l'erreur reste cependant extrêmement faible et l'on considère effectivement que tout au long de l'année, le soleil parcourt des cercles parallèles, un par jour, leur hauteur par rapport au plan équatorial étant donné par la déclinaison moyenne ce même jour.

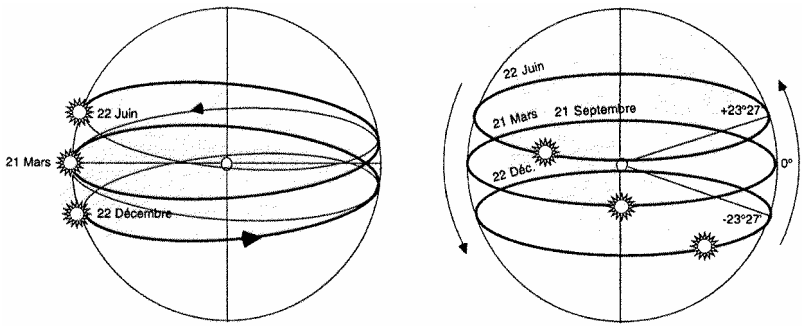


Fig. 96. Mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste (d'après D. Siret [73]).

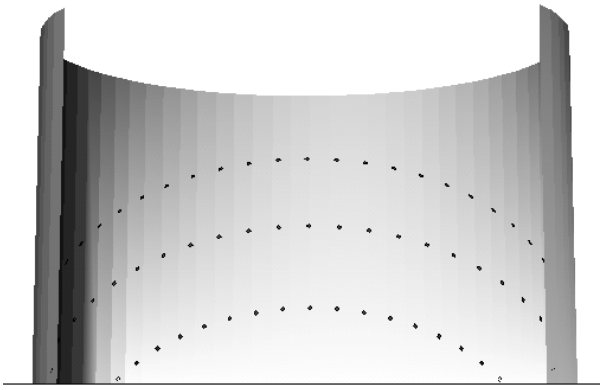


Fig. 97. Apparence des trajectoires solaires, pour un observateur situé dans l'hémisphère nord, projetées sur un cylindre d'axe des pôles et tangent à l'équateur (aux équinoxes et aux solstices).

Pour l'observateur terrestre en question, la position du soleil dépendra très directement de son emplacement géographique (latitude) et de l'horaire d'observation (heure légale) ; s'y ajoutent les corrections de temps liées à la longitude, à l'équation du temps (qui traduit les variations de vitesse de la terre en raison de sa trajectoire elliptique autour du soleil – quasi circulaire toutefois puisque l'excentricité n'est que de 0,01673), et éventuellement des corrections légales temporaires comme l'heure d'été.

Le repérage de l'astre solaire par deux coordonnées angulaires (son altitude h et son azimut α) supposent donc la définition préalable des autres variables que sont l'angle horaire ω, l'équation du temps ET et la déclinaison δ.

6.3.2.1 L'angle horaire ω

Faisant partie du système de coordonnées horaires, l'angle horaire ω est formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan méridien du lieu, définit le temps solaire vrai TSV ; celui-ci dépend de plusieurs paramètres, allant de la géométrie planétaire à l'heure légale adoptée dans chaque pays.

Ces différents paramètres sont rassemblés dans les relations suivantes :

$$TSV = TL - Long_W/15 - ET - Mérid$$
$$TSV = TL + Long_E/15 - ET - Mérid$$

ou encore :

$$TL = TSV + Long_W/15 + ET + Mérid$$
$$TL = TSV - Long_E/15 + ET + Mérid$$

où *TSV* est le temps solaire vrai, exprimé en heures,

TL le temps légal, exprimé en heures également,

$Long_E$ et $Long_W$ sont les corrections de longitude est ou ouest exprimées en degrés – $Long_E$ et $Long_W$ sont comptées négativement ou positivement selon leur orientation – ; la division par 15 permet d'obtenir le rapport en heures, dans la mesure où un décalage de longitude de 1° correspond à un intervalle de temps de 1/15 heure, soit 4 minutes ;

ET correspond à l'équation du temps, dont l'origine provient des variations de la vitesse angulaire de la terre (voir la Fig. 98.) ;

et *Mérid* représente le fuseau horaire, c'est-à-dire le décalage entre l'heure légale du lieu et l'heure légale de Greenwich ; cette approximation par paliers dépend de la longitude et des conventions adoptées par chaque pays (+1h en hiver et +2h en été pour la France à l'heure actuelle, –5h en hiver et –4h en été à New-York, +7 heures à Bangkok, etc.).

L'angle horaire ω correspond finalement à la différence entre l'heure solaire *TSV* et l'heure légale *TL* ; il est compté depuis midi et donc nul à midi *TSV*. Le passage d'une différence horaire à une valeur en degrés (ou en radians) s'effectue par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicateur qui traduit la trajectoire angulaire solaire horaire.

$$\omega = 15 \cdot (TSV - TL) \text{ (en degrés)} \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{\pi}{12}(TSV - TL) \text{ (en radians)}$$

où *TL* et *TSV* sont exprimés en heures ; comme précisé plus haut, le facteur constant (15° ou bien $\frac{\pi}{12}$ radians) correspond à la trajectoire angulaire parcourue par le soleil en 1 heure, soit 360° en 24 h.

6.3.2.2 L'équation du temps *ET*

Des relations plus ou moins complexes (expressions trigonométriques simples ou décompositions en série de Fourrier selon le degré de précision voulu – et donc le domaine d'application envisagé) fournissent l'équation du temps, qui vient corriger les variations de la vitesse angulaire de la terre au cours de l'année (elle est inversement proportionnelle à la distance terre / soleil). Ces variations donnent lieu à des fluctuations dans la durée apparente du jour terrestre, mesuré comme le temps écoulé entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu ; l'équation du temps représente finalement la différence entre le temps solaire vrai et un temps solaire uniforme donné par un soleil fictif décrivant en 365,25 jours une trajectoire circulaire autour de la terre ; cette différence varie entre –14 minutes (vers le 15 février) et +16 minutes environ (vers le 5 novembre) (Fig. 98.).

Quelle que soit sa formulation, l'équation du temps est uniquement fonction du numéro *j* du jour dans l'année.

- Expression trigonométrique simple :

$$ET = 0,128\sin\left[\omega\cdot(j-2)\right]+0,164\sin\left[2\omega\cdot(j+10)\right]$$

avec $\omega = \dfrac{360}{365,25}$ degrés par jour (il s'agit ici de la vitesse angulaire moyenne de la terre autour du soleil) ; *ET* s'exprime alors en heures.

Ou encore :

$$ET = 10,1\sin\left[\frac{360}{366}\cdot(2j+31)\right]+6,9\sin\left[\frac{360}{366}\cdot j\right] \text{ (en minutes).}$$

- En série de Fourrier, ici à l'ordre trois :

$$\begin{aligned} ET = {} & 0,0002-0,4197\cos(\omega\cdot j)+3,2265\cos(2\omega\cdot j)+0,0903\cos(3\omega\cdot j) \\ & +7,3509\sin(\omega\cdot j)+9,3912\sin(2\omega\cdot j)+0,3361\sin(3\omega\cdot j) \end{aligned}$$

avec $\omega = \dfrac{2\pi}{366}$ rad ; l'équation du temps *ET* est ici exprimée en minutes.

- On trouve aussi des formulations directes de l'ajustement du temps solaire qui intègrent donc l'équation du temps et les corrections de longitude (c'est le cas du logiciel Radiance [82] par exemple) :

$$TSV = TL+0,17\sin\left[\frac{4\pi}{373}\cdot(j-80)\right]-0,129\sin\left[\frac{2\pi}{355}\cdot(j-8)\right]+\frac{12}{180}(Mérid-Long)$$

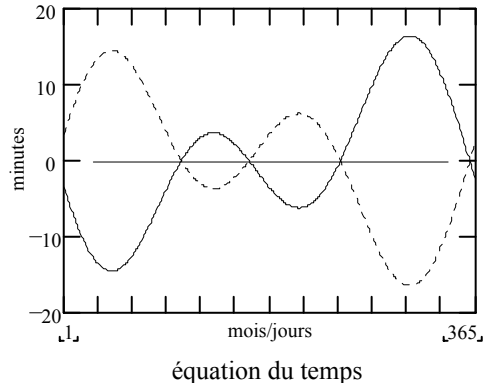


Fig. 98. Représentation graphique de l'équation du temps calculée à partir d'un développement en série de Fourrier (en pointillés) et la correction *ET* (en trait continu).

Tous les codes de calcul de la position solaire prennent en compte cette équation du temps ; il faut bien reconnaître qu'en définitive sa formulation importe peu et que compte tenu de notre champ d'application, sa précision sera toujours suffisante.

6.3.2.3 La déclinaison δ

Plusieurs expressions également permettent de calculer la déclinaison δ, qui correspond à l'angle que font les rayons solaires avec le plan équatorial (Fig. 99.) ; comme pour l'équation du temps, elles sont exclusivement fonction du jour *j* de l'année. La déclinaison est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices ; elle vaut alors +23°27' le 22 juin et –23°27' le 22 décembre, et ses variations peuvent être considérées comme sinusoïdales en première approximation (Fig. 100.).

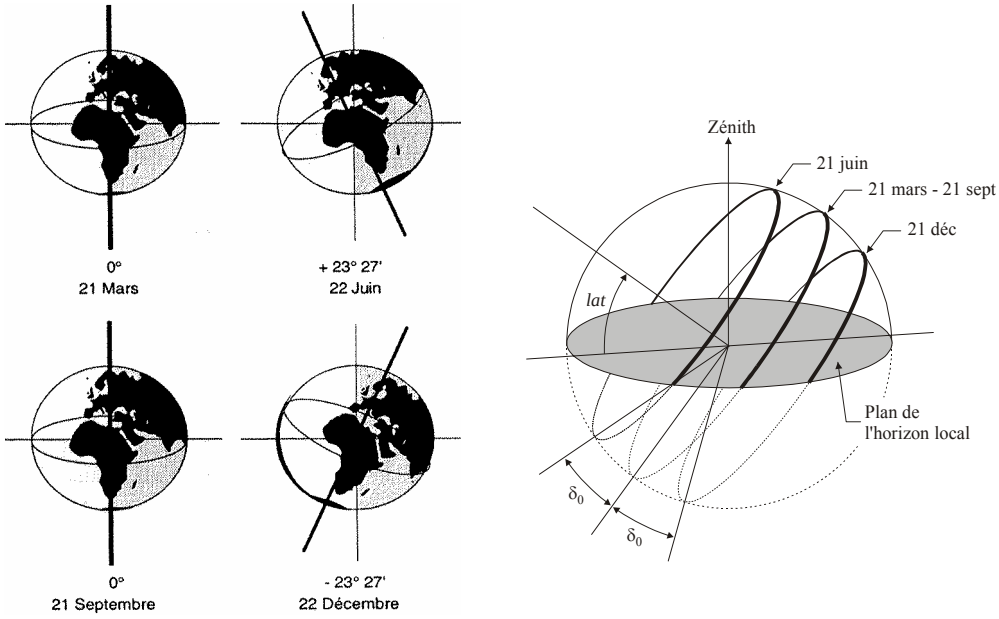


Fig. 99. Les trajectoires solaires apparentes aux équinoxes et aux solstices varient avec la déclinaison.

Parmi les nombreuses formulations approchées, on peut citer par exemple :

$$\delta = 23,451 \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{368} \cdot (j - 81)\right]$$

ou encore $$\delta = 23,451 \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{365} \cdot (284 + j)\right]$$ (formule de Cooper).

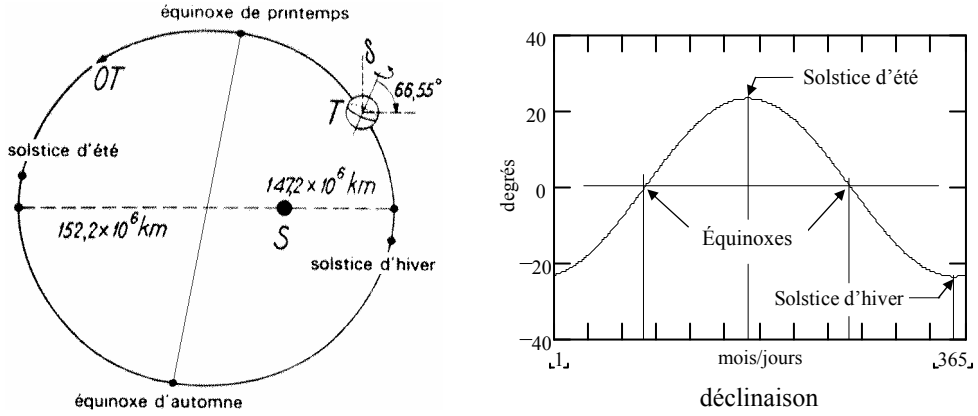


Fig. 100. A gauche, mouvement de la terre autour du soleil (les saisons indiquées sont celles de l'hémisphère nord) ; à droite, représentation de la variation de la déclinaison δ (extrema aux solstices[84], valeur nulle aux équinoxes[85]).

La trigonométrie sphérique, qui permet le passage d'un système de coordonnées à l'autre, offre ainsi la possibilité, à partir de l'angle horaire ω, de la déclinaison δ et de la latitude *lat*, d'obtenir, pour un jour donné *j*, l'altitude *h* et l'azimut α du soleil en tout point de la surface terrestre et à toute heure. En outre, l'altitude nulle $h = 0$ correspond aux angles horaires du lever et du coucher du soleil, et donne aussi les azimuts correspondants.

On peut enfin préciser que la variation de la déclinaison est à l'origine de la définition, sur la surface terrestre, de quatre cercles parallèles à l'équateur : les tropiques et les cercles polaires (Fig. 101.).

Dans l'hémisphère nord, l'ensemble des points pour lesquels le soleil est au zénith à midi au solstice d'été (21 juin) constitue le *tropique du Cancer* ; sa latitude est donc de +23°27', et au-delà de celle-ci, le soleil n'atteint jamais le zénith[86]. L'ensemble des points pour lesquels le soleil est toujours au-dessus de l'horizon forme le *cercle polaire arctique* ; sa latitude est de +66°33' (soit 90° – 23°27', et donc ce 21 juin, tous les points situés au-delà de +66°33' reçoivent 24 heures d'ensoleillement tandis qu'au-delà de –66°33', aucun rayon solaire n'atteint la surface terrestre).

---

[84] C'est aux solstices que le soleil semble s'arrêter de « monter » ou de « descendre » dans le ciel, d'où l'étymologie du mot : *sol*, soleil et *stare*, se tenir immobile.

[85] Équinoxe vient de *aequus*, égal, et *nox*, nuit ; les périodes diurnes et nocturnes sont égales en ces deux moments de l'année.

[86] Un piquet vertical planté sur le cercle tropical verra son ombre disparaître une seule fois dans l'année (au solstice d'été à midi) ; situé entre les tropiques, l'ombre disparaîtra totalement deux fois dans l'année.

Symétriquement au plan de l'équateur, on définit, au solstice d'hiver (21 décembre), le *tropique du Capricorne* (latitude –23°27') et le *cercle polaire antarctique* (latitude –66°33').

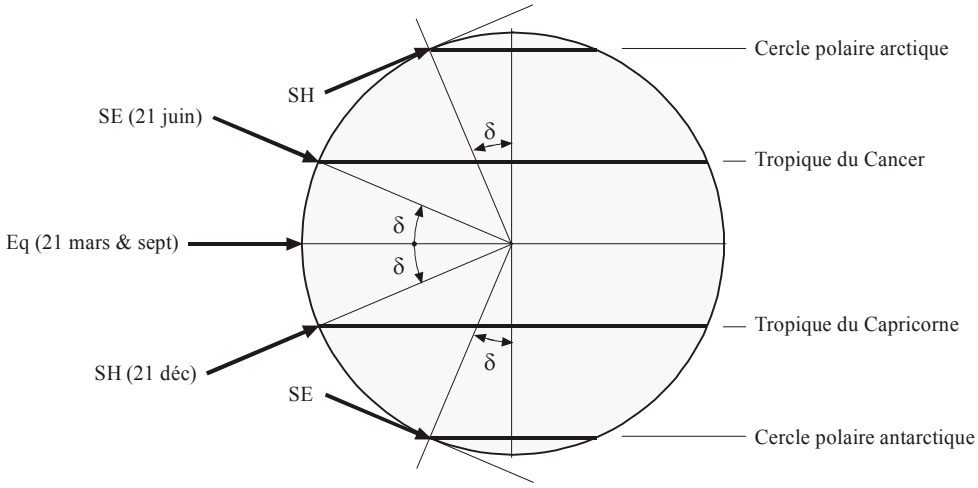


Fig. 101. Construction des cercles tropicaux et polaires.

6.3.2.4 L'altitude *h*

L'altitude solaire *h* s'exprime sous la forme :

$$\sin(h) = \sin(lat) \cdot \sin(\delta) + \cos(lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

où *lat* est la latitude du lieu,
δ sa déclinaison,
et ω l'angle horaire.

6.3.2.5 L'azimut α

L'azimut α est, dans le système de coordonnées local, l'angle formé par deux plans verticaux : celui contenant le soleil et le lieu d'observation, et celui constitué par le plan méridien de ce même lieu ; conventionnellement le sud a un azimut de 0°, et les azimuts sont traditionnellement comptés positivement vers l'est et négativement vers l'ouest.

L'azimut solaire se déduit de l'altitude par la relation :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)}$$

où *h* est l'altitude solaire,

δ sa déclinaison,

et ω l'angle horaire.

On a vu précédemment que les heures de lever et de coucher du soleil correspondaient à une altitude solaire nulle. Dans le cas où $\sin(h) = 0$, les expressions précédentes conduisent à celles de l'angle horaire et de l'azimut à l'instant où le soleil apparaît sur l'horizon local :

$$\cos(\omega_{\text{lever/coucher}}) = -\tan(lat)\cdot\tan(\delta) \quad \text{et}$$

$$\cos(\alpha_{\text{lever/coucher}}) = -\frac{\sin(\delta)}{\cos(lat)} \qquad \cos(\alpha_{\text{lever/coucher}}) = -\frac{\sin(\delta)}{\cos(lat)}$$

Si l'on prend comme latitude française moyenne 47° (environ 43° pour Perpignan et 50° pour Lille), l'évolution de la déclinaison fait varier l'angle horaire et l'azimut solaire aux heures de lever et coucher comme le montre la Fig. 102. :

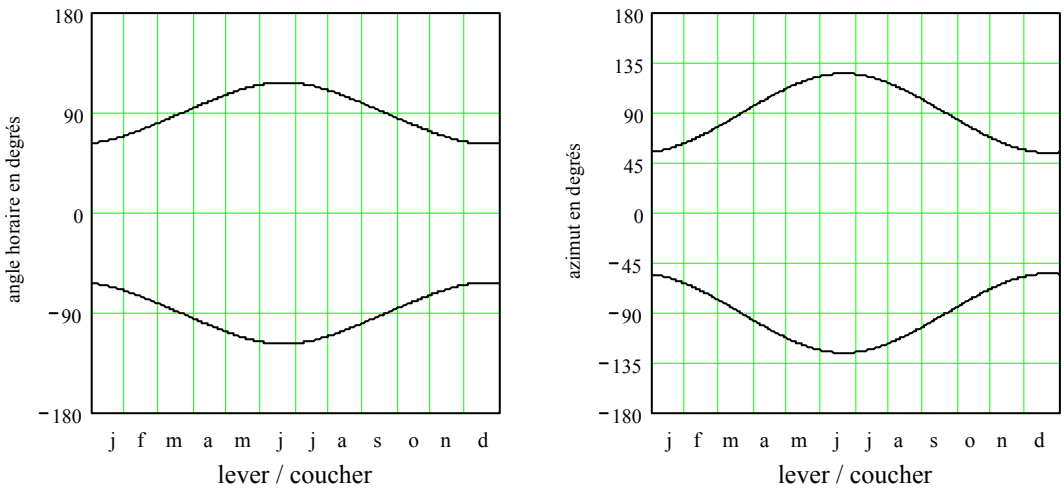


Fig. 102. Variations azimutale et horaire des heures de lever et coucher du soleil pour une latitude de 47° nord.

Les heures de lever et coucher du soleil (heures locales) en n'importe quel point de la terre peuvent être obtenues à partir des diverses relations exposées précédemment ; le domaine de validité des formules qui suivent se limite à des latitudes inférieures à 65°, et l'erreur reste en deçà de 0,1 heure :

$$TL = 12 - ET + \frac{-Long_W + \varepsilon\cdot\arccos(-\tan(lat)\cdot\tan(\delta))}{15} - Mérid$$

$$TL = 12 - ET + \frac{Long_E + \varepsilon \cdot \arccos(-\tan(lat)\cdot\tan(\delta))}{15} - Mérid$$

où $\varepsilon = -1$ au lever $\varepsilon = +1$ au coucher,
Long la longitude,
et *Mérid* le fuseau horaire, c'est-à-dire le décalage, en heures, par rapport au temps universel.

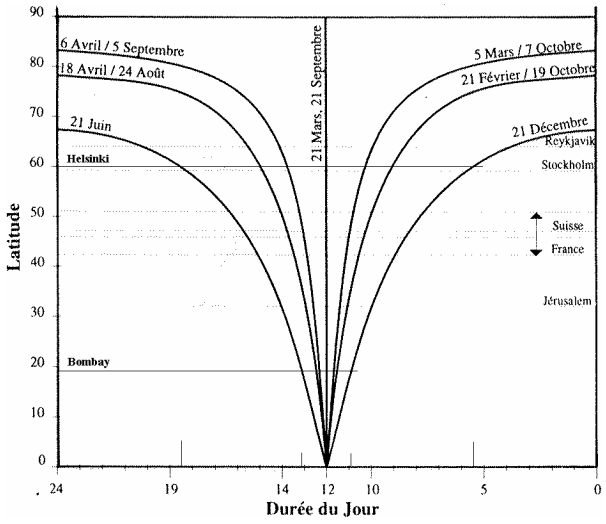
Quant à la durée du jour, elle se déduit immédiatement de l'expression de l'angle horaire lorsque $h = 0$ (en toute rigueur, le soleil n'est totalement caché que lorsque son altitude est inférieure à –0,84°, en raison de son diamètre apparent d'une part (0,27°), de la réfraction atmosphérique d'autre part) :

$$Durée_jour = \frac{2}{15}\cdot\arccos\left[-\tan(lat)\cdot\tan(\delta)\right] \qquad \text{(heures)}$$

où la fonction *arcos* est exprimée en degrés (si elle l'est en radians, le facteur constant est alors 24/π),
et $-1 \le -\tan(lat)\cdot\tan(\delta) \le 1$ (c'est-à-dire entre les cercles polaires).

Au delà des cercles polaires arctique et antarctique, $|lat| > 66°33'$ (ou 1,161 rad) ; la durée du jour est alors :

$$\begin{cases} Durée_jour = 0 \\ Durée_jour = 24 \end{cases} \quad \text{si} \quad \begin{matrix} -\tan(lat)\cdot\tan(\delta) > 1 \\ -\tan(lat)\cdot\tan(\delta) < -1 \end{matrix}$$



A noter qu'entre le nord et le sud de la France,
La différence entre les durées du jour atteint une heure aux solstices ; d'autre part les jours durent deux fois plus longtemps en été (16 heures) qu'en hiver (8 heures).

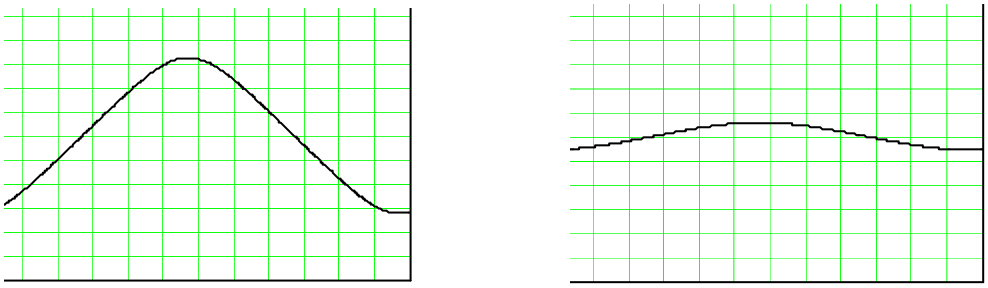


Fig. 103. Page ci-contre la durée du jour en fonction de la latitude du lieu ;
ci-dessus les durées du jour pour deux lieux de l'hémisphère nord :
Helsinki (60°N, 25°E) et Bombay (19°N, 73°E).

6.3.2.6 L'angle solide ϖ

Enfin, le dernier élément géométrique indispensable est l'angle solide ϖ sous lequel est vu le soleil depuis la terre : il n'intervient évidemment pas dans le repérage de l'astre solaire, par contre il permet le calcul de la luminance solaire L_e à partir de l'éclairement solaire normal direct S_e.

Cet angle solide est fonction de la distance moyenne terre-soleil d et du rayon du soleil r. La distance terre-soleil ne variant que de 1,7% seulement autour de sa valeur moyenne, l'angle solide sous lequel est vu le soleil est quasiment constant et vaut approximativement $\varpi \approx \pi \cdot r^2 / d^2$, soit environ 1/14700 stéradian ou bien encore $6{,}8 \cdot 10^{-5}$ sr.

La luminance énergétique solaire s'écrit :

$$L_e = S_e / \varpi \quad \text{avec} \quad \varpi = 2\pi \cdot (1 - \cos(x)) \quad \text{et} \quad \cos(x) = \sqrt{1 - \frac{r^2}{d^2}} \approx 1 - \frac{r^2}{2d^2}$$

et finalement $$\varpi = \pi \cdot \frac{r^2}{d^2}$$

où r est le rayon du soleil

et d la distance moyenne terre-soleil.

La variation en distance (1,7%) se traduit par une variation de l'éclairement normal hors atmosphère de 3,4% (celui-ci est inversement proportionnel au carré de la distance terre-soleil).

Le calcul de l'angle x (rayon angulaire du « disque » solaire vu de la terre) avec les valeurs données sur la figure suivante conduit à $x = 16'$, ce qui explique le diamètre angulaire apparent de 32' évoqué dans l'introduction.

Rayon du soleil
$r = 696\,700$ km

Distance terre-soleil
$d = 149\,637\,000$ km

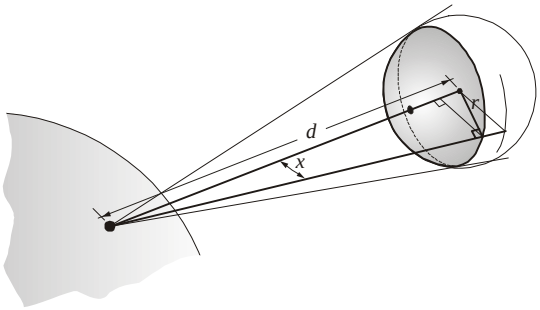


Fig. 104. Angle solide sous lequel est vu le soleil depuis un point de la surface terrestre.

6.4 Énergie solaire

Si la contribution du soleil, sur les plans lumineux et thermique, est déterminante dans le cas d'un ciel serein, elle conserve une grande importance même dans le cas d'un ciel nuageux, voire couvert ; cette contribution diminue évidemment avec l'épaisseur de la couverture nuageuse. L'éclairement énergétique à la surface terrestre peut donc varier dans des proportions considérables ; celui-ci dépend en premier lieu de la hauteur du soleil sur l'horizon, mais aussi d'autres aspects de la géométrie céleste, et enfin de paramètres dépendant directement des conditions atmosphériques.

On traitera ici de l'estimation des ressources énergétiques solaires, en abordant tout d'abord les différentes grandeurs qui viennent affecter l'énergie solaire reçue à la surface terrestre, puis en décrivant les principaux modèles mathématiques qui permettent de la déterminer. Ces problèmes spécifiques étant largement développés dans la littérature spécialisée, on n'abordera ici que les notions essentielles.

6.4.1 Du soleil à la surface terrestre

Le rayonnement émis par le soleil en direction de la terre se propage sans atténuation en ligne droite et l'éclairement incident moyen, hors de l'atmosphère, sur une surface perpendiculaire aux rayonnements solaires est appelé *constante solaire extra-terrestre* ; sa

valeur est de l'ordre de 1367 W/m^2, à 1 % près selon le *World Radiation Center*. D'autre part cette valeur peut varier de ±3,4 % en raison de l'*excentricité* de la révolution terrestre, le maximum ayant lieu début janvier (voir la section précédente). De plus la répartition spectrale du rayonnement permet, en particulier pour les applications énergétiques, de limiter les longueurs d'onde utiles entre 0,2 et 5 μm.

Le rayonnement direct est affaibli par absorption et diffusion sur les molécules gazeuses (N_2, O_2, O_3, CO_2, NO_2...), la vapeur d'eau, les aérosols (toutes les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère exceptées celles contenues dans les nuages), et les nuages eux-mêmes (Fig. 105.) ; aussi sa valeur au sol varie-t-elle avec la hauteur angulaire du soleil, celle-ci fixant la longueur du parcours optique des rayons solaires dans l'atmosphère ; cette masse atmosphérique (ou *masse d'air optique*) est évidemment minimale au zénith et maximale aux levers et couchers du soleil.

La mesure du rayonnement solaire au sol est en outre soumise à la valeur du coefficient de *trouble atmosphérique*, qui traduit la quantité d'aérosols dans l'air (particules et gouttelettes d'eau), ainsi qu'à la *quantité de vapeur d'eau précipitable* (ou condensable) *w* présente dans l'atmosphère, exprimée sous la forme d'une hauteur d'eau (en cm).

Ces différents coefficients constituent, en plus de l'altitude solaire *h*, les principaux paramètres utilisés dans la formulation de l'éclairement solaire direct, quel qu'en soit son auteur d'ailleurs.

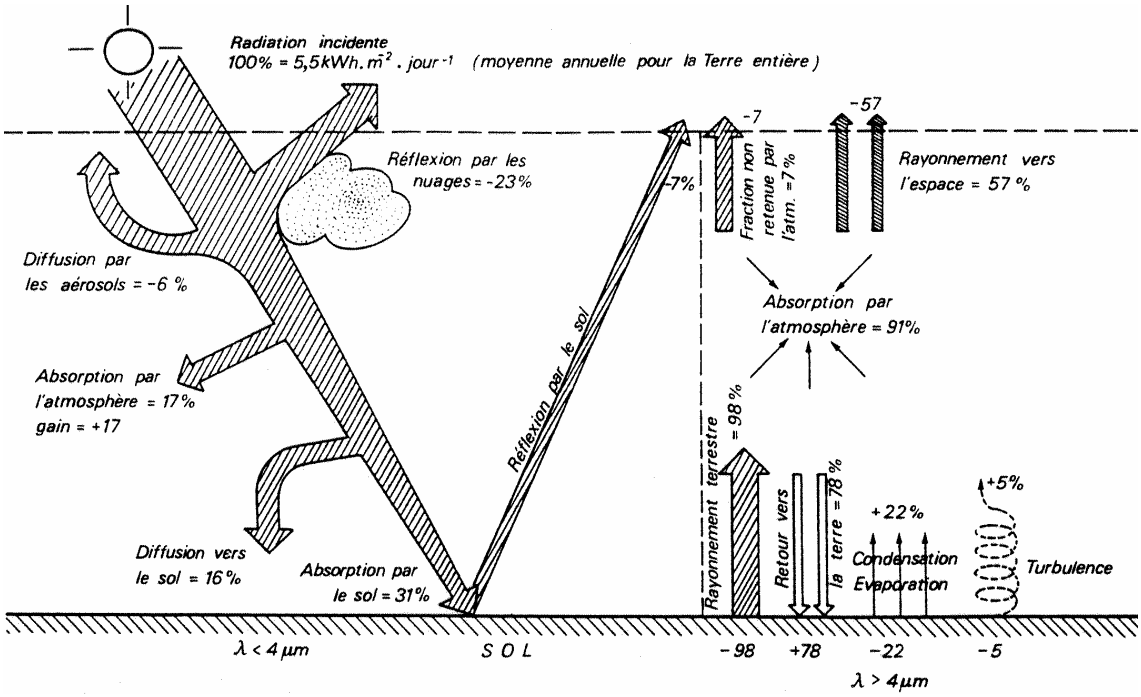


Fig. 105. Bilans quantitatifs des rayonnements solaire et terrestre (d'après [5]).

6.4.1.1 La constante solaire extraterrestre E_0 ; l'excentricité α'

La constante solaire hors atmosphère terrestre est déterminée à partir de la mesure des radiations solaires et représente l'éclairement énergétique total dû au soleil ainsi qu'à une aire d'environ 3° autour du soleil (spécifications de la *World Meteorological Organisation*), en dehors de l'influence de l'atmosphère. La valeur de cet éclairement énergétique se situe, selon les mesures et leurs auteurs, entre 1340 et 1400 W/m^2. La mesure la plus récente donne $E_{0_{moy}}$ = 1367 W/m^2 (pour la totalité du spectre).

Il s'agit là d'une valeur moyenne, qui doit être pondérée par le facteur moyen de correction de la distance terre / soleil α', *i.e.* l'excentricité.

$$\alpha' = \left(\frac{d}{d_m} \right)^2 \text{ , et finalement } \quad E_0 = \alpha' \cdot E_{0moy}$$

où d est la distance terre / soleil un jour J et d_m la distance moyenne.

La valeur de cette excentricité fait l'objet de plusieurs formulations, toutes fonction de j, numéro du jour dans l'année ; il faut remarquer que si sa variation reste assez faible et ne dépasse pas ±3.4 % au cours de l'année (Fig. 106.), sa prise en compte est tout de même importante dans les calculs énergétiques :

- Formulation simplifiée :

$$\alpha' = 1 + 0,34 \cdot \cos\left[0,986(j-3)\right] \quad \text{ou} \quad \alpha' = 1 + 0,337 \cdot \cos\left[\frac{300}{365}(j-3)\right]$$

où j est le quantième de l'année.

- En série de Fourrier :

$$\alpha' = 1,00011 + 0,034221\cos(K) + 0,00128\sin(K) + 0,000719\cos(2K) + 0,000719\cos(2K) + 0,000077\sin(2K)$$

où $K = 2\pi(j-1)/365$, avec j quantième de l'année.

- Dogniaux donne également une décomposition en série de Fourrier, non plus de l'excentricité α' cette fois, mais directement de l'éclairement lumineux en klux :

$$E_0 = 126,82 + 4,248\cos(K) + 0,1691\sin(K) + 0,0825\cos(2K) + 0,00914\sin(2K) - 0,00043\cos(3K) + 0,01726\sin(3K)$$

où $K = 2\pi(j-1)/365$, avec j quantième de l'année.

Cette formulation déjà ancienne donne des valeurs inférieures aux précédentes car Dogniaux se base sur un éclairement énergétique de 1353 W/m^2 (mesures de la NASA datant de 1953) au lieu des 1367 W/m^2 utilisés aujourd'hui ; par contre les variations annuelles sont identiques (+3,4 % au premier janvier, –3,4 % au premier juillet).

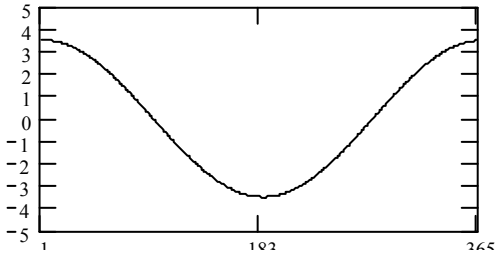


Fig. 106. Variation, en pourcentage, de l'excentricité au cours de l'année.

Parmi ces différentes formulations proposées par les auteurs, on retiendra finalement une valeur de 1367 W/m^2 pour l'éclairement énergétique et un développement en série de Fourrier en ce qui concerne l'excentricité.

Rappelons enfin que même si les variations de l'excentricité sont relativement faibles, et donc sans incidence aucune en imagerie, elles devront être prises en compte dans le cas de calculs énergétiques.

6.4.1.2 La masse d'air optique *m* (ou masse atmosphérique)

La masse d'air optique *m* traduit la longueur du trajet optique, c'est-à-dire l' « épaisseur » de la couche d'air que doit traverser un rayon lumineux rectiligne provenant du soleil ; elle est approximativement proportionnelle à $1/\sin(h)$, mais pour des hauteurs solaires faibles (inférieures à 15°), la courbure de la terre mais aussi celle des rayons lumineux (par variation de l'indice de réfraction avec l'altitude) modifient sensiblement ces valeurs.

D'autre part puisque la pression atmosphérique est précisément le poids de l'air qui existe à la verticale d'un lieu, on en déduit que la masse atmosphérique est proportionnelle à la pression, donc à l'altitude du lieu considéré. La masse atmosphérique unité est celle correspondant à la verticale d'un lieu situé au voisinage du niveau de la mer et où règne une pression de 1000 millibars.

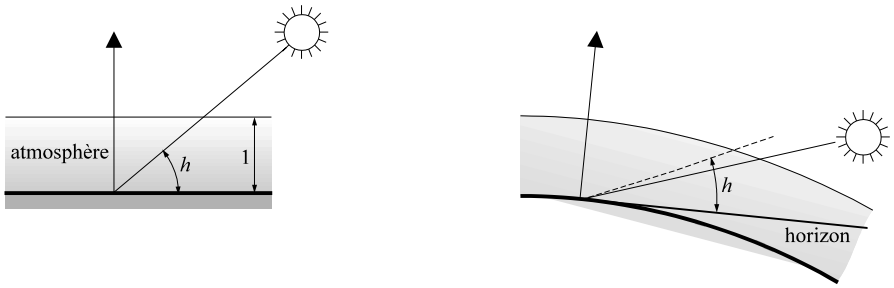


Fig. 107. Trajet des rayons solaires dans l'atmosphère terrestre :
approximation et configuration réelle, qui tient compte de la courbure de la terre.

- La formulation approchée la plus basique n'est utilisable que pour une altitude solaire supérieure à 15° :

$$m = \frac{p}{1000} \cdot \frac{1}{\sin(h)}$$

où p est la pression atmosphérique au sol en millibars.

- Pour les faibles hauteurs solaires notamment, il est préférable d'utiliser l'expression de Dogniaux, nettement plus précise ; là encore est prise en compte la pression atmosphérique, sous la forme de l'altitude du lieu *alt* :

$$m = \frac{1 - 0{,}1 \cdot alt}{\sin h + 0{,}15 \cdot \left(h + 3{,}885\right)^{-1{,}253}}$$

où h est l'altitude du soleil en degrés
et *alt* l'altitude du lieu en kilomètres.

- D'autres formulations sont proposées par certains auteurs (Pirsel[87] par exemple), mais l'expression la plus employée (en météorologie notamment) et sans doute la plus précise est celle de Kasten et Young :

$$m = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{\sin h + 0{,}50572 \cdot \left(h + 6{,}07995\right)^{-1{,}6364}}$$

où h est l'altitude du soleil en degrés.

[87] Voir à ce sujet une communication de L. Pirsel, *New formulae for relative optical air mass determination in sky models*, Lighting Research & Technology, n° 23(1), pp. 85-88, 1991.

Elle est tout à fait identique à celle de Dogniaux dans sa forme, mais elle utilise des coefficients déterminés plus récemment ; la prise en compte des variations de pression atmosphérique est scindée en deux intervalles (seul le premier sera effectivement utile) liés à l'altitude du lieu considéré :

$$\begin{cases} \text{si } alt < 4000 \text{ m}, & \dfrac{p}{p_0} = 1 - \dfrac{alt}{10000} \\ \text{si } alt \le 4000 < 10000 \text{ m}, & \dfrac{p}{p_0} = \exp\left[\dfrac{h}{1000}\left(-0.1174 - 0.0017\dfrac{h}{1000}\right)\right] \end{cases}$$

Finalement $m \approx \dfrac{1}{\sin h}$ pour un site dont l'altitude est voisine du niveau de la mer et pour des hauteurs solaires supérieures à 10°.

Une comparaison entre la formulation simplifiée et celle de Kasten et Young montre qu'au-delà d'une dizaine de degrés, les deux expressions sont identiques (Fig. 108.) ; par contre l'erreur devient importante pour des altitudes solaires très faibles. Mais il faut cependant noter que celles-ci ne concernent finalement que très peu notre problématique : d'une part parce qu'en milieu urbain le bâti ou la végétation constituent presque toujours un obstacle aux rayons solaires de faible altitude angulaire ; d'autre part parce que l'énergie du rayonnement est alors trop faible pour être réellement significative ; en revanche l'aspect spectral peut être intéressant à considérer puisque dans ces zones le soleil arbore souvent une couleur rouge orangée, au crépuscule surtout (due à la longueur du trajet des rayons solaires dans la couche atmosphérique, qui absorbe plus facilement les rayonnements de courte longueur d'onde). La coloration qui peut en résulter (des façades exclusivement) n'est pas inintéressante sur le plan plastique, même si le phénomène est éphémère (quelques dizaines de minutes tout au plus).

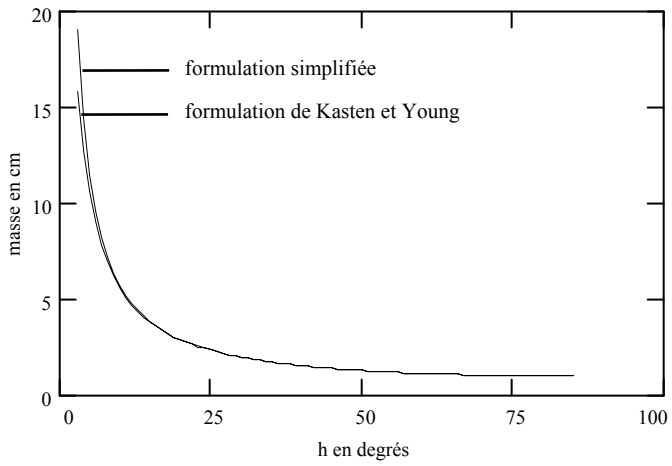


Fig. 108. Variation de la masse atmosphérique en fonction de la hauteur solaire *h* ; la formulation simplifiée est représentée pour *p* = 1000 mb.

6.4.1.3 La hauteur d'eau précipitable *w* ; le trouble atmosphérique *T*

La hauteur d'eau précipitable correspond à la hauteur d'eau qui serait recueillie par cm^2 de surface horizontale de sol si toute la vapeur d'eau située au dessus était collectée à l'état liquide. Elle est fournie par la formule empirique de Hahn ($w = 0{,}17 \cdot e$, où e est la tension de vapeur d'eau au sol exprimée en millibars) et varie généralement entre 0,5 et 6 cm.

De nombreux modèles prennent également en compte le trouble atmosphérique (ou turbidité), qui traduit la quantité de poussières, d'aérosols et de gouttelettes que contient l'atmosphère. Elle s'exprime en fonction de la hauteur d'eau précipitable (ou condensable) *w* exprimée en centimètres, et du coefficient de turbidité d'Angström β, qui lui-même dépend de la quantité d'aérosols présents dans l'air :

$$T = \frac{h + 85}{39{,}5 \cdot \exp(-w) + 47{,}4} + 0{,}1 + \beta \cdot (16 + 0{,}22w)$$

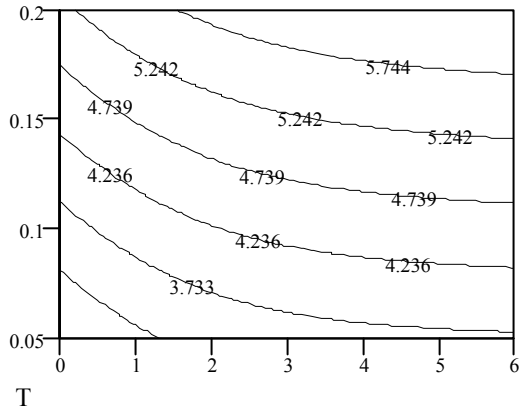
où w varie entre 0,5 et 5 ou 6 cm

et β a ses valeurs typiques comprises entre 0,05 et 0,20.

Type de climat	Hauteur d'eau précipitable *w* (cm)
Polaire et désertique (air sec)	0,5 - 1
Tempéré	2 - 4
Tropical (air humide)	> 5

Site	Coefficient de turbidité d'Angström β (d'après Page)
Rural	0,05
Urbain	0,10
Industriel	0,20

Fig. 109. Valeurs moyennes de la hauteur d'eau précipitable *w* et du coefficient de turbidité d'Angström β.



Site	*T*
Air parfaitement sec et propre	1,0
Zones de montagnes sèches	1,5
Zones rurales	2,5
Zones urbaines	3,0
Zones industrielles	5,0

Fig. 110. A gauche, variation de la turbidité en fonction de *w* et de β ($h = 45°$) ;
à droite, valeurs courantes du trouble atmosphérique *T* sous un ciel sans nuages (d'après Linke).

Globalement, la turbidité *T* varie de 2 environ pour une atmosphère très claire et sèche jusqu'à 5 et au-delà dans des conditions d'humidité ou de pollution importantes (Fig. 110.).

6.4.1.4 Le coefficient d'extinction atmosphérique *a*

Lorsque les radiations solaires traversent l'atmosphère terrestre, leur intensité ainsi que leur distribution spectrale et directionnelle changent de manière significative. Ces modifications sont dues à l'absorption et à la diffusion des radiations par les constituants de la couche atmosphérique (ozone, oxygène, eau, gaz carbonique), variables avec la longueur d'onde (l'absorption par l'ozone est importante dans la région ultraviolette, conduisant à une atténuation considérable des rayons UV en dessous de 400 nm, et totale en-deçà de 300 nm). L'ozone contribue encore à une certaine absorption dans le domaine du visible, de même que l'oxygène ; par contre dans l'infrarouge proche et lointain, l'absorption est principalement due à la vapeur d'eau. Quant aux poussières et aux aérosols, ils absorbent les radiations sur l'ensemble du spectre solaire.

La diffusion atmosphérique contribue à la redirection des rayons solaires et est de deux types : la diffusion de Rayleigh, provoquée par les molécules de gaz, qui est quasiment uniforme et redistribue les radiations de manière égale dans toutes les directions ; environ la moitié des radiations diffusées rencontrent la surface terrestre. Tout point de la surface reçoit donc des radiations diffuses (au sens de Rayleigh) en provenance de toutes les directions.

La diffusion de Mie au contraire, provoquée par les poussières et les aérosols, a lieu dans des directions voisines de celles des rayons incidents ; toutes ces radiations rencontrent la surface terrestre selon une direction proche de celle des rayons solaires.

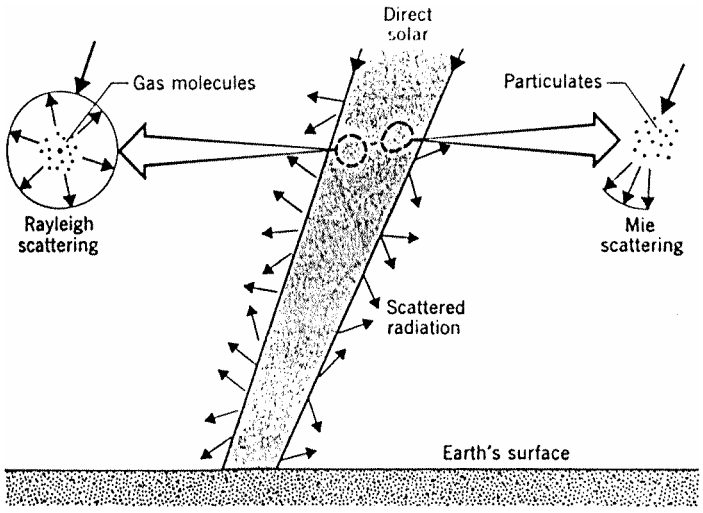


Fig. 111. Phénomènes de diffusion dans la couche atmosphérique (Rayleigh et Mie).

Le coefficient d'extinction atmosphérique mesure la quantité de radiations diffusée par les molécules de l'atmosphère (diffusion de Rayleigh), que l'on sait être variable selon la longueur d'onde (la diffusion est plus importante pour les radiations de courte longueur d'onde) ; c'est précisément ce phénomène de diffusion – une lumière diffusée plus riche en radiations de courte longueur d'onde que la lumière transmise directement – qui est responsable de la couleur bleue du ciel.

Il existe là encore plusieurs formulations, toutes basées sur les résultats de Rayleigh[88] ; on se limitera ici à celle fournie par Dogniaux, qui est fonction du trouble atmosphérique T et du coefficient de turbidité d'Angström β :

$$a = 0,1512 - 0,0262T \quad \text{pour} \quad \beta < 0,075$$

$$a = 0,1656 - 0,0215T \quad \text{pour} \quad \beta < 0,075 \leq \beta \leq 0,15$$

$$a = 0,2021 - 0,0193T \quad \text{pour} \quad \beta \geq 0,15$$

6.4.2 L'éclairement solaire direct : les différents modèles

On trouve dans la littérature de nombreuses expressions permettant d'évaluer l'éclairement solaire direct ; aussi ne fera-t-on que citer ici les formulations les plus classiques et les plus utilisées. Elles fournissent pour la plupart un éclairement énergétique en W/m^2.

6.4.2.1 Formules de Perrin de Brichambaut [66]

Elles permettent de calculer, pour une surface perpendiculaire aux rayons solaires, la valeur de l'éclairement normal direct du soleil à partir de trois équations statistiques, qui correspondent à trois conditions d'insolation distinctes : conditions normales, ciel très pur, ou situation en zone industrielle.

Pour les conditions normales, la courbe statistique a pour équation :

$$I_{moy} = 1230 \cdot e^{-1/3,8\sin(h+1,6)} \quad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

où h est l'altitude solaire en degrés.

[88] Lord Rayleigh (1842-1919, prix Nobel de physique en 1904 pour des recherches concernant la densité des gaz et sa découverte de l'argon.

Les autres conditions d'insolation (ciel très pur et zone industrielle, correspondant respectivement à un éclairement maximum et minimum) sont paramétrées par des équations similaires, dans lesquelles seuls les coefficients numériques changent.

- Ciel très pur :

$$I_{max} = 1220 \cdot e^{-1/6\sin(h+1)} \qquad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

- Zone industrielle :

$$I_{min} = 1260 \cdot e^{-1/2{,}3\sin(h+3)} \qquad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

On notera que pour une hauteur solaire de 60° (hauteur atteinte en France en été), la valeur de cet éclairement peut varier dans des proportions considérables :

$$I_{max} = 1008 \ \mathrm{W \cdot m^{-2}} \qquad I_{moy} = 912 \ \mathrm{W \cdot m^{-2}} \qquad I_{min} = 773 \ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

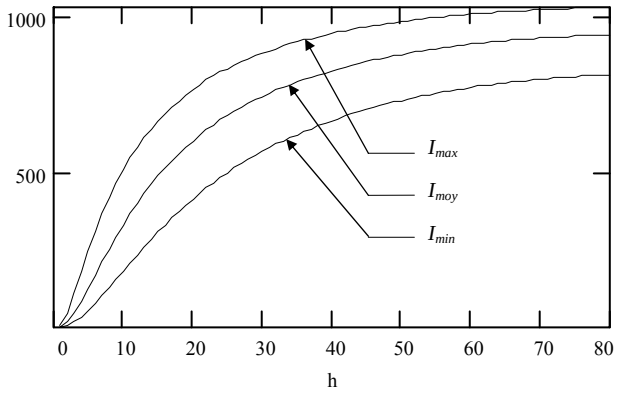


Fig. 112. Comparaison de l'éclairement solaire direct pour les trois conditions d'insolation définies par Perrin de Brichambaut (en W/m^2).

L'exemple et les courbes qui précèdent (Fig. 112.) montrent clairement que les conditions d'insolation (qui dépendent de la situation de la zone étudiée – site de montagne ou au contraire zone industrielle) peuvent affecter de manière importante l'éclairement solaire disponible à la surface terrestre – il s'agit pourtant dans les trois cas d'un ciel dit « clair ». Pour une altitude solaire de 60°, on a vu que I pouvait varier de 773 à 1008 W/m^2 selon les conditions ; pour une altitude solaire de 30° par exemple, I peut varier entre 500 et 800 W/m^2...

L'éclairement direct S_e sur un récepteur horizontal est obtenu par projection du rayonnement incident I sur la normale à ce plan récepteur, soit :

$$S_e = I \cdot \sin h \quad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

6.4.2.2 Expression de Dogniaux [18]

C'est sans doute l'une des formulations les plus classiques de l'éclairement solaire direct sur un plan horizontal :

$$S_e = E_{0e} \cdot e^{-amT} \sin h \quad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

où E_{0e} est la constante solaire extraterrestre (1367 $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$),
m la masse d'air,
a le coefficient d'extinction atmosphérique,
et T le trouble atmosphérique.

6.4.2.3 Formule de Perraudeau

Michel Perraudeau, ingénieur au CSTB[89], propose l'expression suivante :

$$S_e = 1000 \cdot (1 - e^{-0{,}055h}) \qquad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

où h est la hauteur solaire en degrés.

6.4.2.4 Le logiciel Radiance [82]

Radiance fournit, en fonction de sa hauteur h, la luminance lumineuse du soleil par temps clair (en $\mathrm{cd/m^2}$) et non plus, comme les autres modèles, un éclairement énergétique en $\mathrm{W/m^2}$.

$$L_{e,\,\mathrm{clair}} = E_{0v} \cdot \left(1{,}147 - \frac{0{,}147}{\sin h}\right) \cdot \varpi \qquad (\mathrm{kcd \cdot m^{-2}})$$

où h est la hauteur solaire,
et ϖ l'angle solide sous lequel le soleil est vu de la terre (environ 1/14700 sr).

On peut noter que *Radiance* fournit également la luminance lumineuse du soleil pour un ciel intermédiaire, mais de manière tout à fait arbitraire cette fois :

$$L_{e,\,\mathrm{intermédiaire}} = 0{,}15 \cdot L_{e,\,\mathrm{clair}} \qquad (!)$$

[89] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

6.4.2.5 Modèle Perez et al. [61]

Ce modèle de *ciel* est paramétré à l'aide des 2 coefficients ε et Δ, le premier traduisant le degré de pureté du ciel, le second sa luminosité (ε et Δ sont les indices de clarté et de luminosité du modèle de Perez). Ces coefficients permettent de déterminer l'éclairement énergétique diffus sur un plan horizontal D_e et normal direct S_e.

Perez définit ces éclairements par les expressions suivantes :

$$D_e = \Delta \cdot E_{0e} \frac{\alpha'}{m} \qquad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

$$S_e = D_e \cdot (\varepsilon - 1)(1 + 1{,}041 \cdot Z^3) \quad (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$$

où ε et Δ sont les coefficients du modèle (indices de clarté et de luminosité respectivement),
E_{0e} la constante solaire (1367 $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$),
α' le coefficient d'excentricité,
m la masse d'air optique,
et Z l'angle solaire zénithal ($Z = \pi/2 - h$).

Les paramètres du modèle ε et Δ varient respectivement dans les intervalles [1 ; 12] et [0,01 ; 0,6]. Pour ε, la valeur 1 correspond à un ciel totalement couvert, des valeurs supérieures à 6 à un ciel dégagé ; quant à Δ, 0,05 indique un ciel sombre et 0,5 un ciel très brillant.

On comprend dès lors que ce modèle est susceptible de paramétrer divers types de ciels, allant du ciel couvert très sombre au ciel très clair entièrement dégagé ; on trouvera donc une description beaucoup plus complète de ce modèle dans la section consacrée aux *Modèles tous temps*, section 6.6.6.

Dans cette section consacrée à l'énergie solaire directe, il faut pourtant remarquer que l'expression de S_e du modèle de Perez montre que l'éclairement direct devient nul si $\varepsilon = 1$, ε pouvant varier de 1 à 12 ; autrement dit, $\varepsilon = 1$ définit un ciel totalement couvert, et des valeurs supérieures à 1 correspondront à des ciels intermédiaires, c'est-à-dire partiellement couverts (ou encore nuageux) ; donc pour toute valeur de ε supérieure à 1, le modèle Perez prend en compte une fraction de l'éclairement solaire direct qui correspondrait à celui d'un ciel clair.

Cette considération est importante dans l'hypothèse d'un bilan énergétique sur une journée par exemple, au cours de laquelle l'éclairement direct peut être intermittent en raison d'une couverture nuageuse rapidement changeante (le littoral atlantique en est un exemple représentatif).

Cet aspect distingue fondamentalement le modèle Perez des expressions proposées par Perrin de Brichambaut et Dogniaux, qui ne sont valides que par ciel clair.

6.4.3 Comparaison des modèles

Le diagramme ci-dessous compare les éclairements solaires directs pour les modèles qui viennent d'être décrits (Perrin de Brichambaut, Dogniaux, Perraudeau, Radiance, Perez et *al*.) en fonction de l'altitude solaire *h*.

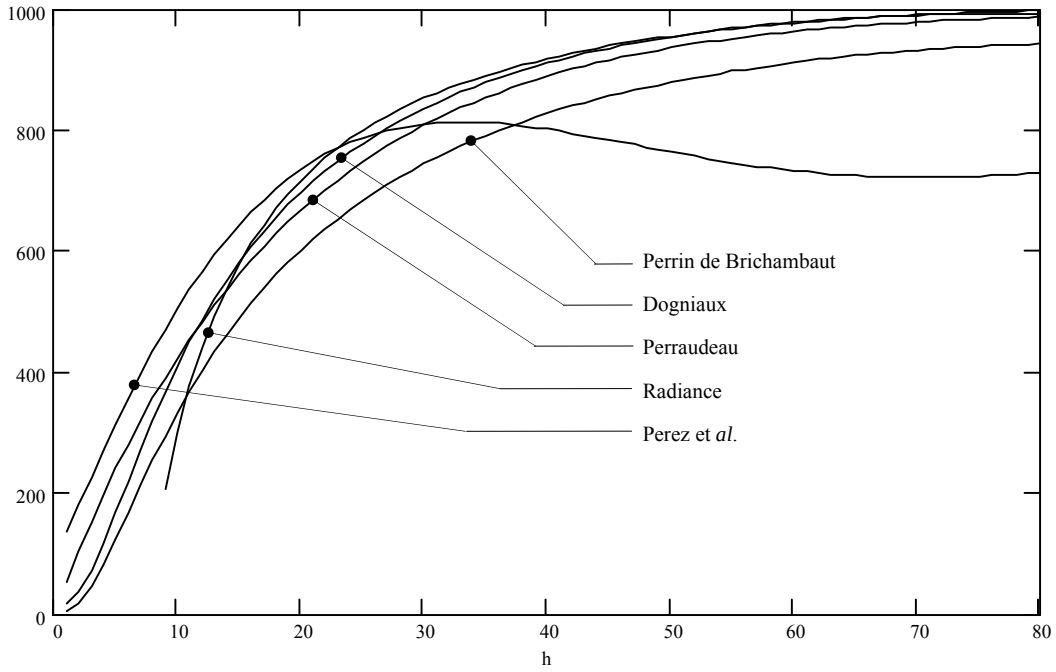


Fig. 113. Comparaison des éclairements solaires directs (en W/m^2) pour les cinq modèles décrits (en fonction de la hauteur solaire *h*) : Perrin de Brichambaut (conditions normales), Dogniaux, Perraudeau, le logiciel Radiance et enfin le modèle Perez et *al*. (avec $\Delta = 0{,}12$ et $\varepsilon = 6{,}3$).

On note immédiatement une bonne corrélation de trois modèles (Dogniaux, Radiance et Perraudeau) ; le modèle de Perrin de Brichambaut donne des valeurs un peu plus faibles tout au long de la courbe, et le modèle Perez et *al*. affiche des disparités notables par rapport aux quatre modèles précédents, surtout pour les altitudes solaires supérieures à une trentaine de degrés. Ces disparités proviennent du fait que le modèle de Perez est largement paramétrable ; les valeurs attribuées ici aux deux paramètres correspondent, selon son auteur, au ciel serein.

6.4.4 Conclusion

Même si d'autres modèles existent dans la littérature, il est clair que ceux qui viennent d'être évoqués permettent de modéliser avec suffisamment de précision l'éclairement solaire direct, d'autant plus que les valeurs de cet éclairement sont susceptibles de varier de manière importante avec les conditions atmosphériques. Aussi ce n'est pas tant la précision intrinsèque du modèle qu'il paraît nécessaire de rechercher à tout prix (et par rapport à quel étalonnage ?), mais plutôt une certaine cohérence dans le rapport énergie directe / énergie diffuse pour les différentes conditions d'insolation.

La construction du modèle d'éclairement de SOLENE se poursuit avec l'étude de la voûte céleste, dans un premier temps sous ses aspects géométriques, en second lieu en termes de distribution des luminances sur cet hémisphère.

6.5 Modèle géométrique de ciel

6.5.1 Introduction

À l'instar du soleil, dont la prise en compte a nécessité à la fois un modèle géométrique (sa position) et un modèle énergétique, la voûte céleste requiert une géométrie susceptible de « porter » les distributions statistiques des luminances célestes.

La voûte céleste est considérée comme un hémisphère de rayon infini devant les dimensions de la scène à étudier (Fig. 114.) ; autrement dit la scène urbaine dans son ensemble constituera le centre de l'hémisphère, et finalement le rayon de cette sphère imaginaire n'interviendra pas. Aussi déterminer l'influence d'une portion de ciel sur l'ensemble de la scène reviendra à considérer uniquement le vecteur dont l'origine est le centre de la zone de ciel en question, et dirigé vers le centre de l'hémisphère (donc vers la scène), indépendamment de leur distance relative.

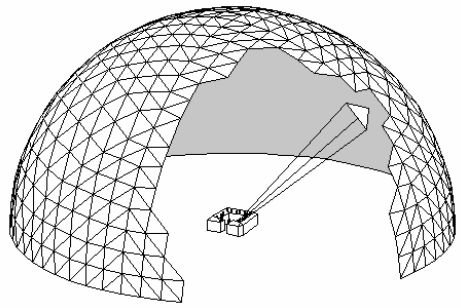


Fig. 114. La scène urbaine est réduite à un point devant le rayon « infini » de l'hémisphère céleste.

Finalement, ce dôme hémisphérique constitue, lorsqu'on le considère de manière globale, une source d'éclairement diffus dont l'intensité n'est évidemment pas uniforme ; la répartition dépend de plusieurs facteurs, et en particulier du type de ciel (c'est-à-dire des conditions atmosphériques), et de la position du soleil. Il s'agit donc de rendre compte des potentialités d'éclairement des différentes parties du ciel en fonction de la position du soleil, de la couverture nuageuse éventuelle, etc. Le traitement numérique conduit assez naturellement à un morcellement de l'hémisphère – à sa discrétisation –, où chacun des éléments dispense une énergie uniforme sur la totalité de sa surface.

Mais la nécessité de discrétiser l'hémisphère céleste n'est pas la conséquence du traitement numérique ; en effet elle prend naissance avec les premières mesures de la luminance du ciel, effectuées aux États-Unis dans les années 20 : la répartition des luminances n'étant pas uniforme, les différentes mesures effectuées l'ont été dans une région différente du ciel. La taille et la disposition des éléments de surface sont donc particulièrement adaptées aux dispositifs technologiques susceptibles de mesurer cette luminance (en l'occurrence la sonde des luminancemètres), mais paraissent difficilement convenir à nos exigences, principalement en raison de la taille importante de l'angle solide embrassé par ces équipements.

Constituer un modèle géométrique revient donc à choisir un type de discrétisation et à déterminer, pour un observateur situé au centre de l'hémisphère, l'angle solide sous lequel est vu chaque élément de la surface du ciel ; chacun d'eux est alors considéré comme un émetteur d'énergie isotrope, ce qui n'est pas sans conséquence sur l'étendue de ces éléments (et finalement sur le choix de la finesse du maillage).

Enfin la géométrie proposée doit également permettre d'effectuer une visualisation convenable des conditions d'insolation qui, comme on le verra dans la suite, sont définies soit par une terminologie normalisée (derrière laquelle se cache une fonction statistique relativement simple), ou alors directement par un ou plusieurs coefficients, paramètres de fonctions statistiques plus complexes. Mais dans tous les cas, rien ne permet jusqu'alors de rendre compte du gradient de luminance sur cette voûte céleste.

Le maillage de l'hémisphère pouvant s'effectuer de nombreuses manières, on n'évoquera ici que les plus classiques, et notamment celles utilisées pour la mesure des luminances de ciel, ainsi que le principe retenu et mis en application dans SOLENE.

6.5.2 Différents modes de discrétisation de la voûte céleste

Comme on vient de l'évoquer, le type de division est directement lié au dispositif technologique permettant l'orientation de la sonde de mesure des luminances de ciel. Le principe le plus simple pour le calage de cette sonde consiste à effectuer deux balayages angulaires : l'un dans le plan horizontal (azimut), un autre dans un plan vertical (altitude), la conjugaison de ces deux mouvements permettant de décrire la totalité de l'hémisphère.

6.5.2.1 Discrétisation en éléments trapézoïdaux (type CIE et Le Strat)

C'est précisément le principe de subdivision ci-dessus qu'a retenu par la CIE pour les mesures de luminance dans *le CIE International Daylight Measurement Project* (IDMP – voir la Fig. 115.). La voûte céleste a été divisée en 145 éléments trapézoïdaux dont les angles solides sont quasiment identiques ; ce choix permet d'obtenir des éléments dont l'aire correspond approximativement à l'aire de mesure de la sonde des luminancemètres, qui est constante quelle que soit la direction visée.

L'hémisphère est divisé en bandes parallèles à l'horizon de hauteur 12°, et la subdivision azimutale varie avec l'altitude de manière à conserver des éléments d'aire approximativement similaire. Un principe identique est adopté pour les grilles qui permettent la lecture de la couverture nuageuse à partir de photographies de l'ensemble de la voûte céleste (voir la section 6.6.1). Dans cette dernière utilisation, la lecture, qui s'effectue encore souvent de manière visuelle, nécessite des zones d'aires identiques ; il est en effet bien connu que le cerveau donne assez « naturellement » un poids égal à des surfaces d'aires similaires, mais qu'il éprouve par contre beaucoup de difficultés à attribuer des poids différents à des zones de surfaces différentes (aspects concernant le domaine de la psychologie de la perception) (Fig. 115.).

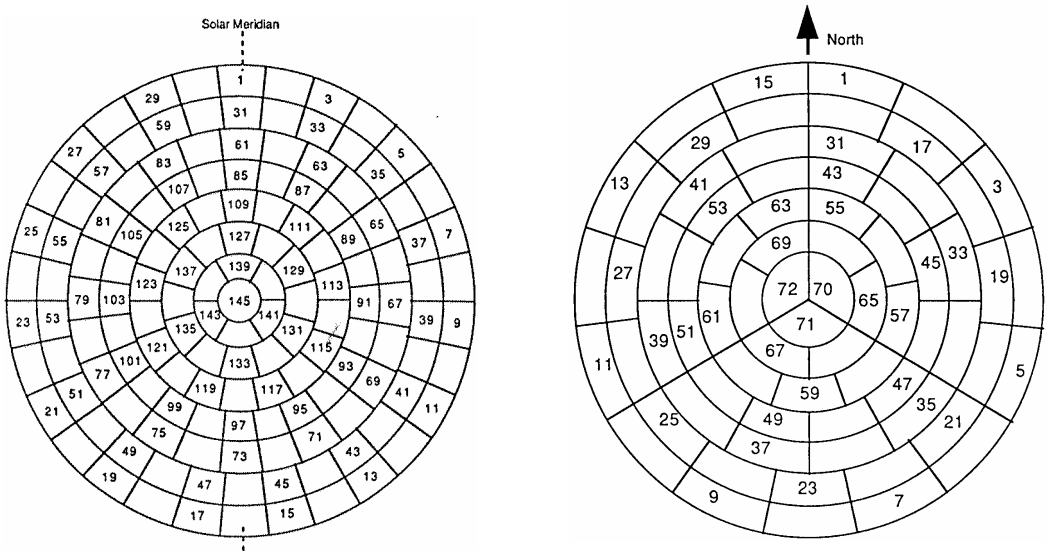


Fig. 115. A gauche la subdivision de la voûte céleste adoptée par l'IDMP (145 éléments) pour la mesure des luminances ; à droite une proposition de partition en 72 éléments de cette même voûte pour la lecture de la couverture nuageuse[90].

[90] C. Wolldridge & S. Hayman, *Cloud cover assessment grids forwhole-sky images*, Lighting Research & Technology, pp. 9-12, 26(1), 1994.

Les expressions mathématiques de distribution de la luminance sur la voûte céleste étant des fonctions continues, elles permettent la détermination de cette luminance en tout point du ciel ; il est donc possible d'adopter un maillage différent de celui utilisé pour les mesures. Aussi G. Le Strat [38] propose-t-il une division proche de la division CIE, mais plus précise puisqu'elle comporte 265 éléments. Il divise l'hémisphère en 12 bandes parallèles, mais leur hauteur inégale est choisie d'une manière telle qu'encore une fois, les angles solides soient tous égaux (Fig. 116.).

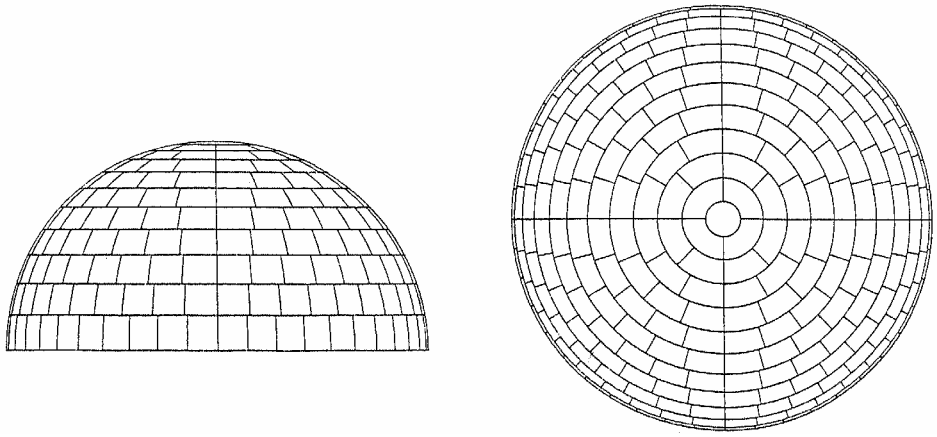


Fig. 116. Subdivision de la voûte céleste en 265 éléments, proposée par Le Strat.

L'intérêt de ces types de discrétisation est de n'imposer qu'un seul calcul d'angle solide, valable pour tous les éléments, mais cette propriété semble difficile à concilier avec un maillage de finesse variable. De plus, cette discrétisation conduit à des éléments d'angle solide assez important qui, s'ils peuvent convenir pour des distributions de luminance à faible gradient (ciel couvert), deviennent impossibles à utiliser si la zone solaire présente un pic aigu de luminance (ciel clair par exemple) en raison de leur imprécision dans les régions à fort gradient (régions proches de la position solaire).

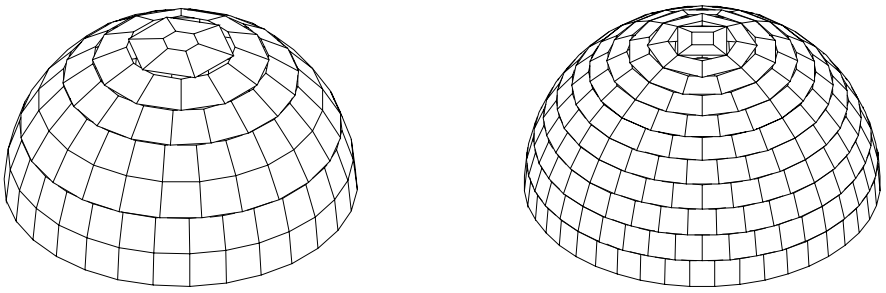
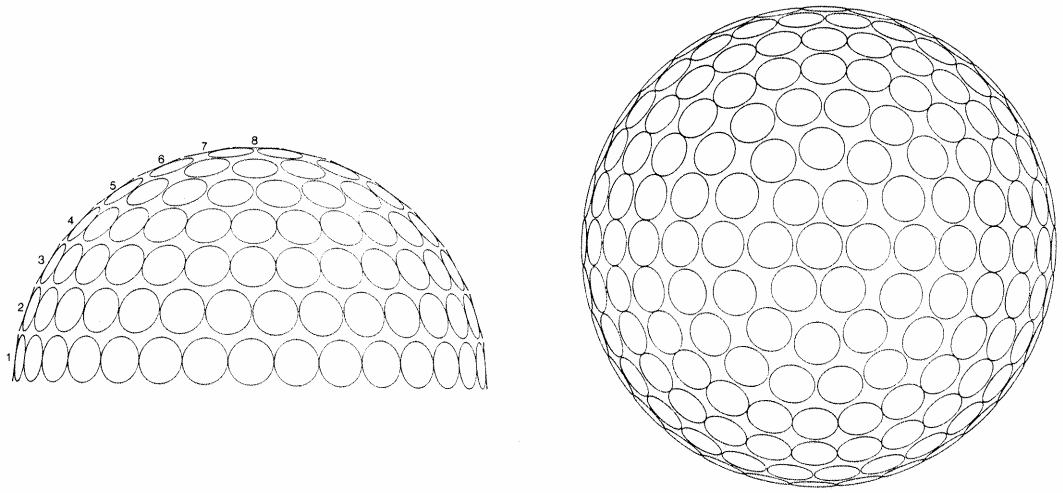


Fig. 117. Représentation tridimensionnelle de la discrétisation de la voûte céleste : type CIE à gauche, type Le Strat à droite (145 et 265 éléments respectivement).

6.5.2.2 Discrétisation en éléments « circulaires »

Un autre type de subdivision a été proposée vers 1987 par Tregenza [76] dans le but de simplifier les mesures de luminance sur l'hémisphère céleste. L'angle de mesure de la sonde des luminancemètres étant d'environ 10°, Tregenza divise l'hémisphère en 151 zones circulaires identiques (sans aucun recouvrement), disposées en bandes parallèles à l'horizon, de hauteur angulaire égale à 12° (π/15 rad). Chaque bande est ensuite divisée à nouveau, selon son azimut, par l'entier pair qui conduit à des éléments dont la largeur sera voisine de 0,2 rad à mi-hauteur. L'aire totale de ces 151 zones couvre environ 70 % de la surface totale de l'hémisphère.

Lynes[91] propose une alternative à la subdivision de Tregenza : il s'agit d'une division similaire en 151 zones circulaires, mais qui peuvent être d'aires différentes. Les 151 zones couvrent cette fois 88,5 % de l'hémisphère.



Bande n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de zones	32	30	28	24	18	12	6	1
Altitude du centre (°)	6	18	30	42	54	66	78	90
Incrément azimutal (°)	11,25	12,00	12,86	15,00	20,00	30,00	60,00	
Largeur angulaire de la zone au centre de la bande (°)	11,19	11,41	11,13	11,15	11,76	11,20	12,47	

Fig. 118. Les 151 zones circulaires de la subdivision Tregenza et au-dessus leurs différents angles (altitude, azimut et largeur angulaire de la zone en son centre).

[91] Voir un article de J. A. Lynes, *Alternative subdivision for the sky vault*, Lighting Research & Technology, n° 20(1), pp. 33-37, 1988.

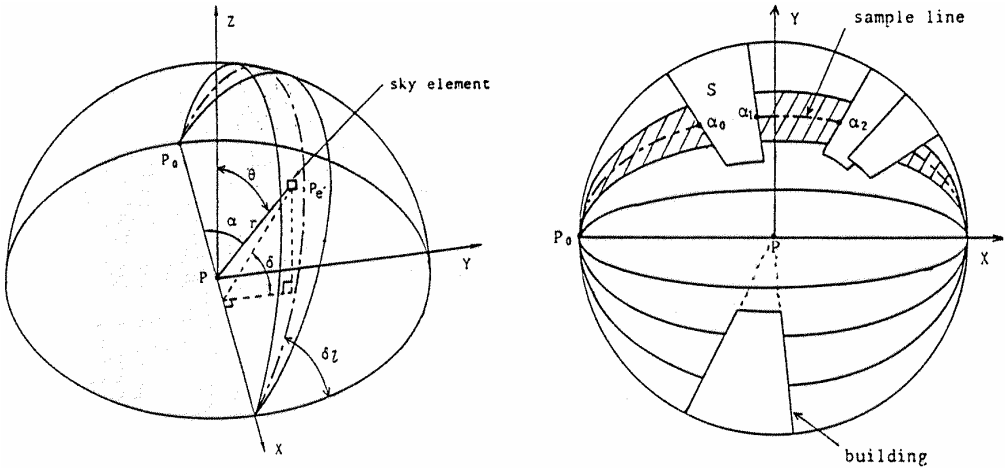
La division de Tregenza a pour avantage de produire des zones d'angles solides identiques (ce n'est plus le cas avec Lynes), mais présente les mêmes inconvénients majeurs que les subdivisions (CIE et Le Strat) évoquées plus haut : une discrétisation fixe, mais surtout un nombre d'éléments beaucoup trop faible pour rendre compte avec précision des gradients de luminance dans les zones à fortes variations.

6.5.2.3 Discrétisation en secteurs sphériques

Si les subdivisions de l'hémisphère décrites précédemment étaient identiques dans leur principe (division en bandes horizontales parallèles, puis subdivision azimutale), la méthode proposée par Nishita et Nakamae [55] est particulièrement originale ; à noter qu'elle a été développée dans un objectif de simulation numérique (imagerie), et donc totalement détachée des contraintes technologiques liées aux appareils de mesure des luminances célestes.

Nishita et Nakamae proposent une division de la voûte céleste en bandes (*band sources*) dont la luminance varie de manière continue selon leur direction longitudinale (Fig. 119.). Les auteurs la décrivent comme moins coûteuse en temps de calculs qu'une discrétisation totale de l'hémisphère – un aspect sans doute important à l'époque où la méthode a été développée (vers 1984), mais qui l'est évidemment beaucoup moins à l'heure actuelle compte tenu du bond prodigieux des moyens de calcul ; la luminance des *band sources* n'est considérée qu'en leur « milieu » (*sample line*), et leur portion visible est déterminée par intersection du plan contenant le centre de l'hémisphère et le milieu de la bande avec le bâti.

Mais en définitive la méthode d'échantillonnage de Nishita et Nakamae apparaît plus complexe à mettre en œuvre et surtout plus délicate en ce qui concerne la visualisation de la répartition des luminances sur l'hémisphère, et finalement beaucoup moins souple que la solution que nous proposons dans la section suivante : une triangulation géodésique.



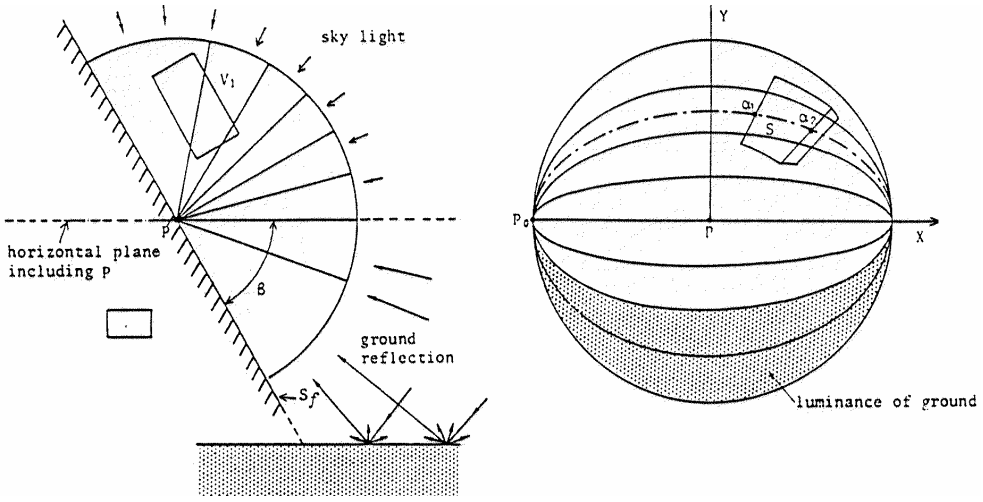


Fig. 119. Division de la voûte céleste en *band sources*, selon la méthode proposée par Nishita et Nakamae (1978). En haut à gauche la méthode de subdivision en secteurs sphériques ; à droite détermination des parties visibles de la *band-source* par utilisation de la *sample line* ; en bas calcul de la luminance sur un plan incliné.

6.5.3 Méthode développée dans SOLENE : la triangulation géodésique

La triangulation géodésique[92] que nous proposons est basée sur une partition octaédrique de la sphère, la seule qui comporte un plan de symétrie diamétral, lequel correspondra à l'horizon local (il s'agit de diviser l'hémisphère et non la sphère entière) ; de plus les calculs sont facilités par l'existence d'une symétrie d'ordre 4 d'axe zénithal ; les autres types de partition (tétraédrique et icosaédrique) sont d'un emploi moins aisé lorsqu'il s'agit de mailler uniquement l'hémisphère.

Contrairement au principe des méthodes précédentes (rechercher l'égalité des angles solides), on s'intéresse ici à une disposition particulière des côtés curvilignes des mailles polygonales. Elles sont constituées ici de triangles dont les côtés sont des portions de cercles équatoriaux, c'est-à-dire de cercles contenus dans des plans passant par le centre de l'hémisphère (Fig. 120.). Les angles solides appartiennent alors à plusieurs familles différentes, mais leur calcul est extrêmement aisé – et rapide sur le plan informatique puisqu'il ne met en oeuvre que des opérations simples – ; il est en effet possible

[92] La plupart des travaux concernant les partitions de la sphère ont été réalisés par l'architecte et ingénieur américain Bukminster Fuller à partir des années 40 ; ses recherches l'ont mené au célèbre « dôme géodésique », partition de la sphère permettant d'approcher au plus près son volume exact avec une quantité minimale de matériau. Fuller a attribué à son dôme le qualificatif de *géodésique* en référence aux géodésiques d'une sphère, cercles situés dans des plans passant par son centre (grands cercles donc, et trajectoires sur lesquelles la distance entre deux points de la surface de la sphère est minimale) ; le terme est dérivé d'un mot grec signifiant *partition de la terre*.

d'utiliser le théorème de Girard[93], qui permet de déterminer l'aire d'un triangle sphérique précisément dans le cas où ses côtés sont des portions de grand cercle. L'aire de ce triangle est alors égale à :

$$A = (\hat{a} + \hat{b} + \hat{c} - \pi) \cdot r^2 \ ,$$

où $\hat{a}$, $\hat{b}$ et $\hat{c}$ représentent les angles du triangle sphérique mesurés, en chacun de ses sommets, dans un plan tangent à la sphère,

et r le rayon de la sphère.

Or l'aire A qui vient d'être définie correspond très exactement à l'angle solide sous lequel est vu le triangle depuis le centre de l'hémisphère si ce dernier est de rayon unitaire. Il s'agira donc de déterminer chacun des angles de ce triangle, mesuré dans un plan tangent au sommet concerné.

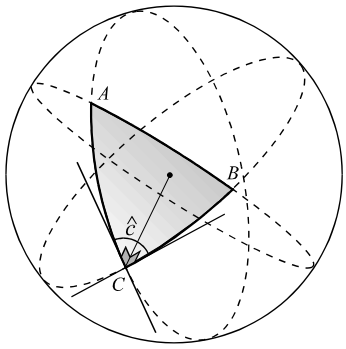


Fig. 120. Les éléments géométriques d'un triangle sphérique (sommets, côtés et angles).

Le premier niveau de maillage approche la sphère par un demi-octaèdre (4 faces) ; passer à un niveau supérieur de la discrétisation consistera à subdiviser chacun des triangles sphériques en 4 parties, conduisant ainsi à un maillage en 16, 64, 256, 1024, 4096, ... éléments de surface, c'est-à-dire 4^n triangles sphériques (Fig. 122.).

Et c'est précisément là que se situe l'avantage essentiel de ce type de discrétisation : elle permet très facilement une subdivision récurrente selon le degré de précision voulu – ce que ne permettaient pas les divisions circulaires ou trapézoïdales, fixées une fois pour

[93] Girard Albert, 1595-1632, mathématicien français ; son traité sur la trigonométrie publié en 1626 est le premier à comporter les abréviations *sin*, *cos*, *tan* ; il contient également la formule de l'aire du triangle sphérique.

toutes. D'autre part la triangulation géodésique permet de recouvrir totalement l'hémisphère, autorisant ainsi la visualisation des conditions de distribution sans aucune discontinuité. Des modes de représentation tridimensionnels encore plus évocateurs de la distribution des luminances sur la voûte céleste sont proposés dans la section 6.7, relative à la représentation des modèles.

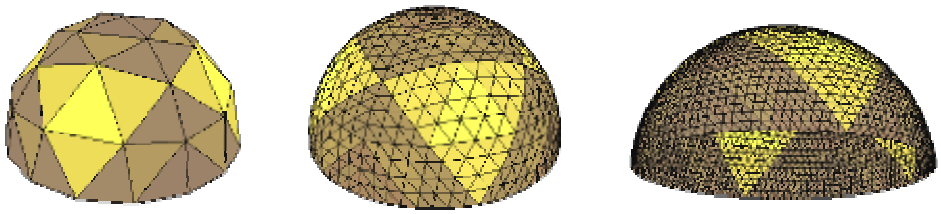


Fig. 121. Triangulation de la voûte céleste basée sur une partition semi-octaédrique en 64, 1024 et 4096 éléments triangulaires.

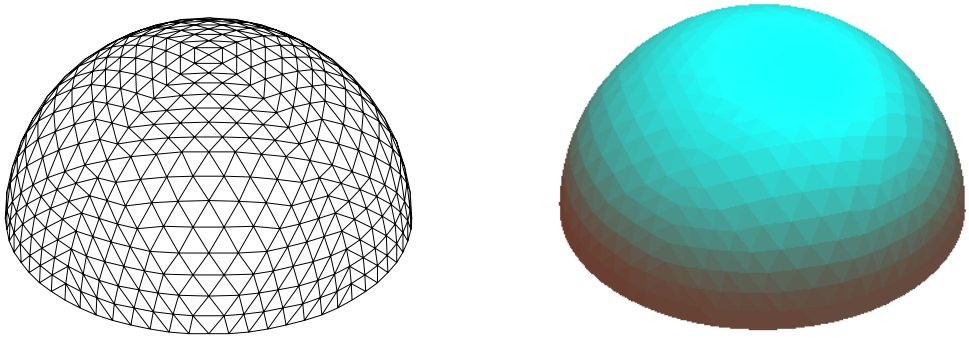


Fig. 122. Triangulation géodésique de la voûte céleste en 1024 éléments, et visualisation d'une répartition de luminance à l'aide d'un gradient couleurs.

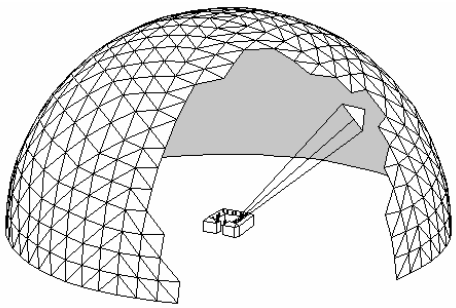


Fig. 123. Angle solide sous lequel est vu un élément de ciel.

L'expérimentation a montré que ce sont, dans la plupart des cas, les maillages en 1024 éléments qui offrent le meilleur rapport rapidité d'exécution / précision. Les discrétisations en 16 ou 64 éléments ne sont pratiquement utilisables que dans le cas d'un ciel uniforme (ou pour une procédure de tests), celles supérieures à 4096 éléments apportent un surcroît de précision, au détriment des temps de calcul évidemment. Dans certaines applications cependant (cartographie de la portion de ciel visible notamment – voir la section 8.4.2), cette précision devient nécessaire pour une meilleure lisibilité.

Type de maillage	CIE	Le Strat	triangulation géodésique		
Nombre d'éléments	145	265	256	1024	4096
Angle solide (sr)	0,04333	0,02371	0,01940 à 0,04012	0,00483 à 0,01012	0,00120 à 0,00253

Fig. 124. Mesure de l'angle solide en fonction du type de discrétisation
(à titre de comparaison, l'angle solide sous lequel est vu le soleil est de 0,000068 sr).
Dans le cas d'une discrétisation en 1024 éléments, chaque maille est donc vue
depuis la terre sous un angle solide de 70 à 150 fois plus grand que ne l'est le soleil.

Le gradient de luminance étant important essentiellement dans la région du ciel où se situe le soleil – et beaucoup plus faible ailleurs –, on peut encore affiner la proposition précédente en proposant un maillage adaptatif, dont le propos est précisément de ne discrétiser plus finement que « si nécessaire », c'est-à-dire dans les zones où le gradient est important ; ainsi les mailles seront plus fines dans la région de la voûte céleste correspondant à la direction solaire, plus espacées ailleurs ; à noter que dans ce cas la précision de la division géométrique (donc la taille des mailles) n'est plus indépendante de la distribution qu'il portera ; la subdivision adaptative, qui consiste en un retour et une modification de la modélisation géométrique précédemment réalisée, n'a éventuellement lieu qu'après cette distribution des luminances réalisée ; il y a finalement imbrication et interdépendance des deux processus.

Mais si la proposition paraît séduisante, il s'avère finalement que le gain théorique de précision dépasse alors largement les erreurs dues aux imprécisions des modèles statistiques de luminance. À moins de modèles traduisant très précisément les conditions de ciel, au demeurant fort changeantes, le maillage adaptatif paraît à l'heure actuelle sans objet en ce qui concerne la discrétisation du ciel ; il ne ferait qu'alourdir les codes et les temps de calcul (surtout dans le cas de simulations dynamiques – sur une journée par exemple), pour un gain théorique en précision parfaitement illusoire, et d'autre part limiterait sans doute la souplesse de l'outil développé.

6.6 Distribution des luminances sur la voûte céleste

6.6.1 Généralités

Lorsque les rayons du soleil traversent l'atmosphère terrestre, la légère dispersion de la lumière associée au trouble atmosphérique génère un halo plus ou moins lumineux autour de la position du soleil ; les autres parties du ciel seront de luminosité très variable, pouvant être faible pour les ciels bleus intenses (pays méditerranéens par exemple) et les ciels de pluie, élevée au contraire pour les ciels brumeux et nuageux. Les jours de brume épaisse offrent des luminances voisines dans toutes les directions, en revanche les ciels couverts présentent des luminances zénithales plus importantes ; pour les ciels clairs, la couronne de ciel qui entoure le soleil affiche des luminances beaucoup plus importantes que tout autre endroit de la voûte céleste (zone « circum-solaire »)...

Depuis plusieurs décennies les chercheurs ont donc tenté de caractériser la dynamique spatiale de l'énergie en provenance de l'hémisphère céleste, en établissant des fonctions de distribution qui permettent d'affecter à chaque élément de ciel une valeur exprimant sa luminance ; la première d'entre elles a été la distribution établie et normalisée par la CIE pour un ciel couvert, vers les années 1930. On peut également citer, à titre documentaire cette fois, la distribution issue des travaux du *Treasuring Department* (États-Unis, 1935) sur un hémisphère divisé en 36 régions (fuseaux angulaires de 30° à la fois en azimut et en élévation – Fig. 125. gauche).

Ces fonctions de distributions statistiques sont établies à partir de la mesure des luminances de la voûte céleste, réalisée sur un site donné et en général sur une longue période (au minimum six mois, en principe une année entière, parfois deux ou trois ans). Leur finalité est d'être capable de définir les conditions d'insolation en n'importe quel lieu et si, dans les décennies passées, les mesures étaient effectuées par des stations totalement indépendantes les unes des autres, la tendance est à l'heure actuelle au regroupement des données issues de plusieurs stations éloignées géographiquement, et collectées selon un protocole de mesure identique de manière à rendre les modèles les plus « universels » possible. C'est dans ce but que la Commission Internationale de l'Éclairage a lancé depuis 1990 un programme international de mesure de la distribution des luminances sur la voûte céleste nommé *International Daylight Measurement Progamme* (IDMP) ; le choix des stations de mesure par la CIE (il y en a à l'heure actuelle 48 dans le monde) s'accompagne de recommandations précises quant à l'instrumentation et aux techniques de mesure (direction de la sonde, durée de la mesure, nombre de zones de mesure, intervalle entre deux évaluations successives, précautions quant à la lumière diffractée ou réfléchie par les zones voisines, etc.).

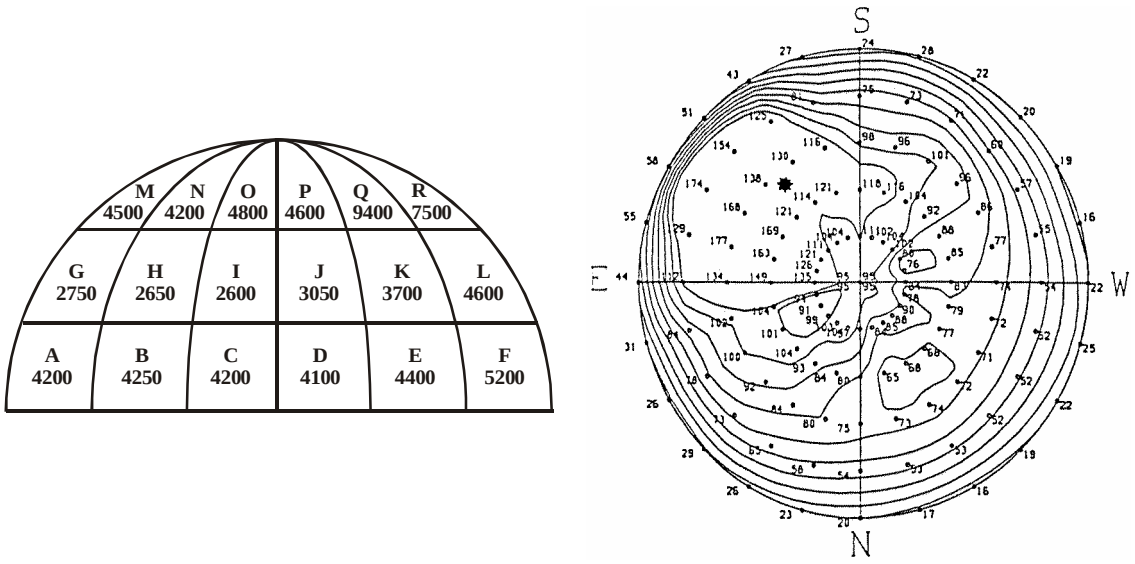


Fig. 125. À gauche, répartitions des « brillances » célestes au début de juin, à 11 h, en bougies par pied carré[94] – *footcandle* en anglais – (Washington, 1932) ; la voûte céleste a été divisée en 36 régions (écart angulaire de 30° à la fois pour les fuseaux sphériques et les parallèles) ; à droite, luminances ($W/m^2/sr^{-1}$) d'un ciel couvert mesurées par Valko à Zurich le 10 sept. 1982 – les isocontours sont représentés par intervalles de 100 au-dessus de 100 $W/m^2/sr^{-1}$, par intervalles de 10 au-dessous de cette valeur.

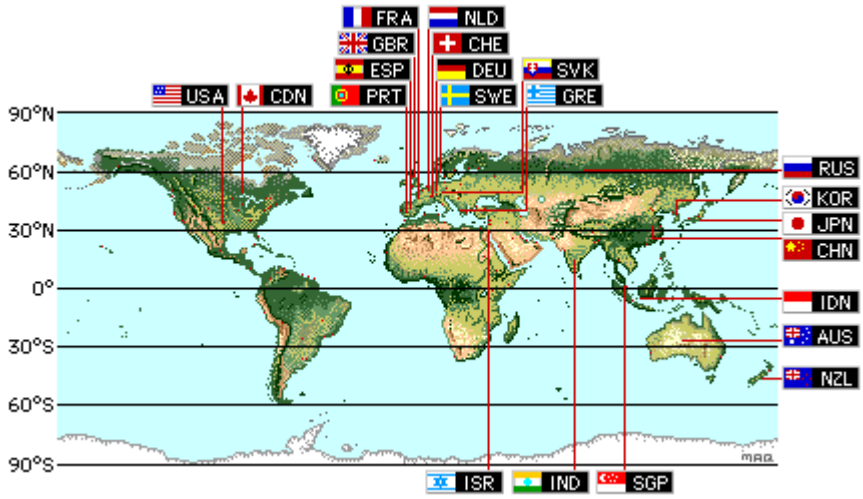


Fig. 126. Répartition des stations de mesure faisant partie de l'IDMP ; deux d'entre elles sont situées en France : l'une à Vaulx-en-Velin, l'autre à Nantes.

[94] Dans la terminologie actuelle, la *brillance* correspond à l'*éclairement lumineux*. L'équivalent du *footcandle* (fc) dans le système métrique est le *lumen par mètre carré* ou *lux* ; enfin 1 bougie par pied carré ou 1 footcandle correspond à 10,76 lux.

Les mesures sont généralement réalisées par photométrie, bien que tendent à se développer les méthodes photographiques ou d'enregistrements vidéo, associées à un dispositif de traitement d'image en aval ; mais pour que les mesures obtenues puissent être validées, les caractéristiques de ces dispositifs doivent correspondre aux recommandations de la CIE.

- Les techniques photométriques sont basées sur l'emploi d'un ou plusieurs photomètres dont l'ouverture angulaire est calibrée par un système optique ; c'est le mode de balayage qui conditionne le type et le nombre de divisions de la voûte céleste, donc la portion de ciel dont il faut mesurer la luminance, et par voie de conséquence l'angle d'ouverture du photomètre.

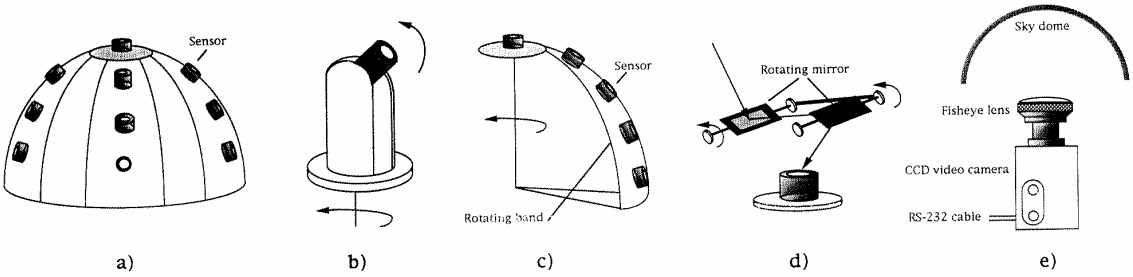


Fig. 127. Méthodes de mesure de la distribution des luminances sur la voûte céleste : (a) scanner à photomètres multiples ; (b) scanner 2 axes ; (c) scanner 1 axe ; (d) photomètre avec miroirs rotatifs ; (e) caméra vidéo[95].

- Les méthodes photographiques ou vidéo consistent à enregistrer une photographie de l'ensemble du ciel à l'aide d'un objectif très grand angle (*fish-eye*) ; l'image est ensuite digitalisée et enfin le traitement par un algorithme adéquat permet l'obtention des luminances de ciel. Mais la transformation d'un cliché du ciel en image plane pose deux problèmes majeurs : une « compression géométrique » sur les bords de l'image ainsi qu'une perte de résolution angulaire à mesure que l'on s'éloigne de l'axe optique de l'objectif ; le premier peut être résolu en remplaçant la projection orthographique (qui théoriquement ne modifie pas les luminances) par une projection sphérique équidistante (voir la section 5.3.2), à condition de procéder à une correction logicielle lors du traitement de l'image (Fig. 129.(b)) ; le second trouve également solution, moyennant quelques précautions que l'on ne détaillera pas, par correction logicielle.

[95] Voir l'article de Bellia L., Cesarano A., Minichiello F. et Sibilio S., *Videography for sky luminance distribution measurement*, Lighting Research & Technology, 29-1, pages 40-46, 1997.

Fig. 128. Photographies de la voûte céleste prises au grand angulaire : ciel serein, ciel intermédiaire, ciel couvert (d'après Roy, Hayman, Julian, Université de Sydney, 1998).

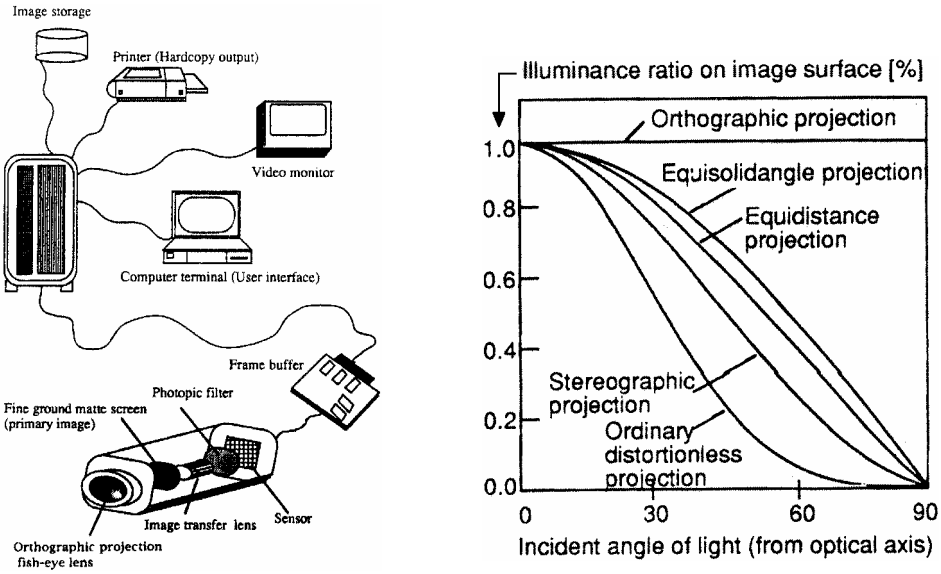


Fig. 129. A gauche les différents composants d'une chaîne d'acquisition vidéo ; A droite la courbe de réduction théorique de l'éclairement lumineux à la surface de l'image formée par différentes lentilles de projection.

Quelles que soient les modalités d'acquisition des données, les fonctions de distribution proposées par les différents auteurs sont presque toujours des fonctions « continues de l'espace » – au sens où elles permettent de déterminer une valeur de luminance en tout point de l'hémisphère céleste. Ces fonctions dépendent en général de plusieurs paramètres : les plus simples ne prennent en compte que l'altitude de l'élément de ciel, les plus élaborées considèrent également son azimut ainsi que sa position par rapport au soleil.

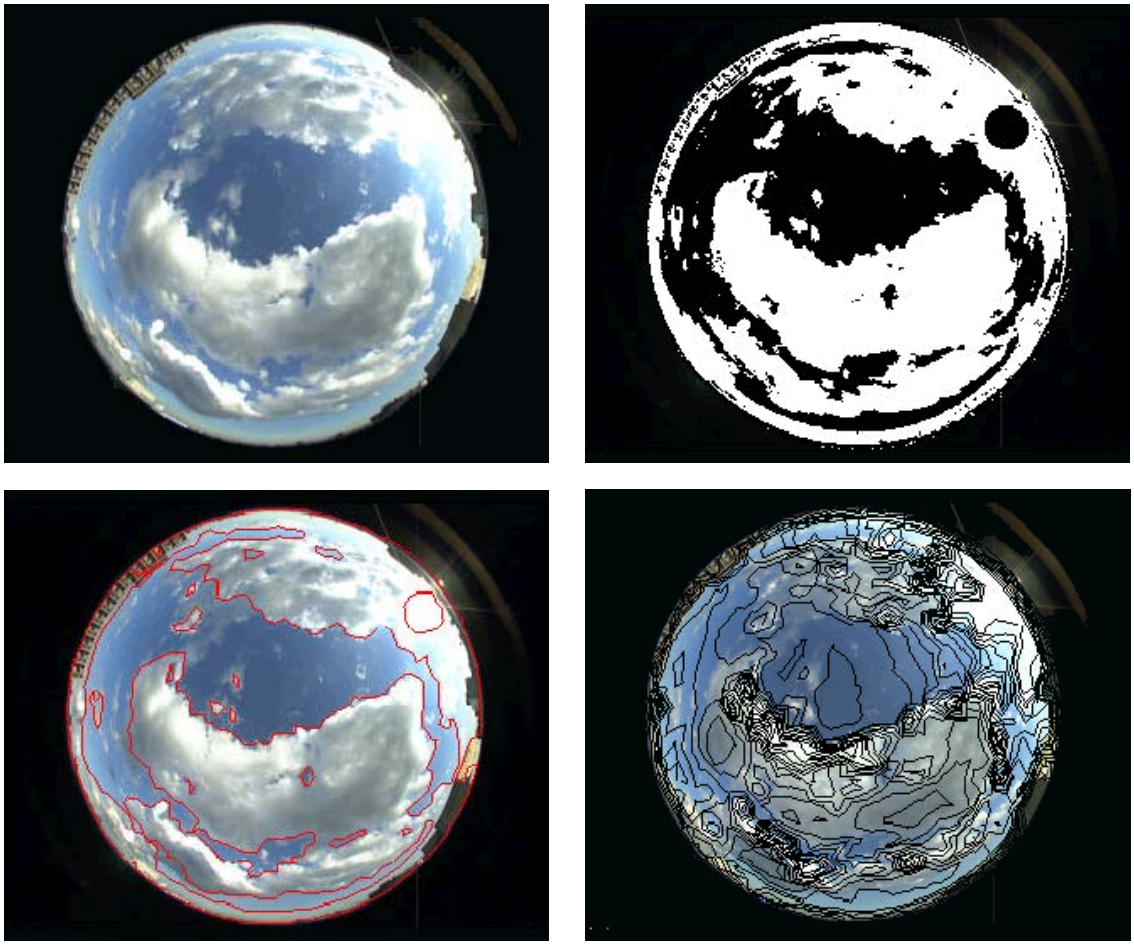


Fig. 130. De gauche à droite et de haut en bas : a) Image originale ; b) « segmentation » de l'image en ciel et nuages – à noter qu'une partie de ciel vient remplacer la zone solaire ; une opération complémentaire (non photographiée ici) consiste à lisser les contours des nuages et à éliminer le « bruit » ; c) contours des nuages représentés sur l'image originale ; d) calcul et tracé de l'ensemble des contours d'isoluminance sur l'hémisphère (représentation selon la *Standard Digital Form* ou SDF, d'après Roy, 1998).

En résumé les différents paramètres pouvant entrer en ligne de compte dans la fonction de distribution sont les suivants :

- le type de ciel (clair, couvert, couvert sombre, couvert clair, etc.).

- la position de l'élément de ciel considéré sur la voûte céleste, repéré par son angle zénithal ζ et son azimut α_{sky} (ou son altitude θ et son azimut α_{sky}), comme le montre la Fig. 131.

- la position du soleil, repéré par son altitude h et son azimut α_{sun}, eux-mêmes calculés à partir de la position géographique du lieu d'étude (latitude) et de l'heure à laquelle sera effectuée la simulation. Il s'agit évidemment de l'heure solaire vraie

(ou *TSV*), déterminée à partir de l'heure légale et après les corrections vues au paragraphe 6.3.2.1.

Finalement la fonction de distribution affecte à chaque élément de ciel une valeur de luminance énergétique ($W \cdot m^{-2} \cdot sr$) ou lumineuse ($cd \cdot m^{-2}$), valable sur toute l'étendue de l'élément et calculée en son centre de gravité par exemple (on pourrait utiliser un mode de calcul différent, comme une moyenne pondérée des valeurs déterminées aux sommets du triangle).

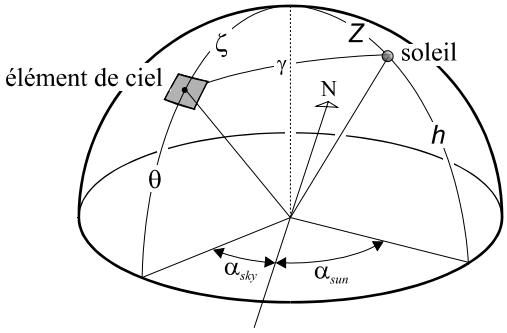


Fig. 131. Les différents angles de la géométrie céleste.

6.6.2 Modèles de ciels couverts sans aucune prise en compte de la position du soleil

A chaque type de ciel correspond une fonction de distribution, laquelle permet d'exprimer la luminance lumineuse L_P en un point P du ciel, en fonction de sa luminance zénithale L_z (en $cd \cdot m^{-2}$) ; L_z peut aussi s'exprimer de diverses manières, mais quel que soit l'auteur de la formulation, elle ne dépend que d'une seule variable, la hauteur solaire h. Cette « valeur de référence » qu'est la luminance zénithale dépend donc de la position du soleil ; mais ces modèles sont pourtant bien « sans aucune prise en compte de la position du soleil » car à partir du moment où la luminance au zénith a été déterminée, la distribution des luminances n'est effectivement fonction que d'un seul paramètre, qui est la hauteur de l'élément de ciel considéré ; il y a donc bien indépendance totale de la distribution vis à vis de la position du soleil, même si sa valeur maximale est liée à l'emplacement de celui-ci sur la voûte céleste. La fonction de distribution ne statue finalement que sur la forme de la courbe d'atténuation entre la luminance au zénith et celle à l'horizon.

Les modèles de ciel couvert sont au nombre de trois, deux d'entre eux ayant été normalisés par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Comme il vient d'être précisé, ils sont tous fonction de la luminance zénithale L_z, paramètre qu'il est donc nécessaire de définir en premier lieu.

6.6.2.1 La luminance zénithale L_z

Dans le cas d'un ciel couvert, l'éclairement global (soleil + ciel) ne comprend que la composante diffuse due au ciel. Il n'en reste pas moins que malgré la couverture nuageuse, l'influence du soleil est souvent loin d'être négligeable. D'ailleurs certains modèles rendent compte de cette augmentation de luminance en fonction de la hauteur et de l'azimut solaire (voir la section 6.6.3).

La luminance en un point quelconque *P* de la voûte céleste est fonction de la luminance zénithale L_z ; elle est donnée par diverses formulations empiriques issues de mesures expérimentales.

L'expression la plus classique (Matsuura) est du type :

$$L_z = A + B \cdot (\sin h)^c \quad (\mathrm{cd/m^2})$$

où h est la hauteur du soleil en degrés.

Plusieurs régressions liant à la hauteur *h* du soleil ont été déterminées en différents lieux par Karayel et *al*., et conduisent à l'expression devenue quasiment standard :

$$L_z = 123 + 8600 \cdot \sin h \quad (\mathrm{cd/m^2}) \quad \text{ou} \quad L_z = 0{,}123 + 8{,}6 \cdot \sin h \quad (\mathrm{kcd/m^2})$$

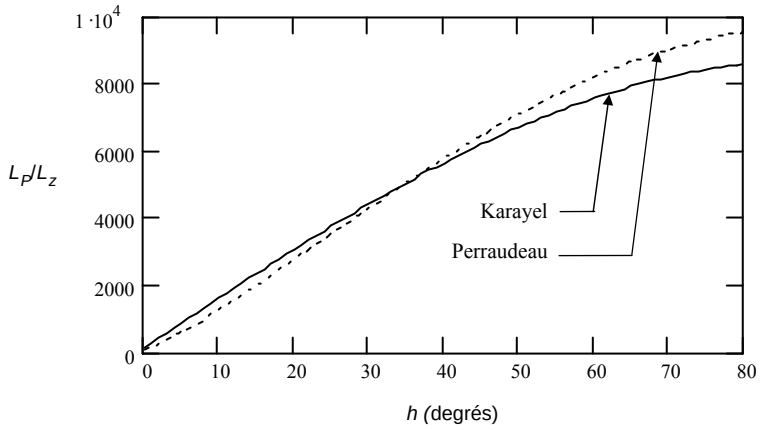


Fig. 132. Luminance zénithale, par ciel couvert, en fonction de l'altitude solaire (en cd/m^2).

Une autre formulation, proposée par Perraudeau [64] à partir de mesures effectuées à Nantes, donne :

$$L_z = 90 + 9630 \cdot (\sin h)^{1{,}19} \quad (\mathrm{cd/m^2})$$

Ces coefficients conduisent globalement à une luminance zénithale légèrement supérieure à celle obtenue avec les coefficients de Karayel (Fig. 132.).

6.6.2.2 Les modèles de ciel couvert

Sont présentés ci-dessous les trois modèles classiques de ciels couverts, tous fonction de la luminance zénithale décrite précédemment.

- Le ciel couvert uniforme

La luminance est identique en tout point de l'hémisphère, quel que soit son azimut ou son altitude ; elle est définie en fonction de la luminance zénithale L_z :

$$L_P = L_z$$

où L_z est la luminance au zénith.

L'éclairement lumineux sur un plan horizontal E_h dû aux radiations diffuses en provenance de la voûte céleste est obtenu en intégrant sur l'ensemble de l'hémisphère :

$$E_h = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{h=0}^{\pi/2} L_P(\alpha, h) \cdot \sin h \cdot \cos h \cdot d\alpha \cdot dh = 2\pi \int_{h=0}^{\pi/2} L_P \cdot \sin h \cdot \cos h \cdot dh$$

soit $E_h = \pi \cdot L_P = \pi \cdot L_z$ (lux)

En raison même de sa simplicité, ce modèle ne présente que peu d'intérêt dans la mesure où la distribution ainsi définie est trop éloignée des conditions réelles. Il n'en reste pas moins susceptible d'utilisation, mais à titre comparatif seulement, dans le but de mettre en évidence – et de quantifier – l'influence de la position solaire par exemple.

- Le ciel couvert CIE, ou ***ciel Moon et Spencer***

Le ciel couvert est défini par une couverture nuageuse épaisse et uniformément répartie sur toute la voûte céleste, qui diffuse entièrement le rayonnement direct (diffusion par les nuages essentiellement, astre solaire invisible).

Moon et Spencer ont dérivé expérimentalement une distribution angulaire de la luminance, qui a été adoptée par la CIE en 1955 (CIE *overcast sky*) ; elle traduit des conditions atmosphériques plutôt défavorables, qui correspondent relativement bien à un ciel très sombre et couvert de nuages denses. Sa luminance, indépendante de l'azimut, est uniquement fonction de l'altitude de l'élément de ciel ; cette distribution conduit à une luminance zénithale triple de celle de l'horizon.

Ce modèle s'appuie sur la formule générale de la distribution de la luminance pour un ciel couvert, selon une formulation due à Fritz :

$$L_P = L_z \frac{1 + k \sin\theta}{1 + k} \quad (\text{cd/m}^2) \quad \text{avec} \quad k = 2 \cdot (1 - \rho_S{}^3)$$

où ρ_S représente le facteur de réflexion du sol,

et θ est la hauteur angulaire de l'élément de ciel contenant le point *P*.

Dans la mesure où le facteur de réflexion du sol ρ_S est souvent très faible, le terme $\rho_S{}^3$ est en général négligé, ce qui donne alors $k \approx 2$.

Il s'agit dans cette hypothèse de la très classique formule de Moon et Spencer, dont la distribution est de la forme :

$$L_P = L_z \frac{1+2\sin\theta}{3} \quad (\text{cd/m}^2)$$

Ce modèle est basé sur le fait que, pour un ciel couvert de nuages denses, le soleil est totalement masqué de plusieurs couches de ces nuages ; il en résulte une distribution égale dans toutes les directions azimutales. Cependant des articles récents (américains notamment) remettent en cause cette uniformité azimutale, de même que l'exclusion complète de l'influence solaire.

Steven a effectué de nombreuses mesures à partir de la formule utilisée par Moon et Spencer qui tendent à montrer, à l'instar d'autres auteurs, que le coefficient *k* est nettement inférieur à la valeur 2 adoptée par Moon et Spencer, et qu'il se situerait plutôt dans l'intervalle [1 ; 1,5]. Le rapport entre la luminance au zénith et la luminance à l'horizon serait donc moins élevé (2,1 à 2,4 au lieu de 3 pour le ciel CIE). Ainsi que le suggère Kittler, le ciel couvert CIE concerne des conditions extrêmes, rares dans la pratique, et fournit des niveaux de luminance la plupart du temps nettement inférieurs aux valeurs que l'on peut mesurer sur site. Il est manifeste qu'il a été élaboré pour les conditions d'éclairement naturel les plus défavorables de manière à favoriser leur prise en compte par les concepteurs. Enfin un sol recouvert de neige influence la distribution de la luminance ; celle-ci est plus homogène, et l'on passe alors d'un rapport 3/1 entre le zénith et l'horizon à un ratio qui n'excède pas 2/1 dans la mesure où les inter-réflexions nuages/sol deviennent très importantes, d'autant plus que la couverture nuageuse est en général très basse dans ces conditions climatiques.

La simplicité de l'expression de Moon et Spencer rend encore possible la détermination analytique de l'éclairement lumineux sur un plan horizontal E_h ; celui-ci vaut alors :

$$E_h = \frac{7\pi}{9} \cdot L_z \quad (\text{lux})$$

- Le ciel couvert Perez et al.

La formulation est dans sa forme générale similaire aux précédentes, mais à base d'exponentielles cette fois :

$$L_P = L_z \frac{1 + a \cdot \exp(b / \cos\zeta)}{1 + a \cdot \exp(b)}$$

Kittler et Valko proposent pour les coefficients a et b les valeurs $a = 3{,}5$ et $b = -0{,}56$; l'expression précédente devient alors :

$$L_P = L_z \frac{1 + 3{,}5 \cdot \exp(-0{,}56 / \sin\theta)}{3} \quad (\mathrm{cd/m^2})$$

6.6.2.3 Comparaison des modèles

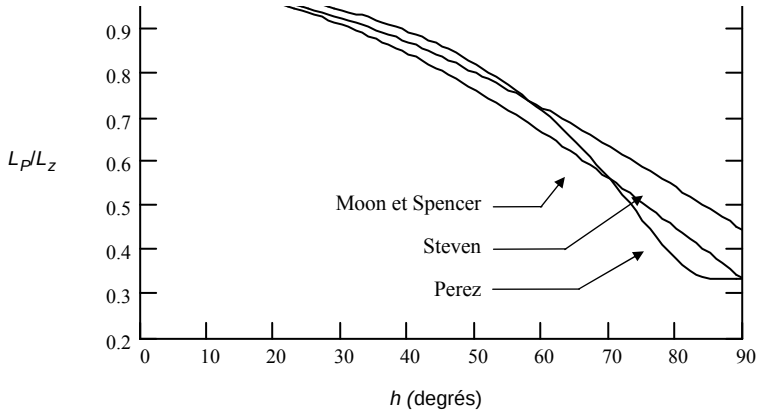


Fig. 133. Comparaison, par ciel couvert, du rapport L_P/L_z pour les modèles CIE Moon et Spencer, Steven, et Perez (avec les coefficients proposés par Kittler et Valko).

Il se dégage de ces trois courbes que le modèle Moon et Spencer donne bien les conditions les plus défavorables pour les éléments de ciel qui ont une altitude supérieure à 20°. En revanche l'expression de Perez – avec les coefficients de Kittler et Valko – donne les luminances les plus élevées au dessus de 30°, mais elles décroissent ensuite très rapidement pour égaler celles de Moon et Spencer sur l'horizon. Le modèle Perez tend donc à privilégier les luminances de la portion de voûte céleste d'altitude supérieure à une trentaine de degrés.

6.6.3 Modèles de ciels couverts (avec prise en compte de la position du soleil)

Les modèles qui précèdent (Moon & Spencer et Perez) partent de l'hypothèse que la luminance d'un ciel couvert est uniquement fonction de l'altitude θ de l'élément de ciel considéré – et d'aucun autre paramètre (et en particulier le soleil, qui est ignoré).

Au contraire les modèles qui suivent considèrent la position relative du soleil et de l'élément de ciel observé. Ils dépendent donc de l'altitude θ de l'élément de ciel considéré, mais aussi de l'angle zénithal du soleil Z et enfin de la distance angulaire γ entre le soleil et l'élément de ciel (Fig. 134.).

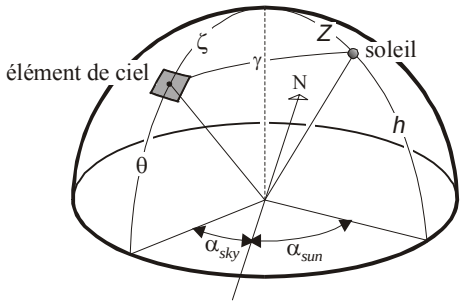


Fig. 134. Rappel des angles nécessaires aux modèles décrits dans cette section.

- Le ciel couvert Harrison et Coombes ; ciel Page

Le modèle Harrison et Coombes [24] donne directement la luminance en un point P du ciel, et non plus sous la forme de son rapport à la luminance zénithale. Elle s'exprime sous la forme :

$$L_P = A + B \cdot Z + C \cdot \cos\zeta + D \cdot \exp(-E \cdot \gamma) \quad (\mathrm{cd/m^2})$$

où les cinq constantes ont pour valeur : $A = 0{,}45$; $B = 0{,}12$; $C = 0{,}43$; $D = 0{,}72$ et $E = 1{,}88$.

Ce modèle montre une luminosité très significative pour des éléments de ciel proches du soleil ainsi qu'une anisotropie azimutale prononcée (c'est-à-dire une grande dépendance vis-à-vis de la différence d'azimut soleil / point considéré).

Page propose une amélioration de ce modèle : la formulation générale est identique, mais les coefficients sont différents ; certains d'entre eux ne sont plus des constantes, mais ils sont fonction de l'altitude solaire (sous forme d'intervalles).

Distance angulaire zénithale Z	$A + B{\cdot}Z$	C	D	E
< 50°	0,45+0,12·Z	0,43	0,72	1,88
= 50°	0,555	0,43	0,72	1,88
Interpolation linéaire entre 50 et 60°	–	–	–	–
> 60°	0,46	0,40	0,83	1,50

Fig. 135. Coefficients proposé par Page pour le modèle couvert Harrison et Coombes.

- Le ciel couvert Brunger et Hooper

L'utilisation de ce modèle nécessite la connaissance de l'éclairement énergétique horizontal diffus *D*. Or les stations de la Météorologie Nationale française mesurent le rayonnement global *G* sur un plan horizontal (quelques stations seulement mesurent le rayonnement diffus sur un plan horizontal) ; mais par ciel couvert, le rayonnement horizontal diffus *D* est égal au rayonnement horizontal global *G* puisque le rayonnement direct est nul. Encore faut-il avoir accès à ces informations (journalières)...

Brunger et Hooper [8] proposent la formulation suivante :

$$L_P = D \cdot [A_0 + A_1 \cdot (2\zeta / \pi)^2 + A_2 \cdot \exp(-c \cdot \gamma \cdot \exp(d \cdot Z))] \quad (\mathrm{cd/m^2})$$

où les constantes c et d ont pour valeur $c = 0{,}0145423$ et $d = 0{,}0231798$,

D représente l'éclairement énergétique horizontal diffus,

et A_0, A_1, A_2 sont des paramètres qui varient avec l'altitude solaire h (ou son complément Z) selon le tableau qui suit.

Distance angulaire zénithale Z (en degrés)	A_0	A_1	A_2
20 à 25°	–0,17186	0,56024	0,91803
25 à 30°	–0,14985	0,54548	0,99835
30 à 35°	–0,09676	0,50144	1,00449
35 à 40°	–0,06816	0,47481	1,10678
40 à 45°	–0,05377	0,48940	1,21526
45 à 50°	–0,01954	0,46846	1,30219
50 à 55°	–0,01699	0,44391	1,31890

Fig. 136. Coefficients du modèle Brunger et Hooper en fonction de la distance angulaire zénithale *Z*.

6.6.4 Modèles de ciels sereins

Les différents modèles de ciels sereins sont construits eux aussi à l'aide d'une fonction de distribution rapportée à la luminance zénithale L_z, dont la formulation varie là encore selon son auteur.

6.6.4.1 La luminance zénithale L_z

Comme dans le cas des ciels couverts, où la luminance zénithale pouvait prendre des formes très diverses selon les auteurs, les expressions proposées pour les ciels sereins demeurent assez variées, même si elles ne sont le plus souvent fonction que de deux paramètres : l'altitude solaire *h* et le trouble atmosphérique *T*.

- Krochmann donne une formule empirique permettant de calculer la luminance zénithale en fonction de l'altitude *h* du soleil (en degrés), valable plutôt dans le cas d'une atmosphère non polluée :

$$L_z = 100 + 63h + h \cdot (h - 30) \cdot \exp(0,0346 \cdot (h - 68)) \quad (\text{cd/m}^2)$$

- Dogniaux propose, pour une atmosphère quelconque :

$$L_z = (1,234T - 0,252)\tan h + 0,112T + 0,017 \quad \text{pour } h < 70° \quad (\text{kcd/m}^2)$$

où *T* caractérise la limpidité de l'atmosphère : 2,25 < T < 3,25 pour une atmosphère non polluée,
5 < T < 6,5 dans le cas d'une atmosphère polluée.

Différents logiciels utilisables gratuitement sous licence ou commerciaux proposent encore d'autres expressions pour la luminance zénithale :

- Superlite [103] :

$$L_z = (1,34T - 3,46)\tan h + 0,1T + 0,38 \quad (\text{kcd/m}^2)$$

- Radiance [82] :

$$L_z = (1,376T - 1,81)\tan h + 0,38 \quad (\text{kcd/m}^2)$$

où *T* est le coefficient de trouble atmosphérique ; la valeur par défaut utilisée dans Radiance est 2,75.

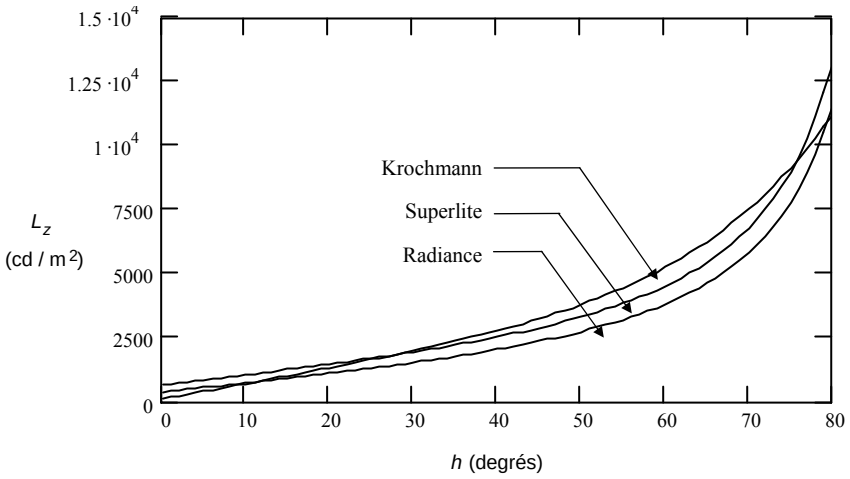


Fig. 137. Comparaison, par ciel serein, de la luminance zénithale L_z fournie par les formulations Krochmann, Superlite et Radiance.

6.6.4.2 Le ciel serein CIE

Normalisé par la CIE en 1973 (CIE *clear sky*), il correspond à un ciel parfaitement clair et sans nuages (on considère ici le ciel exclusivement, aussi l'astre solaire est-il exclus). Sa luminance est fonction de l'altitude de l'élément de ciel considéré, mais prend également en compte la position du soleil (altitude et azimut), avec une fonction exponentielle dans la zone circumsolaire conduisant à un pic de luminance dans cette région. Les différents angles utilisés par le modèle sont rappelés sur la Fig. 138., et notamment l'angle γ, qui correspond à la distance angulaire entre la position du soleil et l'élément de ciel. La formulation générale a été proposé par Krat en 1946, plus tard Kittler a déterminé les coefficients de l'indicatrice de diffusion *f*, et elle a finalement été adoptée par la CIE en 1973.

$$L_P = L_z \frac{f(\gamma)\cdot\Phi(\zeta)}{f(Z)\cdot\Phi(0)}$$

où $f(x) = 0{,}91 + 10\exp(-3x) + 0{,}45\cos^2 x$ (indicatrice de diffusion, établie par Kitler)

et $\Phi(x) = 1 - \exp(-0{,}32/\cos x)$.

Le terme $\cos^2\gamma$ représente la diffusion de Rayleigh, la quantité $\exp(-3\gamma)$ la luminance circumsolaire due à la présence d'aérosols, et la fonction $\Phi(\xi) = 1 - \exp(-d/\cos\xi)$ traduit l'augmentation de la luminance avec la masse d'air ; cette fonction a été proposé en 1929 par Pokrowsky, qui a déterminé expérimentalement le coefficient *d* et lui a attribué la valeur de 0,32.

La luminance zénithale est définie par une expression quasiment identique à celle utilisée par Superlite :

$$L_z = (1340b - 3460)\tan h + 100b + 900 \quad (\text{cd/m}^2)$$

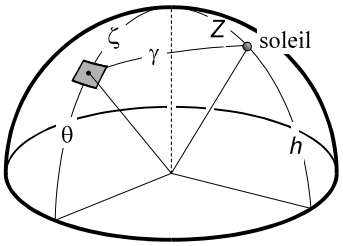
où $b = \dfrac{h+85}{39{,}5\exp(-\omega)+47{,}4} + 0{,}1 + (16 + 0{,}22\omega)\cdot T$,

ω est la hauteur d'eau précipitable (sa valeur est fixée à 1,21 cm),

T le trouble atmosphérique (choisi égal à 0,12).

Dans le cas d'atmosphères polluées (grandes villes ou zones industrielles), la luminance zénithale est gardée constante ; par contre les coefficients de l'indicatrice de diffusion f changent quelque peu et celle-ci s'écrit plutôt sous la forme :

$$f(x) = 0{,}856 + 16\exp(-3x) + 0{,}3\cos^2 x \quad \text{(Gusev)}$$



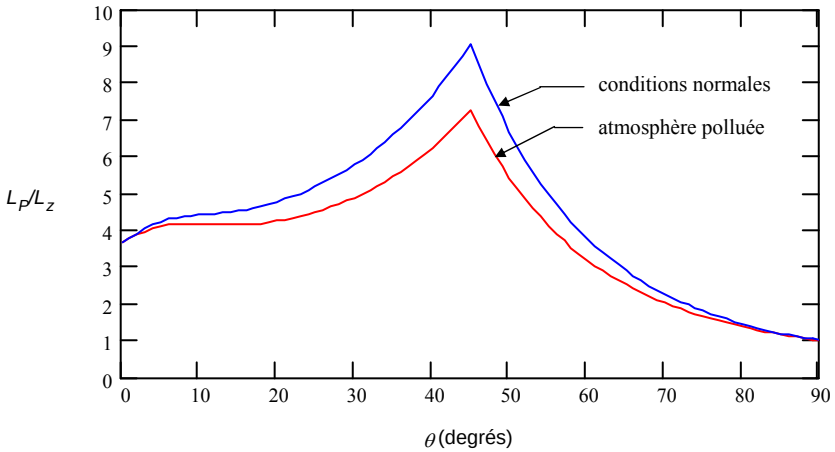


Fig. 138. Valeurs du rapport L_P/L_z dans le cas du ciel serein CIE, pour une hauteur solaire de 45° ; le tracé est réalisé dans le plan contenant le soleil (autrement dit la différence d'azimut entre le point P et le soleil est nulle), et l'angle θ correspond à l'altitude de l'élément de ciel.

6.6.5 Modèles de ciels « intermédiaires »

Jusqu'à une date récente, la détermination de la lumière naturelle ne reposait que sur les deux distributions de luminance normalisées par la CIE (le ciel serein et le ciel totalement couvert). Or sous nos latitudes (et plus précisément dans les régions au climat tempéré), les fréquences d'occurrence de ces conditions extrêmes restent limitées ; par contre les fréquences d'occurrence des ciels partiellement couverts sont beaucoup plus élevées, rendant indispensable l'élaboration de modèles pour ciels nuageux, dénommés plutôt ciels *intermédiaires* (ils désignent en effet des ciels dont la répartition des luminances se situe à mi-chemin entre les ciels entièrement couverts et les ciels sereins). Dans ce cas encore les formulations sont multiples, et ne sont évoquées ici que les principales (les plus courantes dans la littérature ou celles que l'on trouve dans certains logiciels).

- Le logiciel Radiance

La formulation employée par Radiance est extrêmement simple (voire simpliste !) puisqu'elle se borne à effectuer la moyenne des distributions extrêmes ciel couvert et ciel serein...

$$L_{P[\text{intermédiaire}]} = \frac{L_{P[\text{serein}]} + L_{P[\text{couvert}]}}{2}$$

- La formulation de Gillette et Treado [20]

Elle est similaire à la précédente mais effectue cette fois une moyenne pondérée, basée sur la notion de *Cloud Ratio* (*CR*), rapport entre le rayonnement horizontal diffus et le rayonnement horizontal global :

$$L_P = \eta \cdot L_{P[\text{serein}]} + (1-\eta) \cdot L_{P[\text{couvert}]} \quad \text{avec} \quad \eta = \frac{1+\cos(CR \cdot \pi)}{2}$$

- Le modèle Littlefair [39]

A partir de mesures effectuées sur une large gamme de ciels réels, P. J. Littlefair propose une distribution de la luminance pour un ciel « moyen » :

$$L_P = \frac{a \cdot \exp(-\gamma/40) \cdot d \cdot (5 - 2\sin\zeta)}{3} \quad (\text{kcd/m}^2)$$

où $a = 0{,}1 + 0{,}42h + 0{,}7\sin(7{,}2h)$, $d = 9 \cdot (-0{,}3 + 0{,}434h - 0{,}0042h^2)/11\pi$

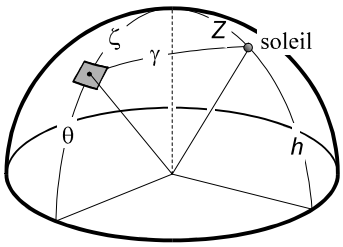
et h et γ en degrés.

Ce modèle présente l'intérêt de comporter trois composantes, que l'on retrouvera dans les modèles « tous temps » (section suivante) :

- une composante liée à l'éclairement solaire direct (les coefficients *a* et *d*, qui ne dépendent que de la hauteur solaire).
- une composante liée à la zone cicumsolaire (une loi exponentielle qui décroît très rapidement avec l'angle γ).
- le reste du ciel, modélisé par une fonction sinusoïdale de ζ.

- Le modèle Pierpoint

Sa formulation est identique à celle qui définit le ciel serein CIE, mais les fonctions *f* et Φ sont quelque peu différentes :



$$L_P = L_z \frac{f(\gamma)\cdot\Phi(\zeta)}{f(Z)\cdot\Phi(0)}$$

où $f(x) = 0,526 + 5\exp(-1,5x)$

et $\Phi(x) = 1 - \exp(-0,80/\cos x)$.

- Le modèle de ciel intermédiaire CIE

Sans y apporter le caractère « normatif » que possèdent les modèles de ciels couvert et serein, la commission internationale de l'éclairage a néanmoins défini un modèle de distribution pour les ciels intermédiaires. La luminance de ciel en un point quelconque de la voûte céleste repéré par les angles ξ et γ est donné par la formulation suivante :

$$L_P = \frac{A\exp^{B\gamma}}{L_z}$$

où $A = 0,43\left[\xi + 4,799 + 1,35\left(\sin\left(3,59\xi - 0,009\right) + 2,31\right)\cdot\sin\left(2,6\xi + 0,316\right)\right]$,

$B = -0,563\left[\left(\xi + 1,059\right)\cdot\left(\xi - 0,008\right) + 0,812\right]$,

et $L_z = 0,988\left[\sin\left(2,60\xi + 0,316\right) + 2,772\right]\cdot\exp\left[1,481\left(\xi + 0,301\right)\cdot\left(\xi - \frac{\pi}{2}\right)\right]$.

- Le modèle Tregenza [77]

Nous citerons enfin une proposition originale, très différente des précédentes, effectuée par P. Tregenza dans un article paru en 1992 dans *Lighting Research & Technology* (ses

recherches dans le domaine sont antérieures à 1980[96]) : un modèle mathématique permettant de simuler les nuages à partir de leurs caractéristiques géométriques, lumineuses, et de leur distribution statistique sur l'hémisphère céleste[97]. Si elles ne sont guère faciles à modéliser, certaines de leurs caractéristiques sont faciles à dégager (à observer) : plus ils sont épais et plus leur apparence est sombre vue du sol ; par ailleurs la lumière est plutôt réfléchie par les flancs des nuages, ce qui est très net dans le cas de cumulus ou de cumulo-nimbus. D'autre part la classification de cette proposition parmi les modèles intermédiaires est justifiée par le fait que ce modèle, s'il peut convenir pour un ciel totalement couvert (puisque l'opacité des nuages peut être différente selon la région de ciel considérée), perd tout son sens par ciel clair (!).

Le processus consiste tout d'abord à simuler de manière classique une distribution correspondant au ciel serein, puis par étapes successives, de déterminer la luminance pour chacune des couches nuageuses, les nuages étant distribués aléatoirement sur chacune d'entre elles. La technique étant essentiellement numérique, certaines – très nombreuses – simplifications sont nécessaires devant la complexité des problèmes abordés (ils concernent à nouveau, comme pour les ciels, des aspects relatifs à leur modélisation géométrique ainsi qu'à leur comportement vis-à-vis de l'énergie en provenance du soleil et de la voûte céleste) ; les simplifications proposées par Tregenza sont grossièrement les suivantes :

- les nuages appartiennent à des strates (couches) horizontales successives.

- la base de tous les nuages est plane et horizontale, et les bases de tous les nuages d'une même couche appartiennent au même plan horizontal.

- en plan, la distribution des nuages est aléatoire ; quel que soit l'angle de vue, la probabilité pour qu'un rayon visuel soit intercepté par la base d'un nuage est la même dans toutes les directions.

- la distribution de l'épaisseur du nuage est, dans une même strate, la même pour tout le ciel.

- dans n'importe quelle section verticale, la limite du nuage est un quart de cercle dont le rayon correspond à sa hauteur maximum.

---

[96] Voir un précédent article de Tregenza dans Lighting Research & Technology, vol. 12, n°3, pp. 121-128, 1980, où l'essentiel de la méthode y est présenté.

[97] Dans le même ordre d'idée on peut citer les travaux de Beyer et *al*. qui, comme Tregenza, modélisent la structure des nuages (cumulus essentiellement) et prennent donc en compte les variations temporelles rapides de la luminance.

- Aucune énergie lumineuse n'est absorbée par le nuage[98].

- Une proportion de l'énergie qui atteint un nuage est réfléchie de manière idéalement diffuse ; une certaine quantité de lumière peut traverser le nuage sans déviation ; le reste est diffusé de manière identique dans toutes les directions.

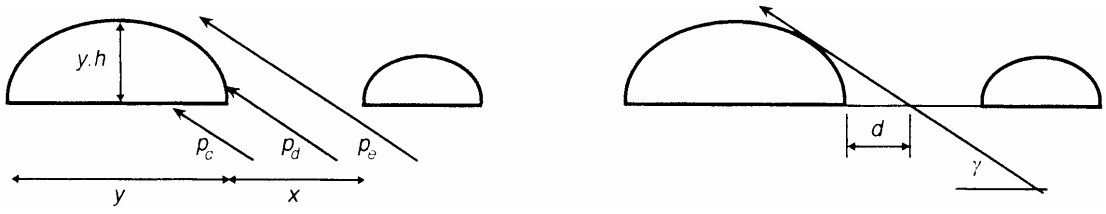


Fig. 139. Modèle géométrique de nuage (selon Tregenza).

Le modèle numérique est basé sur deux séries de fonctions :

- Une fonction qui fixe la probabilité pour qu'un rayon visuel soit interceptée par une zone particulière du nuage (base ou côté).

- Une fonction qui définit la luminance observée, qui dépend de la réflexion combinée du sol et de la surface inférieure du nuage (donc de leur albédo[99]).

La combinaison de ces deux fonctions permet finalement d'aboutir à une distribution statistique de la luminance pour n'importe quelle partie du ciel.

Proposer une distribution nuageuse aléatoire est sans conteste une idée séduisante, mais les (trop) nombreuses simplifications qui viennent d'être listées font qu'elle ne présente en définitive guère plus de réalisme que les modèles statistiques aux distributions beaucoup plus « régulières » (tous les autres modèles possèdent au moins un plan de symétrie méridien contenant le soleil).

---

[98] Si cette simplification est acceptable pour des hauteurs solaires importantes, l'erreur augmente nettement au lever et coucher du soleil ; on pourrait imaginer un coefficient d'absorption fonction de l'altitude solaire...

[99] L'albédo est la fraction de l'énergie incidente diffusée par un corps lumineux ; ainsi pour le corps noir parfait, l'albédo est nul, tandis qu'il vaut 0,90 pour la neige fraîche, 0,05 pour la mer en été, le double en hiver.

Cette proposition reste, à notre sens, d'un attrait modeste si on limite son utilisation au domaine pour lequel elle semble avoir été développée, c'est-à-dire un modèle de luminance s'appliquant à un ciel couvert ; aussi n'a-t-elle pas été citée ici simplement pour mémoire, mais bien parce qu'elle nous paraît présenter un réel intérêt, non pas dans le domaine du diffus, mais plutôt dans le cadre de l'éclairement direct (ensoleillement), en tant que *masques dynamiques* de l'astre solaire.

- *Quelques remarques à propos de la dynamique des nuages*

Dans le paysage urbain, la présence de nuages devient particulièrement sensible lorsque dans leur déplacement, ils viennent alterner ombre et lumière sur le sol, les façades, ou à l'intérieur d'une pièce, créant ainsi des contrastes plus ou moins rapides en fonction de leur opacité, de leur vitesse de déplacement et de leur altitude. Dans l'hypothèse de nuages épars de faible altitude mais denses et au déplacement rapide (type cumulus), l'éclairement lumineux peut varier dans des proportions considérables en quelques fractions de seconde, parfois trop rapidement d'ailleurs pour que l'œil s'en accommode sans une gêne momentanée, d'autant plus si le phénomène se reproduit fréquemment ; ces situations sont très courantes sur le littoral, les effets étant encore augmentés dans le cas de pluie, l'eau réfléchissant une partie des rayons solaires de manière spéculaire.

Fig. 140. Cumulus, type de nuage le plus susceptible de conduire à des alternances ombre/lumière importantes et rapides.

> *"Le jeu subtil du clair-obscur dans ces énormes halls de verre, à mesure que passent les nuages ou le temps, met en scène l'espace. Les pièces changent constamment de forme, exactement comme une scène est transformée par l'éclairage, mais ici il n'y a pas l'ombre d'un artifice : la lumière du soleil fait à elle seule tout le travail."* [100]

[100] R. Sennett, Architecture de verre.

Ces contrastes importants et soudains affectent avant tout la perception visuelle – mais les sensations sur le plan thermique sont généralement loin d'être négligeables – ; ils sont générateurs d'une alternance de *découpes* et d'*estompages*, pour reprendre la classification proposée par Chelkoff[101], ou créateurs d'*espaces-lumière* momentanés si l'on se réfère à celle de P. von Meiss [46].

À partir du moment où l'on dispose d'une cartographie de la couverture nuageuse à tout instant, il devient possible de simuler les zones d'ombre et de lumière dans l'environnement, et surtout d'envisager leur évolution au cours du temps ; en effet sur le plan du traitement numérique, un nuage opaque se comporte, à un instant donné, de la même manière qu'un masque urbain traditionnel, son déplacement étant modélisé par discrétisation du temps. Il devient également envisageable de comptabiliser la fréquence d'occurrence des alternances ensoleillé/à l'ombre afin de dégager, par exemple, un seuil d'inconfort.

Les développements précédents débordent quelque peu le cadre de notre travail mais constituent pourtant une voie de recherche intéressante ; si certaines études ont effectivement traité des effets de la lumière directe sur les formes urbaines et de la lecture nouvelle que l'observateur est amené à en faire (la perception immédiate des « formes lumineuses » prenant alors le pas sur celle de la morphologie du bâti), aucune ne porte sur ces « instantanés », au cours desquels la perception de l'espace urbain se trouve soudainement – et de manière répétitive le plus souvent – modifiée non seulement en termes de niveau d'éclairement global, mais aussi dans la hiérarchie des éléments urbains appréhendés (Fig. 141.).

Fig. 141. Quels sont les éléments perçus en première lecture : les formes du bâti ou celles de la lumière ? Ou plus exactement les formes lumineuses ne deviennent-elles pas un élément constitutif du bâti (de sa perception) ? (à gauche une rue dans le sud de l'Italie ; à droite caserne de pompiers, Zaha Hadid, Suisse, 1992).

[101] Grégoire Chelkoff, *Esquisse d'un répertoire des effets visuels et lumineux dans l'environnement urbain*, Centre de recherches sur l'espace sonore et l'environnement urbain, école d'architecture de Grenoble, rapport collectif (Grégoire Chelkoff, Jean-Paul Thibaud et Jean-Luc Bardyn), 231 p., 1992.

6.6.6 Modèles « tous temps »

Tous les modèles qui ont été présentés jusqu'à maintenant s'appliquent au type de ciel pour lequel ils ont été définis ; les différents coefficients des fonctions statistiques sont fixés de manière définitive, et ne peuvent donc modéliser qu'un seul type de ciel.

Des publications récentes (postérieures à 1990) proposent des modèles plus élaborés qui permettent de disposer d'une gamme complète de ciels à partir d'une seule fonction de distribution, par le jeu de différents coefficients. Ils résultent en général de campagnes de mesures menées durant plus d'une année sur un site donné ; ils sont finalement, pour la plupart d'entre eux, une généralisation plus ou moins élaborée du modèle serein CIE.

- Le modèle Perraudeau

Il a été établi à partir d'une campagne de mesures réalisée au CSTB à Nantes, et classe les ciels en 5 types (2 modèles similaires aux ciels couvert CIE et serein CIE, plus 3 ciels intermédiaires). Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'un modèle « tous temps », mais il affine cependant la trilogie succincte couvert / intermédiaire / serein dans le domaine des ciels intermédiaires.

Sa formulation est assez voisine de celle du ciel serein CIE, et donne la luminance en un point *P* de la voûte céleste :

$$L_P = D_e \cdot f(\gamma) \cdot g(\zeta) \cdot h(Z)$$

où $f(\gamma) = a_1 + b_1 \exp(-k \cdot \gamma) + c_1 \cos^2 \gamma$ (caractérise l'éloignement par rapport au soleil) ,

$g(\zeta) = a_2 - b_2 (\cos \zeta)^{0,6}$ (rend compte de la distance zénithale du point *P*),

$h(Z) = a_3 + b_3 \cos Z + c_3 \sin Z$ (lié à la distance zénithale du soleil),

et D_e l'éclairement énergétique diffus sur un plan horizontal (en W·m^{-2}).

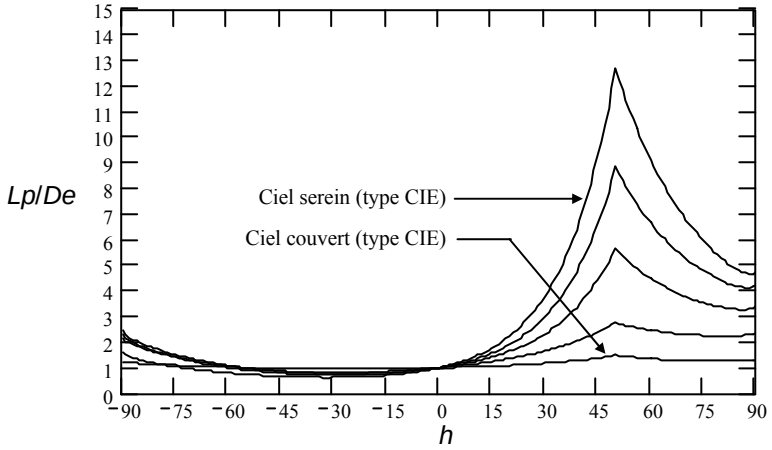


Fig. 142. Les cinq types du modèle Perraudeau (courbes tracées dans le plan du soleil, pour une même hauteur solaire de 40°).

Perraudeau fournit les valeurs des huit coefficients a_i et b_i qui paramètrent chacun des cinq ciels. On peut également remarquer que les fonctions *f* et *g* proposées par Perraudeau sont de la même forme que les fonctions *f* et Φ du ciel serein CIE. Comme pour le modèle de ciel couvert Brunger et Hooper, il est nécessaire de connaître l'éclairement énergétique diffus sur un plan horizontal.

- Le modèle Perez et al.

Ce modèle permet de simuler n'importe quel type de ciel à partir des deux coefficients ε et Δ, le premier traduisant le degré de pureté du ciel, le second sa luminosité (ou encore l'opacité ou bien l'épaisseur des nuages – voir le modèle Perez de la section 6.6.2.2).

La luminance relative l_v , définie comme le quotient de la luminance de l'élément de ciel considéré L_v et d'un élément de référence arbitraire, s'écrit :

$$l_v(\zeta,\gamma) = f(\zeta)\cdot\Phi(\gamma)$$

où $f(x) = 1 + a\exp(b/\cos x)$

et $\Phi(x) = 1 + c\exp(d\cdot x) + e\cos^2 x$.

Les cinq coefficients *a*, *b*, *c*, *d* et *e* sont eux-mêmes totalement dépendants de ε , Δ et *Z* (angle zénithal du soleil) selon des fonctions fournies par Perez. On remarquera que ce modèle est une généralisation de la formulation de la luminance par ciel clair de Krat, dans laquelle les coefficients constants sont remplacés par des fonctions de ε , Δ et *Z* ; il contient donc les modèles des ciels serein et couvert de la CIE.

Les coefficients *a*, *b*, *c*, *d* et *e* sont définis par :

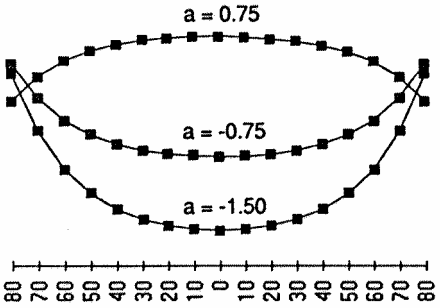
$$x = x_1(\varepsilon) + x_2(\varepsilon)\cdot Z + \Delta\cdot\left[x_3(\varepsilon) + x_4(\varepsilon)\cdot Z\right] \quad \text{avec} \quad x = a,b,c,d \text{ ou } e\,.$$

Néanmoins deux exceptions pour *c* et *d* lorsque ε se situe dans le premier intervalle (voir le tableau ci-dessous) :

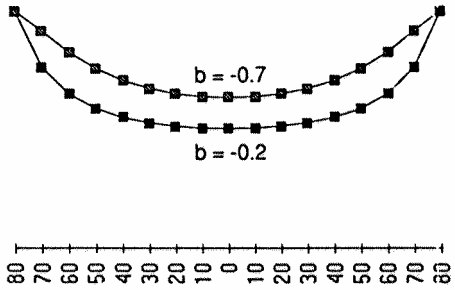
$$c = \exp\left[\left(\Delta\cdot(c_1(\varepsilon) + c_2\cdot Z)\right)^{c_3}\right] - c_4 \qquad \text{(* voir tableau 144.)}$$

$$d = -\exp\left[\Delta\cdot(d_1(\varepsilon) + d_2\cdot Z)\right] + d_3 + \Delta\cdot d_4\,. \qquad \text{(\# voir tableau 144.)}$$

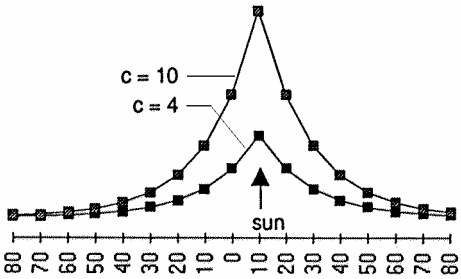
Ces cinq coefficients ont chacun une influence directe sur un aspect particulier du ciel (comme par exemple le coefficient *b* de la fonction *f*, qui module la luminance près de l'horizon, ou encore le coefficient *c* de la fonction Φ qui, comme on l'a vu pour le ciel serein CIE, module la luminance de la région circumsolaire) ; ces différents coefficients sont décrits rapidement dans la légende de chacun des graphiques qui suivent.



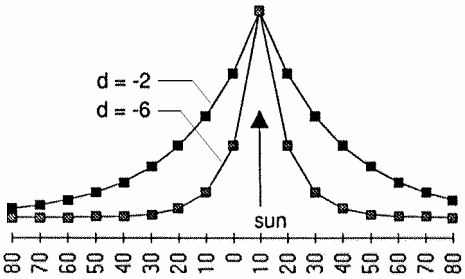
Coefficient *a* : concerne le signe et la forme du gradient horizon/zénith ; selon le signe de ce coefficient, l'horizon sera plus sombre ($a > 0$), ou bien plus clair ($a < 0$) que le zénith, correspondant ainsi respectivement aux conditions de ciel couvert et de ciel clair.



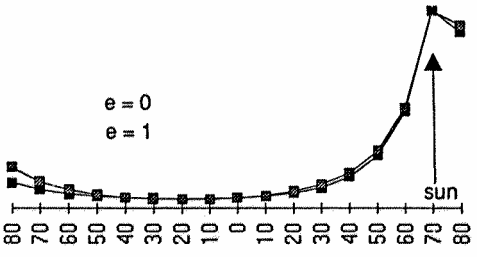
Coefficient *b* : il ajuste le gradient de luminance près de l'horizon ; $b = 0{,}32$ pour le ciel clair normalisé CIE. Le gradient est d'autant plus important que l'on s'approche du ciel clair.



Coefficient *c* : ce coefficient est proportionnel à l'intensité relative de l'auréole solaire ; $c = 10$ pour le ciel clair normalisé CIE.



Coefficient *d* : il module le diamètre de la zone circumsolaire ; $d = -3$ pour le ciel clair normalisé CIE. L'auréole solaire est d'un diamètre beaucoup plus faible pour un ciel clair que pour un ciel voilé.



Coefficient *e* : ce coefficient concerne la diffusion de Rayleigh ; $c = 0{,}45$ pour le ciel clair normalisé CIE.

	Indice de pureté ε	Type de ciel
1	1.000 → 1.065	couvert, horizon sombre
2	1.065 → 1.230	
3	1.230 → 1.500	intermédiaire
4	1.500 → 1.950	
5	1.950 → 2.800	
6	2.800 → 4.500	trouble
7	4.500 → 6.200	
8	6.200 → 12.000	très clair

Les 8 intervalles du modèle Perez et *al.*, définis en fonction du degré de pureté du ciel (paramètre ε).

Fig. 143. Influence des différents coefficients x_i du modèle.

Intervalle de ε		$a1$	$a2$	$a3$	$a4$	$b1$	$b2$	$b3$	$b4$
1.000	1.065	1.3525	-0.2576	-0.2690	-1.4366	-0.7670	0.0007	1.2734	-0.1233
1.065	1.230	-1.2219	-0.7730	1.4148	1.1016	-0.2054	0.0367	-3.9128	0.9156
1.230	1.500	-1.1000	-0.2515	0.8952	0.0156	0.2782	-0.181.2	-4.5000	1.1766
1.500	1.950	-0.5484	-0.6654	-0.2672	0.7117	0.7234	-0.6219	-5.6812	2.6297
1.950	2.800	-0.6000	-0.3566	-2.5000	2.3250	0.2937	0.0496	-5.6812	1.9415
2.800	4.500	-1.0156	-0.3670	1.0078	1.4051	0.2875	-0.5328	-3.8500	3.3750
4.500	6.200	-1.0000	0.0211	0.5025	-0.5119	-0.3000	0.1922	0.7023	-1.6317
6.200	–	-1.0500	0.0289	0.4260	0.3590	-0.3250	0.1156	0.7781	0.0025
		$c1$	$c2$	$c3$	$c4$	$d1$	$d2$	$d3$	$d4$
1.000	1.065	2.8000	0.6004	1.2375	1.000 *	1.8734	0.6297	0.9738	0.2809 #
1.065	1.230	6.9750	0.1774	6.4477	-0.1239	-1.5798	-0.5081	-1.7812	0.1080
1.230	1.500	24.7219	-13.0812	-37.7000	34.8438	-5.0000	1.5218	3.9229	-2.6204
1.500	1.950	33.3389	-18.3000	-62.2500	52.0781	-3.5000	0.0016	1.1477	0.1062
1.950	2. 800	21.0000	-4.7656	-21.5906	7.2492	-3.5000	-0.1554	1.4062	0.3988
2.800	4.500	14.0000	-0.9999	-7.1406	7.5469	-3.4000	-0.1078	-1.0750	1.5702
4.500	6.200	19.0000	-5.0000	1.2438	-1.9094	-4.0000	0.0250	0.384	0.2656
6.200	–	31.0625	-14.5000	-46.1148	55.3750	-7.2312	0.4050	13.3500	0.6234
		$e1$	e2	$e3$	$e4$				
1.000	1.065	0.0356	-0.1246	-0.5718	0.9938				
1.065	1.230	0.2624	0.0672	-0.2190	-0.4285				
1.230	1.500	-0.0156	0.1597	0.4199	-0.5562				
1.500	1.950	0.4659	-0.3296	-0.0876	-0.0329				
1.950	2.800	0.0032	0.0766	-0.0656	-0.1294				
2.800	4.500	-0.0672	0.4016	0.3017	-0.4844				
4.500	6.200	1.0468	-0.3788	-2.4517	1.4656				
6.200	–	1.5000	-0.6426	1.8564	0.5636				

Pour $x = a, b, c, d$ et e :

$$x = x_1(\varepsilon) + x_2(\varepsilon)\cdot Z + \Delta\cdot\left[x_3(\varepsilon) + x_4(\varepsilon)\cdot Z\right]$$

sauf pour le premier intervalle où :

* $c = \exp\left[\left(\Delta\cdot(c_1(\varepsilon) + c_2\cdot Z)\right)^{c_3}\right] - c_4$

\# $d = -\exp\left[\Delta\cdot(d_1(\varepsilon) + d_2\cdot Z)\right] + d_3 + \Delta\cdot d_4$

Fig. 144. Tableau rassemblant la totalité des coefficients x_i du modèle Perez et *al.* en fonction de l'indice de pureté ε.

La luminance relative l_v une fois déterminée, la luminance L_v du ciel est calculée en normant la modélisation de ciel obtenue à l'éclairement diffus D_v par intégration sur la totalité de l'hémisphère :

$$L_v = \frac{l_v \cdot D_v}{\int\limits_{2\pi\cdot\mathrm{sr}} l_v(\zeta,\gamma)\cdot\cos\zeta\cdot\mathrm{d}\omega}$$

où ω est l'angle solide sous lequel est vu l'élément de ciel considéré.

En pratique l'intégrale est remplacée par une somme discrète calculée sur l'ensemble des éléments de ciel (essentiellement en raison des obstructions).

Parmi la multitude de combinaisons possibles en ce qui concerne le choix des coefficients ε et Δ, le tableau de la figure ci-dessous (Fig. 145.) liste les valeurs à leur attribuer pour certains types de ciel particuliers. À noter que ε peut varier de 1 à 12 (1 cor-

respondant à un ciel totalement couvert, des valeurs supérieures à 6 à un ciel dégagé) ; Δ se situe quant à lui dans l'intervalle 0,01 à 0,6 (0,05 indiquant un ciel sombre et 0,5 un ciel très brillant).

ε	Δ	Type de ciel	Remarques
1,0	0,08	couvert très sombre	type CIE[102]
1,0	0,35	couvert clair	
3,2	0,24	ciel partiellement couvert	
6,3	0,12	ciel clair	type CIE

Fig. 145. Quelques valeurs typiques des coefficients du modèle en fonction du type de ciel (selon Perez).

6.6.7 Autres modèles

On ne vient d'évoquer dans les paragraphes qui précèdent que les principaux modèles ; il en existe encore beaucoup d'autres, parmi lesquels on peut citer ceux de Littlefair [40][42], Brunger & Hooper [7][8], Harrison & Coombes [24], etc. ; mais leur grande majorité obéit à des principes et des équations similaires : ils comportent une fonction sinusoïdale pour ajuster le gradient de luminance près de l'horizon et une fonction exponentielle qui permet de traduire la décroissance rapide de la luminance à partir de la position du soleil (dans la zone circumsolaire).

6.6.8 Conclusion

À partir du moment où ont été définis quelques ciels types à titre de référence (et notamment les ciels équivalents aux modèles CIE classiques), le modèle Perez et *al.* paraît l'un des mieux adaptés à notre propos dans la mesure où il permet la définition de toutes les conditions de ciel intermédiaires, qui ne sont finalement que rarement prises en compte dans les simulations ; celles-ci privilégient la plupart du temps des conditions extrêmes ; c'est particulièrement vrai pour le ciel couvert CIE dont la distribution énergétique correspond à des situations extrêmement défavorables, rarement atteintes sous nos latitudes ; cette remarque est valable également pour des simulations non numériques d'ailleurs, puisque les méthodes graphiques concernent ou bien l'ensoleillement

[102] À noter que le ciel couvert très sombre obtenu avec les coefficients de Perez *s'approche* du modèle CIE, mais ne conduit ni à la répartition caractéristique 3/1 du zénith à l'horizon, ni à l'anisotropie azimutale.

seul (tracé des ombres), ou bien le ciel couvert CIE (diagrammes de Waldram, du CSTB, etc.) – voir à ce propos la section *Méthodes de simulation*.

Le principal avantage des modèles tous temps réside dans la multiplicité et surtout la continuité des conditions de ciel qu'ils permettent de modéliser (pour la plupart plusieurs dizaines, sauf le modèle Perraudeau, plus ancien, limité à cinq). Ils assurent ainsi une quasi continuité entre les différents ciels disponibles, facteur sans doute peu intéressant dans le domaine de l'imagerie (car statique), par contre non négligeable s'il s'agit de calculs énergétiques. Le bilan énergétique d'une façade au cours d'une journée doit prendre en compte l'aspect dynamique du ciel, c'est-à-dire l'évolution des conditions atmosphériques au cours du temps, d'où l'intérêt d'un modèle permettant de simuler cette évolution de manière quasi continue.

Enfin plusieurs campagnes de mesures postérieures à la définition du modèle de Perez, réalisées en des lieux très variés géographiquement, ont montré qu'il s'adaptait fort bien à la grande variabilité des conditions climatiques européennes, même si certaines disparités pouvaient apparaître sur le plan mondial (notamment certaines mesures effectuées au Japon par T. Muneer, qui présentent des différences importantes par rapport au modèle statistique ; cependant R. Perez s'interroge sur la validité de ces mesures[103], réalisées d'après lui selon une procédure peu claire – il évoque même des problèmes de calibration des appareils de mesure...).

Mais au-delà de la simple querelle, la clarification apportée par Perez est d'importance : les modèles statistiques sont censés décrire et paramétrer des *conditions de ciel* qui, si le modèle est convenablement construit, n'ont aucune raison de dépendre d'un site en particulier ; seule la fréquence d'occurrence de telle ou telle distribution sera fonction du lieu. Autrement dit un ciel clair et un ciel couvert sombre paramètrent tous deux convenablement les conditions de ciel correspondant au sud espagnol par exemple, mais avec une probabilité d'occurrence très nettement en faveur de la première distribution ; la seconde n'est pas fausse pour autant...

6.7 Modes de représentation et de visualisation

On remarque aisément que la définition de chacun des deux coefficients du modèle de Perez ne suffit pas à imaginer leur impact sur la distribution des luminances sur la voûte céleste. De même pour le tableau précédent (Fig. 145.) qui, bien qu'il précise leur correspondance avec quelques ciels types, ne permet pas lui non plus d'évoquer les particularités éventuelles de ces ciels (par exemple la concavité de la distribution au voisinage

[103] Voir l'article de T. Muneer, *Perez slope irradiance and illuminance models : Evaluation against Japanese data*, Lighting Research and Technology, 29(2), PP. 83-87, 1997.

de l'horizon ainsi que la prépondérance de la zone circumsolaire dans le cas des ciels clairs, la convexité de la distribution s'il s'agit de ciels couverts, etc.).

Il nous paraît donc indispensable de proposer un mode de visualisation de la répartition des luminances, permettant à la fois de mesurer visuellement l'effet des coefficients du modèle, mais aussi et surtout de mettre en vis-à-vis le résultat des simulations du dispositif étudié (une scène urbaine par exemple) avec les conditions d'éclairement qui sont précisément à l'origine des phénomènes observés. En effet une simulation relative à la lumière naturelle est toujours effectuée pour des conditions d'insolation bien définies – et donc « observables » – par l'utilisateur ; aussi le rapport entre l'énergie émise par les sources et la quantité disponible sur les éléments de surface apparaît être en fait aussi important que la quantité reçue dans l'absolu par ces surfaces, et par voie de conséquence leur visualisation ne l'est pas moins... On notera que cette mise en relation du niveau d'éclairement des surfaces relativement aux conditions d'insolation (son aspect visualisation) est une fonction qui n'est jamais proposé par les outils traitant de la lumière naturelle.

Sur le plan instrumental, plusieurs possibilités sont offertes ; l'une d'entre elles a déjà été présentée dans la section 6.5.3 ; sont rappelées dans la suite les représentations 2D classiques de même que sont proposés plusieurs modes de représentation 3D qui mettent en évidence les niveaux relatifs des luminances sur la voûte céleste (et notamment la concavité ou la convexité de la répartition).

6.7.1 Méthodes classiques

Une (ou plusieurs) projection(s) plane(s) de la voûte céleste comportant les contours d'isoluminance : une projection « horizontale », ou plus précisément sur un plan perpendiculaire à l'axe du zénith, et en principe une vue frontale de l'hémisphère, réalisée sur un plan parallèle au plan de symétrie de la distribution – celui qui contient l'axe zénithal et le soleil (Fig. 146. et Fig. 147.). La projection horizontale peut être de type équidistant s'il s'agit de permettre des comparaisons avec des photographies réalisées au *fish-eye*, ou de préférence stéréographique de manière à ne pas déformer les zones de ciel proches de l'horizon (voir les sections 5.3.2 et 6.6.1). Ces représentations bidimensionnelles sont satisfaisantes en tant que telles, mais leur défaut majeur est de rendre difficile les comparaisons entre plusieurs diagrammes voisins, et de ne pas mettre immédiatement en évidence la convexité ou la concavité de la répartition (c'est-à-dire le rapport luminance zénithale / luminance à l'horizon supérieur ou inférieur à 1 respectivement).

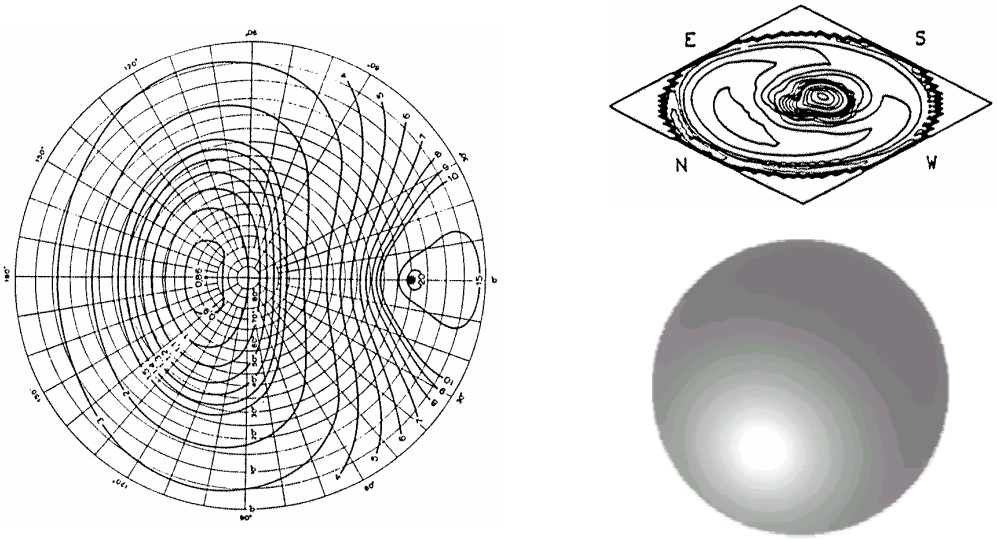


Fig. 146. Distribution de la luminance céleste : à gauche représentation des contours d'isoluminance sur une projection stéréographique de l'hémisphère (ciel clair CIE, altitude solaire de 20°) ; en haut à droite axonométrie de la projection horizontale des contours d'isoluminance (ciel clair également, mais altitude solaire nettement plus importante que précédemment) ; en bas à droite projection stéréographique à nouveau avec dégradé coloré (niveaux de luminance élevés en clair).

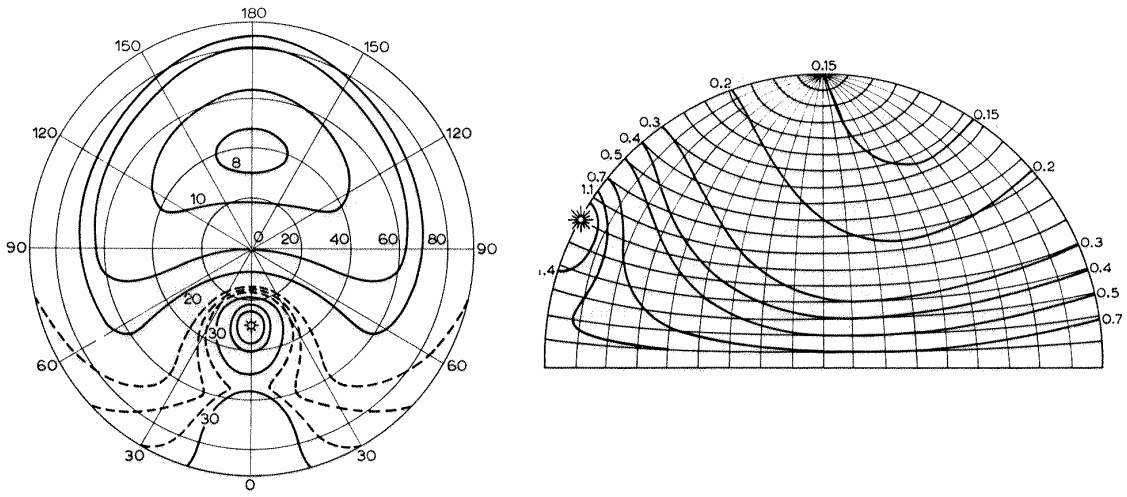


Fig. 147. Autres exemples de représentation de la distribution des luminances sur la voûte céleste : contours d'isoluminance sur des projections équidistantes de l'hémisphère céleste (ciel clair, altitude du soleil égale à 60°).

6.7.2 Méthodes développées pour SOLENE

Les méthodes précédentes ne donnant pas réellement satisfaction et le fait de disposer maintenant d'un « véritable » hémisphère modélisé en trois dimensions nous a conduit à élaborer plusieurs types de représentation tridimensionnelle :

- Une représentation bidimensionnelle de l'hémisphère céleste où les triangles sphériques sont colorés selon une charte de gris ou de couleurs (Fig. 148.) ; malheureusement là encore les comparaisons entre répartitions voisines restent difficiles.

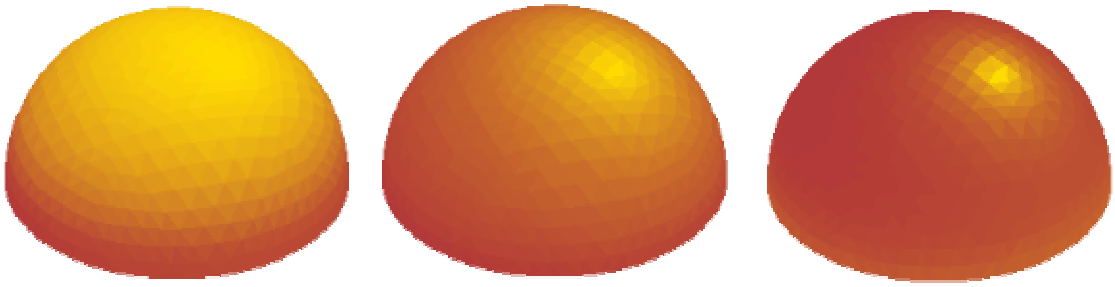


Fig. 148. Éléments de surface de l'hémisphère céleste colorés selon la distribution des luminances (de gauche à droite ciel couvert, ciel intermédiaire, ciel serein).

- Une représentation de type axonométrique ou perspective, dans laquelle l'altitude de chaque point est proportionnelle à son niveau de luminance, qui mettra le mieux en évidence les gradients dans la zone circumsolaire notamment (Fig. 149.). L'avantage principal de ce mode de représentation est de rendre facilement lisibles les comparaisons entre différentes répartitions, même si elles sont relativement proches les unes des autres. De plus l'orientation de la projection axonométrique est aisément modifiable, permettant ainsi d'en faciliter sa lecture, mais l'intérêt majeur d'une telle représentation réside surtout dans sa mise en concordance avec une axonométrie existante – une scène urbaine modélisée par exemple. Le positionnement de l'hémisphère en regard de la scène indique immédiatement sous quelles conditions d'insolation a été effectuée la simulation.

  En fait plusieurs types de représentations sont disponibles : un maillage de la projection de l'hémisphère sur le plan horizontal, où les altitudes des nœuds correspondent à leur niveau de luminance ; ou bien une représentation similaire mais avec la superposition d'une charte colorée et l'ajout éventuel des contours de la discrétisation de l'hémisphère pour une meilleure lisibilité des zones de ciel

concernées (Fig. 149.) ; ou encore un interfaçage avec le logiciel *Mathematica*[104] (Fig. 150.), qu'une *applet* Java développée par M. Kraus[105] permet de rendre dynamique au sein d'un navigateur Web (l'intérêt d'un tel mode de visualisation concerne bien davantage les aspects didactiques du site Audience – voir la fin de la section 5.4.3.2.2 – que SOLENE lui-même).

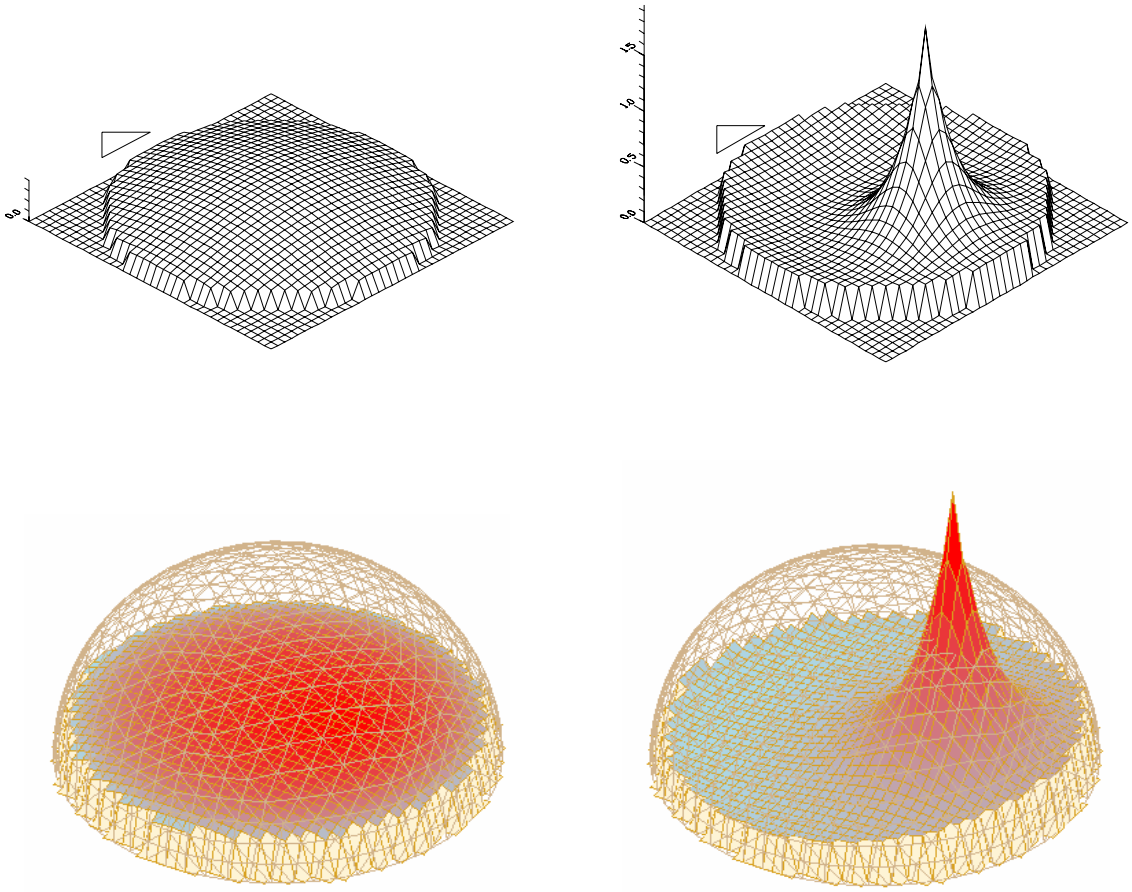


Fig. 149. Exemples de représentations en 3 dimensions pour 2 types de ciel : ciel couvert à gauche (la luminance est indépendante de l'azimut), et ciel serein à droite (pic de luminance dans la position solaire). Dans ce mode de représentation, le cercle extérieur surélevé représente l'horizon et le centre le zénith. L'angle polaire traduit l'azimut et la hauteur de la surface l'amplitude de la luminance de ciel normalisée.

[104] *Mathematica*™ est sans conteste l'une des références dans le domaine des logiciels mathématiques (calculs symboliques, visualisation 2D et 3D, etc.) ; il est développé par Wolfram Research (http://www.wolfram.com/products/mathematica).

[105] Cette *applet* porte le nom de LiveGraphics3D et permet d'afficher dynamiquement (translation, rotation, zoom) les graphiques 3D produits par *Mathematica*™ dans les pages HTML ; la version v0.01 est disponible à l'adresse http://wwwvis.informatik.uni-stuttgart.de/~kraus/LiveGraphics3D/index.html.

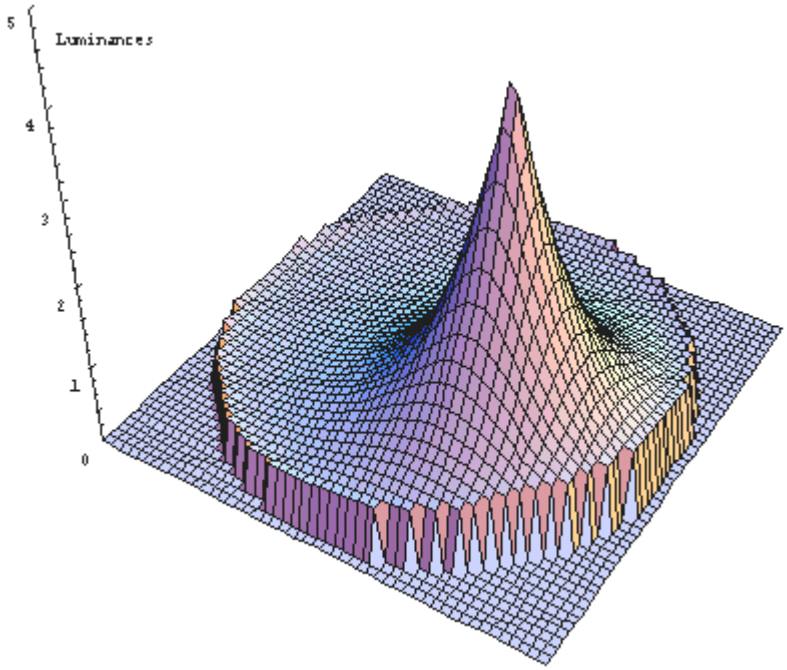


Fig. 150. Exemple d'interfaçage avec le logiciel *Mathematica*™.

- A titre purement documentaire cette fois, on peut encore mentionner une autre tentative[106] de représentation tridimensionnelle des luminances : il s'agit d'un « solide » fictif cartographiant les luminances énergétiques de ciel à un instant donné ; sa surface a été obtenue en joignant les extrémités des vecteurs luminance, leur origine étant centrée au point d'observation. La pertinence d'une telle représentation reste à prouver…

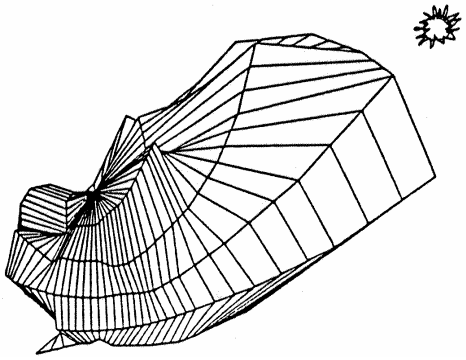


Fig. 151. Solide des luminances énergétiques, en vue axonométrique...

[106] Figure extraite d'un article de Kittler, Hayman, Ruck et Julian [32].

6.8 Efficacité lumineuse du rayonnement

Qu'il s'agisse de Météo-France ou de toute autre station météorologique, et quelle que soit sa situation dans le monde, ces différents organismes ne procèdent à aucune mesure de *grandeur lumineuse* (éclairement ou luminance) ; ils mesurent par contre des grandeurs énergétiques, qu'il faut transformer en grandeurs lumineuses par l'intermédiaire d'un *modèle d'efficacité lumineuse* du rayonnement. Ce sont donc des laboratoires indépendants travaillant dans le domaine de l'éclairage naturel qui, par des campagnes de mesures en différents points du globe, sont à l'origine des modèles permettant de relier les grandeurs lumineuses aux grandeurs énergétiques (celles-ci sont mesurées sur un plan horizontal exclusivement) ; leur finalité est de préciser la fraction du rayonnement solaire qui viendra impressionner la rétine.

6.8.1 Généralités

L'efficacité lumineuse du rayonnement solaire est définie comme le rapport entre l'éclairement lumineux (en lux) reçu sur une surface et l'éclairement énergétique (en W/m^2) reçu sur la même surface – soit le rapport du flux lumineux au flux d'énergie. Elle s'exprime en lumen par watt (lm/W). C'est la méthode la plus ancienne et la plus simple pour obtenir des valeurs d'éclairement lumineux. Dans la quasi totalité des cas cette efficacité lumineuse n'est disponible que pour l'éclairement sur un plan horizontal.

La plupart des modèles d'efficacité lumineuse sont liés à un type de ciel : couvert, clair, intermédiaire... L'utilisation du modèle approprié nécessite la connaissance *a priori* de ce type de ciel. D'autres paramètres tels que la pollution du site ont également une influence notable. Mais celui qui est le plus important est bien évidemment l'altitude solaire (lorsque le soleil est bas sur l'horizon, l'efficacité de la lumière est plus faible puisqu'elle est principalement constituée de rayons orangés, pour lesquels l'œil présente une sensibilité moindre).

Pour l'éclairement solaire direct, l'efficacité lumineuse croît très sensiblement avec l'altitude du soleil (de 70 à 105 lm/W environ) ; pour la lumière diffuse du ciel, elle varie d'environ 130 lm/W pour un ciel clair à 110 lm/W pour les ciels couverts. En plus de l'altitude solaire, l'efficacité lumineuse dépend également de la proportion de vapeur d'eau, d'aérosols, du type et de la quantité de nuages...

6.8.2 La compilation de Paul J. Littlefair

Une compilation effectuée par Littlefair parue dans Lighting Research & Technology [41] donne les ordres de grandeur, à partir des mesures effectuées par divers auteurs dans toutes les parties du monde, des efficacités lumineuses pour les radiations solaires directes (Fig. 153.) et les ciels diffus.

- Soleil direct

Le tableau et les courbes proposées par Littlefair montrent des résultats pour le moins disparates... Il est cependant certain que l'efficacité lumineuse solaire K_s augmente avec l'altitude du soleil, mais de manière non linéaire ; si elle est varie relativement peu pour des altitudes solaires h supérieures à 25° environ, elle chute brutalement en deçà ; Moon proposait dès 1940 les valeurs de 117 lm/W pour $h > 25°$ et 90 lm/W à 7,5°.

Plusieurs auteurs proposent des fonctions facilement utilisables :

- Dogniaux, à partir de mesures réalisées en Belgique et publiées en 1960 :

$$K_s = K_0 \cdot e^{-mT(a-a_s)} \qquad (\text{lm}\cdot\text{W}^{-1})$$

où K_0 est l'efficacité lumineuse extraterrestre (93,73 lm/W),
m la masse d'air,
a le coefficient d'extinction atmosphérique,
et T le trouble atmosphérique.

- La fonction de Aydinli donne K_s (en $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$) en fonction de l'altitude solaire h en degrés :

$$K_s = 17{,}72 + 4{,}4585 \cdot h - 8{,}7563 \cdot 10^{-2} \cdot h^2 + 7{,}3948 \cdot 10^{-4} \cdot h^3 - 2{,}167 \cdot 10^{-6} \cdot h^4 - 8{,}4132 \cdot 10^{-10} \cdot h^5$$

- Le modèle JOULE, basé sur les travaux de Chauvel et Dumortier et cité dans le *European Solar Radiation Atlas*[107] propose également une expression polynomiale pour la valeur de K_s (en $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$), fonction de l'altitude solaire h en degrés ; pour les hauteurs solaires importantes cependant (supérieures à 60°), la valeur de K_s est constante et fixée à 105 lm/W :

$$K_s = 62{,}134 - 0{,}75885 \cdot h + 0{,}27749 \cdot h^2 - 0{,}012108 \cdot h^3 + 2{,}052 \cdot 10^{-4} \cdot h^4 - 1{,}2278 \cdot 10^{-6} \cdot h^5 \qquad \text{si } h < 50°$$

$$K_s = 103 + 0{,}2(h - 50) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \text{pour } 50° < h < 60°$$

$$K_s = 105 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \text{pour } h > 60°$$

[107] Palz W. et Grief J., *CEC European Solar Radiation Atlas*, Berlin, Springer, 1996.

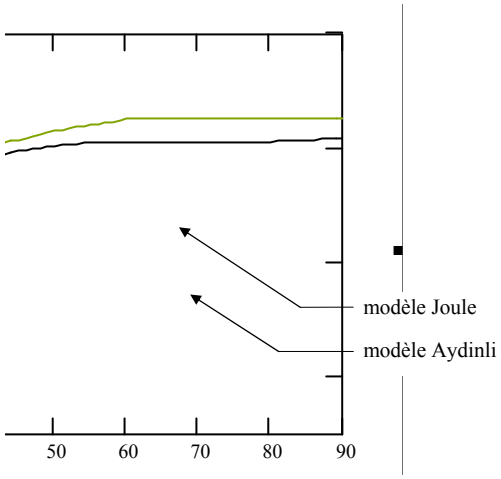


Fig. 152. Les deux expressions qui précèdent (Aydinli et modèle Joule) restent sensiblement voisines ; d'autres auteurs ont des propositions nettement divergentes - voir la figure suivante (hauteur solaire *h* en degrés en abscisse, efficacité lumineuse en $lm \cdot W^{-1}$ en ordonnée).

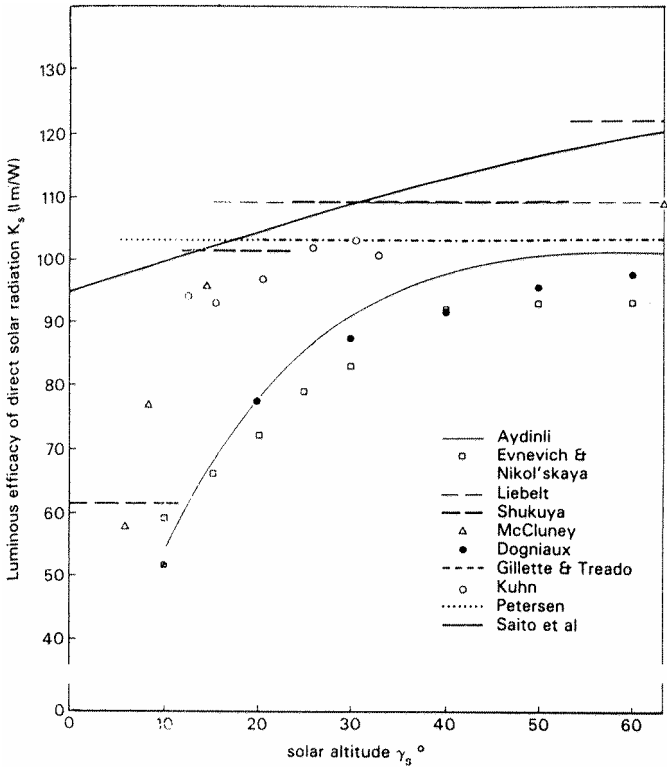


Fig. 153. Ordres de grandeur et graphes de l'efficacité lumineuse du rayonnement solaire direct selon divers auteurs, en fonction de l'altitude solaire *h*.
On notera, outre la grande disparité des résultats, le peu d'information disponible pour des altitudes solaires inférieures à 5° environ ; ceci est dû au fait que, dans un environnement urbain et pour des altitudes aussi faibles, très peu de surfaces reçoivent la lumière solaire directe (masques du bâti).

- Ciel diffus

- Pleijel[108] a montré que de l'efficacité lumineuse des ciels clairs et couverts dépend peu de l'altitude solaire (et donc de la période de l'année) ; d'ailleurs dans le cas du ciel couvert, on attribue généralement à $K_{couvert}$ une valeur constante de 110 lm/W ; la variation est évidemment un peu plus importante dans le cas des ciels clairs et intermédiaires.

- Le modèle JOULE propose une efficacité lumineuse de l'éclairement diffus basée sur la notion d'indice de nébulosité I_N, lui-même dépendant directement du rapport de couverture nuageuse CR (*cloud ratio*), et finalement de la masse d'air optique, de la diffusion de Rayleigh et de l'altitude solaire. La fonction proposée n'est valable que pour les altitudes supérieures à 5°, dans le cas contraire l'efficacité lumineuse est fixée à 120 lm/W.

$$K_D = 144 - 29 \cdot \left[1 - 0{,}55 \cdot I_N + 1{,}22 \cdot I_N^2 - 1{,}68 \cdot I_N^3\right] \qquad (\text{lm}\cdot\text{W}^{-1})$$

où I_N est l'indice de nébulosité.

- Muneer et Kinghorn proposent en 1997 une formulation qui ne fait pas intervenir l'altitude solaire mais l'indice de clarté instantané K_t, quotient de l'éclairement énergétique horizontal global à l'éclairement extraterrestre ; K_t tend vers 0 pour un ciel couvert sombre et vers 1 pour un ciel très clair :

$$K_D = 130{,}2 - 39{,}828 \cdot K_t + 49{,}9797 \cdot K_t^2 \qquad (\text{lm}\cdot\text{W}^{-1})$$

où K_t est l'indice de clarté instantané, K_t variant entre 0 et 1.

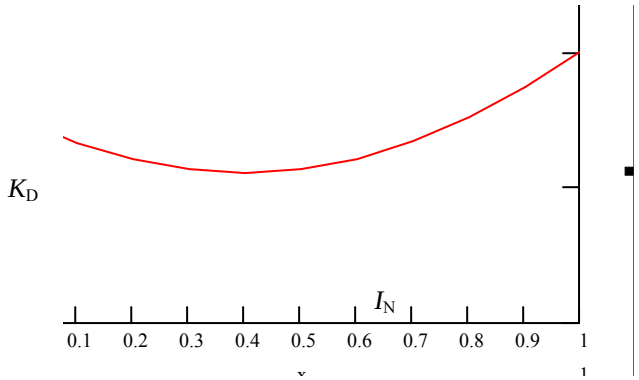


Fig. 154. Variation de l'efficacité lumineuse diffuse K_D (lm·W^{-1}) pour le modèle Muneer & Kinghorn, en fonction de l'indice de nébulosité I_N.

[108] Pleijel G., *The computation of natural radiation in architecture an town planning*, Meddelande Bull, Stockholm, 1954.

La variation est de l'ordre de 15% et la courbe affiche une concavité pour les valeurs intermédiaires de la variable K_t ; ce phénomène semble universel car il apparaît quelque soit la situation géographique des stations de mesure – il a d'ailleurs déjà été signalé par d'autres auteurs (Perez, Delaunay…).

Le tableau ci-dessous (Fig. 155.), établi par le CSTB d'après la compilation de Littlefair, tente de résumer l'ensemble des données précédentes et fournit les ordres de grandeur de différents modèles d'efficacité lumineuse du rayonnement solaire sur un plan horizontal :

Hauteur du soleil	Ciel couvert	Ciel clair		Soleil
		diffus	global	
$5° < h < 15°$	95 à 115 lm/W ± 15 lm/W (↑ avec *h*)	110 à 130 lm/W ± 20 lm/W (↑ avec *h*)	90 à 100 lm/W ± 15 lm/W (↑ avec *h*)	75 à 90 lm/W ± 20 lm/W (↑ avec *h*)
$h \geq 15°$	112 lm/W ± 10 lm/W	130 lm/W ± 20 lm/W	105 lm/W ± 10 lm/W	90 à 110 lm/W ± 10 lm/W (↑ avec *h*)

Fig. 155. Ordres de grandeur de l'efficacité lumineuse du rayonnement solaire sur un plan horizontal, en fonction de la hauteur solaire *h* (source Traité de Physique du bâtiment, tome 1, CSTB).

6.8.3 Le modèle d'efficacité lumineuse de Perez

À l'instar du modèle général de ciel décrit dans la section 6.6.6, Perez propose deux modèles d'efficacité lumineuse, l'un pour le soleil direct et l'autre pour le ciel diffus, à partir de mesures enregistrées toutes les heures (toutes les 15 minutes dans certains cas) sur 13 sites (10 aux États-Unis, 3 en Europe), et ce sur des périodes allant de 6 mois à 3 ans.

Ces modèles d'efficacité lumineuse sont construits de manière similaire au modèle de ciel du même auteur ; ils dépendent d'ailleurs tous deux des mêmes coefficients ε et Δ (indices de pureté et de luminosité du modèle Perez). L'indice de pureté ε est discrétisé en huit intervalles pour lesquels Perez donne les valeurs des quatre coefficients qui paramètrent la fonction d'efficacité lumineuse.

- Soleil direct

Outre les paramètres ε et Δ, la fonction proposée par Perez dépend également de la hauteur d'eau précipitable et de l'angle zénithal :

$$K_S = a(\varepsilon) + b(\varepsilon) \cdot w + c(\varepsilon) \cdot \exp(5{,}73 \cdot Z - 5) + d(\varepsilon) \cdot \Delta$$

où w est la hauteur d'eau précipitable (Perez fixe sa valeur à 2),
Z l'angle solaire zénithal,
et ε et Δ les coefficients du modèle de Perez (définis en 6.6.6).

	Indice de pureté ε	*a*	*b*	*c*	*d*
1	1.000 → 1.065	57,20	-4,55	-2,98	117,12
2	1.065 → 1.230	98,99	-3,46	-1,21	12,38
3	1.230 → 1.500	109,83	-4,90	-1,71	-8,81
4	1.500 → 1.950	110,34	-5,84	-1,99	-4,56
5	1.950 → 2.800	106,36	-3,97	-1,75	-6,16
6	2.800 → 4.500	107,19	-1,25	-1,51	-26,73
7	4.500 → 6.200	105,75	0,77	-1,26	-34,44
8	6.200 → 12.000	101,18	1,58	-1,10	-8.29

Fig. 156. Valeurs des 4 coefficients de la fonction d'efficacité lumineuse normale directe selon Perez.

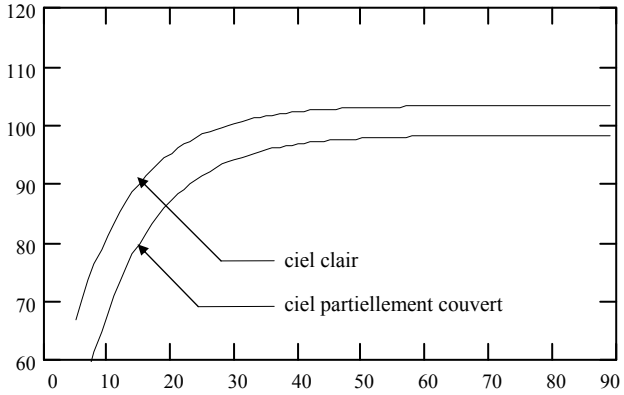


Fig. 157. Variation de l'efficacité lumineuse normale directe K_s pour le modèle de Perez en fonction de l'altitude solaire *h* ; cas d'un ciel clair (ε = 6,3 et Δ = 0,12) et d'un ciel partiellement couvert (ε = 3,2 et Δ = 0,24).

- Ciel diffus

Pour l'efficacité lumineuse du ciel diffus, la fonction proposée par Perez est très proche de la précédente. Conformément à ce qui a été dit plus haut, le graphique montre qu'elle varie notablement avec l'altitude solaire dans le cas du ciel clair, alors qu'elle est quasiment constante dans le cas du ciel couvert (dans le logiciel DOE-2, elle est d'ailleurs choisie constante et égale à 110 lm/W).

$$K_D = a(\varepsilon) + b(\varepsilon) \cdot w + c(\varepsilon) \cdot \cos Z + d(\varepsilon) \cdot \log \Delta$$

	Indice de pureté ε	a	b	c	d
1	1.000 → 1.065	97,24	-0,46	12,00	-8,91
2	1.065 → 1.230	107,22	1,15	0,59	-3,95
3	1.230 → 1.500	104,97	2,96	-5,53	-8,77
4	1.500 → 1.950	102,39	5,59	-13,95	-13,90
5	1.950 → 2.800	100,71	5,94	-22,75	-23,74
6	2.800 → 4.500	106,42	3,83	-36,15	-28,83
7	4.500 → 6.200	141,88	1,90	-53,24	-14,03
8	6.200 → 12.000	152,23	0,35	-45,27	-7.98

Fig. 158. Valeurs des 4 coefficients de la fonction d'efficacité lumineuse globale diffuse selon Perez.

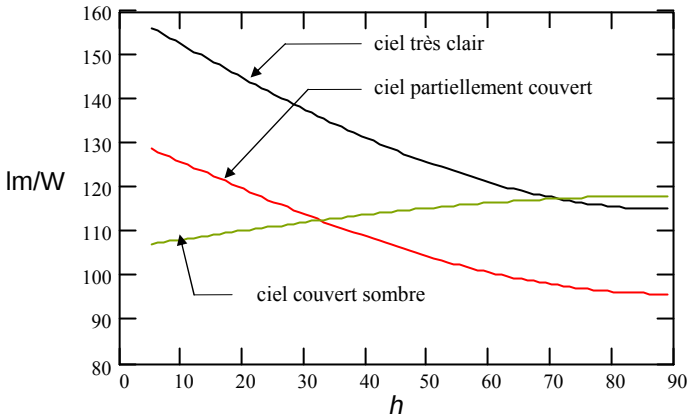


Fig. 159. Variation de l'efficacité lumineuse diffuse K_c pour le modèle de Perez en fonction de l'altitude solaire h ; cas d'un ciel clair (ε = 6,3 et Δ = 0,12), d'un ciel partiellement couvert (ε = 3,2 et Δ = 0,24) et d'un ciel couvert sombre (ε = 1 et Δ = 0,08).

De même que pour les ciels, aucun de ces modèles n'est universellement acceptable ; en effet même s'ils sont « construits » à partir d'une grande quantité de mesures, celles-ci restent tributaires de la situation géographique de la station, et de plus les campagnes de mesures sont de toutes manières limitées dans le temps ; à l'heure actuelle les différents chercheurs dans le domaine s'efforcent d'élaborer les modèles les plus « universels » possibles en recueillant les données de sites aux conditions climatiques très éloignées. C'est la raison de la mise chantier par la CIE du programme international de mesure de la distribution des luminances sur la voûte céleste évoqué plus haut.

Pour notre étude, le choix s'est porté sur le modèle d'efficacité lumineuse de Perez, dont plusieurs auteurs s'accordent à reconnaître la robustesse ; il est en effet susceptible de satisfaire à la fois aux mesures effectuées sur les ciels du sud de la France comme à celles relevées sur les ciels extrêmement troubles et variables du nord de l'Europe ; il

s'agit sans aucun doute de l'un des plus fiables sur le plan européen. A noter que les performances d'un modèle sont liées à sa capacité à pouvoir paramétrer et décrire convenablement les caractéristiques du ciel (la distribution des luminances), qui restent fondamentalement indépendantes du site ; seules leurs fréquences d'occurrence sont directement fonction du site considéré[109].

6.9 Conclusions

6.9.1 À propos des modèles de ciel

Les modèles qui viennent d'être présentés sont tous basés sur une distribution statistique et ils ne permettent donc en aucun cas de rendre compte des conditions réelles en un site donné (et pas même sur le site où ont été accomplies les mesures). Ils réalisent une moyenne des conditions sur l'ensemble de la voûte céleste, un ciel partiellement couvert étant modélisé comme un ciel nuageux et clair, ces conditions étant réparties sur la totalité de l'hémisphère, alors qu'en réalité une partie du ciel peut être dégagée et l'autre couverte. Mais de telles conditions (distributions très hétérogènes) restent plutôt éphémères, alors que les phénomènes étudiés, qu'ils soient de type lumineux et à plus forte raison thermiques, doivent être considérés sur des intervalles de temps suffisamment importants, de telle manière qu'un « lissage » de la distribution n'est guère préjudiciable. Dans le même ordre d'idée, certaines recherches (Tregenza [77] notamment – voir la section 6.6.5 *Modèles de ciels intermédiaires*) ont tenté de représenter la géométrie des nuages et à les distribuer de manière aléatoire sur la voûte céleste.

Finalement le seul moyen qui permette de reproduire des conditions de ciel réelles serait de transposer les conditions mesurées sur site, soit par l'intermédiaire de photographies, soit directement en niveaux de luminance ou de radiance. En ce qui concerne la transposition de photographies ou d'enregistrements vidéo de ciels en niveaux de luminance, la tâche est loin d'être aisée en raison des problèmes évoqués en 6.6.1 ; le coût d'un tel appareillage est également à considérer... Par contre la transposition directe, sur l'hémisphère discrétisé, des mesures de radiance ou de luminance réalisées sur site réel ne paraît guère poser de problèmes.

De toute manière, même si l'affectation des luminances aux éléments de surface de la voûte céleste peut parfois se trouver assez éloignée de la réalité (distribution statistique),

[109] Potentiellement, l'ensemble des ciels peut donc s'appliquer à tout lieu géographique ; mais chaque site affiche des probabilités plus ou moins importantes devant un type particulier de distribution : par exemple un ciel méditerranéen peut aller du ciel couvert très sombre au ciel très clair, avec une probabilité plus nettement plus importante pour le second…

les niveaux énergétiques qui en résultent sur les éléments de surface de la scène n'en demeurent pas moins tout à fait réalistes.

6.9.2 Quelques précisions concernant la terminologie utilisée

Les termes *direct* et *diffus* utilisés dans les pages qui précèdent peuvent parfois prêter à confusion, surtout si l'on considère le système dans sa globalité (soleil + ciel + objet architectural ou urbain). En fait ils s'appliquent différemment selon les entités considérées : ou bien il s'agit de l'ensemble soleil + ciel exclusivement – c'est-à-dire les luminaires –, ou alors ils concernent la scène urbaine elle-même (ou l'objet architectural).

- Du point de vue de l'ensemble soleil + ciel, le ciel dispense bien une énergie *diffuse* puisqu'elle est émise par l'ensemble la voûte céleste (le rayonnement est *diffusé* par les particules de l'atmosphère), par opposition à l'énergie *directe* émise par le soleil, seule et unique source d'énergie ; c'est précisément la manière dont ils ont été définis dans la section 3.1.1.

- Par contre, du point de vue de l'objet architectural ou de la scène urbaine, l'énergie provenant du ciel aura un statut similaire à celle venant du soleil, et sera donc plutôt considérée comme directe ; en effet, un élément de surface de la scène recevra *directement* l'énergie de la portion de ciel qu'il « voit ». Pour la scène, on ne parlera d'énergie diffuse qu'après le traitement des inter-réflexions (chaque élément de surface peut, potentiellement – c'est-à-dire sans tenir compte des obstructions –, distribuer et recevoir de l'énergie à / de tous les autres).

  Cette dernière manière d'envisager les termes *direct* et *diffus* correspond bien à la vision qu'avait un Léonard de Vinci lorsqu'il écrivait dans son *Traité de la peinture* : « Les lumières sont de deux natures : l'une s'appelle originelle et l'autre dérivée. La lumière originelle est celle qui provient de l'ardeur du feu, de la lumière du soleil ou de l'air, la lumière dérivée est celle qui est réfléchie »... ; les qualificatifs de Léonard apparaissent finalement beaucoup plus clairs et évocateurs que la terminologie couramment usitée, à caractère nettement plus scientifique.

► Le modèle d'éclairement SOLENE : notre contribution

On a vu dans les pages qui précèdent que constituer un « modèle de soleil » et un « modèle de ciel » revient globalement à mettre en œuvre une géométrie, les angles solides associés, ainsi que la contribution énergétique des éléments de la géométrie en question.

Ces différents aspects ont été implémenté dans SOLENE, sous forme de codes de calcul indépendants ou bien liés entre eux de manière transparente pour l'utilisateur (l'annexe 2 rappelle l'ensemble des programmes développés, avec une description succincte pour chacun d'eux) :

- Une fonction permettant de constituer un modèle géométrique de ciel par triangulation géodésique de l'hémisphère (de 16 à 4096 éléments), en cohérence avec les développements précédents du logiciel, notamment dans les formats de fichiers, dans le traitement de la visibilité des éléments de ciel, etc. (commande *geode_ciel*). Cette fonction lance automatiquement la commande *angl_solid* qui détermine l'angle solide sous lequel est vu chacun de ces éléments de ciel depuis la terre.

- Une analyse des différents modèles de luminance, le choix et la mise en oeuvre du modèle de Perez, le plus récent et le plus flexible de tous (commande *luminance_ciel*) ; présence également des ciels CIE normalisés (clair et couvert, avec *luminance_ciel_cie_serein* et *luminance_ciel_cie_couvert* respectivement), que l'on ne peut qu'approcher avec le modèle de Perez, très utiles pourtant dans le cas d'une analyse de type expertise, puisqu'il devient alors nécessaire de se placer dans le cadre normatif (vérification des niveaux et de la répartition des éclairements lumineux dans un local par exemple). Ces descripteurs peuvent être générés à un instant donné (descripteur simple correspondant à l'heure de la simulation), ou fonction du temps (succession de descripteurs simples générés par pas de temps). Les visualisations décrites ci-dessous sont ainsi disponibles sous forme d'animations, grâce à une lecture séquentielle des fichiers descripteur.

- La visualisation tridimensionnelle du ciel au sein même de la scène simulée, dans l'environnement OpenGL, sous la forme d'un hémisphère de dimension variable portant un gradient coloré lié à la distribution des luminances.

- La mise en place d'autres modes de représentation, sous la forme de « champs de hauteurs », soit directement dans la fenêtre de visualisation OpenGL (*luminance_3d*), soit *via* un interfaçage avec *Mathematica*™, permettant ainsi une visualisation dynamique sur navigateur Internet (intérêt évident pour le site *Audience* – voir la fin de la section 5.4.3.3.2).

- La représentation, sur l'hémisphère céleste, de la course du soleil par pas de temps (commande *course_soleil*) ; y est associé automatiquement l'angle solide sous lequel le soleil est vu depuis la terre (considéré comme constant).

- La détermination, toujours à l'aide du modèle de Perez, du descripteur traduisant la luminance énergétique solaire (*luminance_soleil*). Ce descripteur se trouve évidemment associé à la géométrie précédente.

▼ Ce chapitre vient de détailler la constitution et la mise en place des modèles de soleil et de ciel, sur les plans à la fois énergétique et lumineux. À partir de la connaissance des éléments précédents et en se situant cette fois au niveau d'une scène urbaine ou de l'intérieur d'un local, il va s'agir maintenant d'identifier les parties de cette scène qui vont effectivement recevoir des sources (problème de visibilité), ainsi que quantifier l'énergie reçue par les surfaces concernées. Cet aspect constitue l'étape préliminaire indispensable à la mise en place du principe de réflexions multiples. Ce sont là les deux éléments qui constituent l'essentiel du chapitre suivant.

7 Mise en place d'un modèle de réflexion

Le chapitre précédent a détaillé la constitution et la mise en place des modèles relatifs aux sources d'énergie. Le propos consiste maintenant à se situer à l'intérieur de la scène tridimensionnelle, et à évaluer l'énergie reçue par tout élément de cette scène vu depuis les sources ; cet aspect constitue la première partie de ce chapitre. Elle est suivie par la mise en place théorique et pratique du phénomène de réflexions multiples, qui prend en considération une approche simplifiée du facteur de réflexion des matériaux. Le chapitre se termine par les développements théoriques concernant des fonctions de réflexion plus complètes et précises que les simplifications adoptées jusqu'alors ; une ébauche de mise en place dans SOLENE est également proposée.

7.1 Énergie reçue par la scène

Déterminer l'énergie diffuse émise par l'ensemble de la voûte céleste (objet du chapitre 6) conduit naturellement à l'évaluation de l'énergie que reçoit *directement* la scène depuis cette source « secondaire » ; il s'agit évidemment d'une opération préalable au traitement des réflexions et échanges entre les différentes surfaces de l'environnement, cette dernière opération consistant simplement (même si sa résolution est fort complexe !) à répartir l'énergie qui les a frappées, au prorata de leur « dépendance » géométrique (voir à ce sujet la détermination des facteurs de forme).

À partir du modèle de ciel précédemment défini (géométrie et angles solides d'une part, distribution des luminances d'autre part), ainsi que de la géométrie de la scène à étudier, il s'agit maintenant de déterminer l'énergie qui parvient en tout point de l'environnement depuis chacun des éléments de la voûte céleste. Ce calcul doit être évidemment réalisable quelque soit le type de ciel – du ciel totalement couvert au ciel serein –, mais dans ce dernier cas, l'énergie dispensée par la source quasi ponctuelle que constitue le soleil viendra s'ajouter à celle provenant de la voûte céleste ; à noter que si l'énergie solaire directe est bien évidemment largement prépondérante sur celle fournie par la voûte céleste – ce qui explique sans doute pourquoi elle n'a jamais été réellement prise en compte –, l'importance de cette dernière est pourtant loin d'être anecdotique pour les espaces « à l'ombre » (du soleil !) ; comme on l'a déjà mentionné plus haut, c'est le cas d'un local ouvert au nord par exemple, dans lequel le niveau d'éclairement peut varier considérablement avec le coefficient de réflexion des prospects.

7.1.1 Aspects géométriques

Déterminer l'énergie qu'est susceptible de recevoir la scène 3D à partir d'un point quelconque de la voûte céleste suppose d'être capable d'évaluer cette énergie en tout point de la surface de la scène ; le traitement numérique implique le maillage des surfaces, à réaliser d'autant plus finement que le gradient d'énergie est important (quelques considérations concernant les maillages sont évoquées dans la suite). Le calcul sera effectué au centre de gravité de la maille, et sera considéré comme valable sur toute son étendue ; de même les questions de visibilité sont traitées de centre de gravité (de la maille) à centre de gravité (de l'élément de ciel).

Théoriquement, l'éclairement en un point *P* d'une surface (en l'occurrence le centre de gravité d'une surface élémentaire d'orientation quelconque) dû à l'hémisphère céleste et sans aucune obstruction s'écrit, avec les notations de la figure (Fig. 160.) :

$$E_P = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\alpha,\theta) \cdot \cos\theta \cdot \cos\eta \cdot \mathrm{d}\theta \cdot \mathrm{d}\alpha$$

où $L(\alpha,\theta)$ est la distribution de l'éclairement, qui est fonction de l'azimut α et de l'altitude θ de l'élément de ciel considéré,

et η l'angle entre la direction de ciel visée et la normale à la surface qui contient *P*.

En pratique cette intégrale ne peut pas être calculée par les techniques traditionnelles en raison des obstructions de l'environnement urbain ; aussi est-elle transformée en une somme discrète sur l'ensemble des éléments de la voûte céleste. Elle revient finalement, à sommer les contributions énergétiques de l'ensemble des éléments de ciel que « voit » le centre de gravité de la maille courante, opération à répéter pour chacune des mailles de la scène. Si la maille en question « voit » un élément de ciel, la contribution de celui-ci est ajoutée à la valeur courante de la maille au regard de la position relative des deux éléments (orientation et angle solide). Le calcul de l'expression ci-dessus se réduit ainsi à un problème de visibilité essentiellement (voir la section suivante).

Il convient finalement, pour chaque élément de surface de la scène :

- d'identifier les portions de ciel vues depuis cet élément (l'ensemble des triangles sphériques visibles – leur centre de gravité en fait) ;

- de déterminer l'énergie reçue par cumul des luminances des éléments de ciel visibles, avec respect de l'angle d'incidence et de l'angle solide sous lequel ils sont vus depuis la surface terrestre (ces angles sont pré-calculés et stockés lors de la modélisation géométrique d'un ciel).

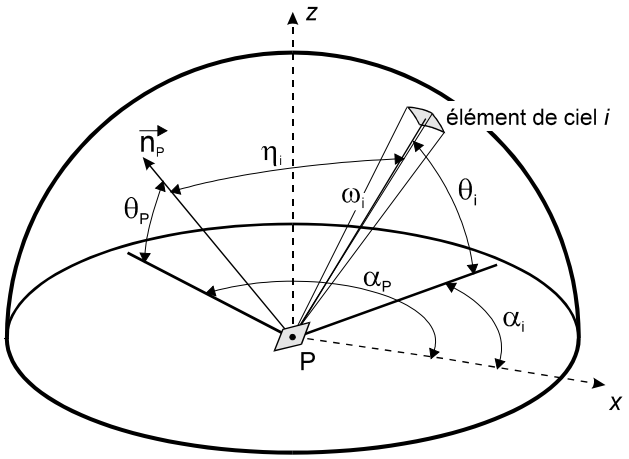
Compte tenu de ces remarques, l'éclairement énergétique ou lumineux, calculé au centre de gravité *P* de chaque élément *j* de la scène, et en tenant compte des obstructions éventuelles, peut être ré-écrit sous forme de somme discrète et devient :

$$E_j = \sum_{i=1}^{n} v_{ji} \cdot \omega_i \cdot L(\alpha_i, \theta_i) \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\eta_i$$

où n est le nombre total d'éléments de ciel,

v_{ji} la fonction de visibilité (égale à 1 si l'élément de ciel est visible depuis le point P , 0 dans le cas contraire),

et ω_i l'angle solide sous lequel est vu l'élément de ciel i .



$$\cos\eta_i = \sin\theta_i \cdot \sin\theta_P + \cos\theta_i \cdot \cos\theta_P \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_P)$$

Fig. 160. Les différents angles utilisés dans la détermination de l'énergie reçue par un élément de surface de la scène.

Cette expression traduit clairement le fait que l'énergie reçue de la voûte céleste par un élément de surface de l'urbain correspond bien à ce que cet élément « voit » du ciel, permettant ainsi de répercuter l'anisotropie des ciels sur l'environnement urbain : c'est le cas d'un ciel voilé par exemple, pour lequel l'éclairement des façades dépendra de leur orientation par rapport à la position du soleil.

Cette caractéristique permet encore d'imaginer, dans la perspective de développements ultérieurs relatifs à la perception de l'espace urbain, refléter fidèlement un passage nuageux sur le sol et les façades de l'environnement – pour peu que l'on dispose d'informations réelles quant à la géométrie et au déplacement des nuages, qui deviendront alors des « textures » dynamiques « plaquées » sur l'hémisphère –, permettant ainsi de rendre compte de la variabilité soudaine et importante des ambiances lumineuses (variation du niveau d'éclairement global bien sûr, mais aussi modification importante des contrastes et donc de la perception de la nature même des formes – géométriques, de lumière...).

7.1.2 Détermination de la visibilité

Pour chaque élément de l'environnement *j* et chaque élément de ciel *i*, l'évaluation de la fonction v_{ji} est typiquement un problème de traitement des parties cachées, problème incontournable en synthèse d'image. Parmi les nombreuses méthodes qui ont été proposées, la plus classique est à l'heure actuelle est du *Z-buffer*, dont l'implantation sous forme câblée sur les stations de travail lui confère une grande rapidité.

Un principe différent a été retenu dans le logiciel SOLENE : il consiste à effectuer une projection plane de la scène et à déterminer les intersections des polygones ainsi projetés par un algorithme du type *Weiler et Atherton* (Fig. 161.). Il ne s'agit sans doute pas de la méthode la plus économique en temps de calcul, mais elle possède à son crédit efficacité et robustesse.

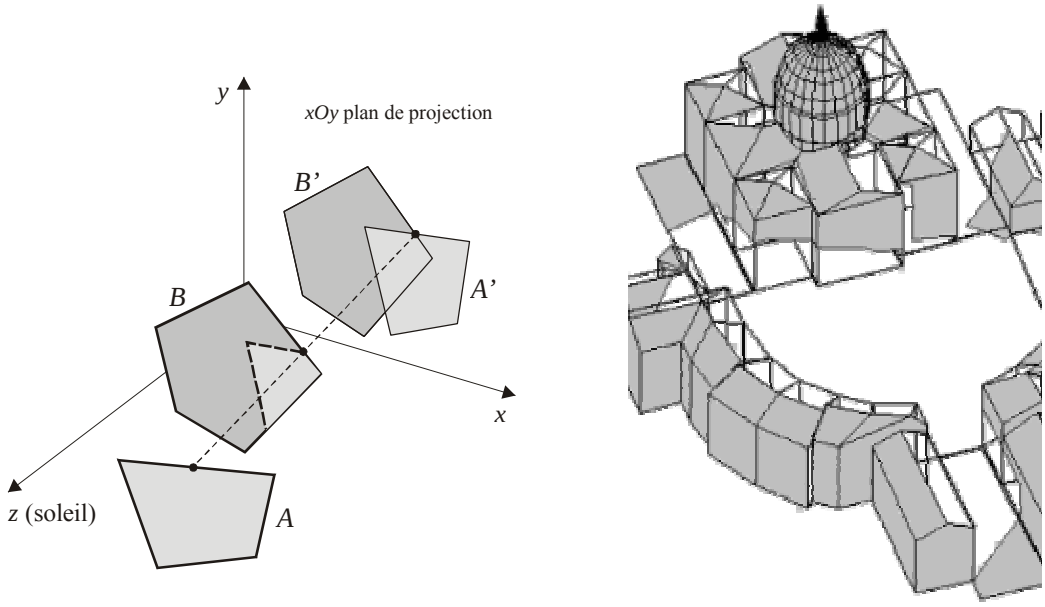


Fig. 161. A gauche principe de traitement des vues cachées ; à droite vue héliodon de la place du Sanitat (Nantes) montrant les découpes polygonales effectuées sur les façades des bâtiments ; les zones claires correspondant à des parties cachées lors de la projection (donc non vues depuis le soleil).

Cette projection plane peut être de type axonométrique (parallèle) s'il s'agit de procéder à une simulation héliodon, ou bien perspective (conique) dans les autres cas. En considérant l'exemple simple d'une projection héliodon, le problème revient à projeter les faces de la scène sur un plan perpendiculaire à la direction soleil / terre, le découpage des faces qui s'intersectent s'effectuant dans ce plan (en deux dimensions donc). Lorsque précisément les projections planes de deux faces se superposent, il est alors nécessaire

de procéder à une recherche de priorité (calcul de la « profondeur » de chacune d'elles, autrement dit leur éloignement par rapport au soleil), puis de procéder au découpage du polygone correspondant à la projection de la face la plus éloignée (*B'* sur la Fig. 161.). La face *A* se situant devant *B* pour l'observateur (ici le soleil), sa projection est conservée dans son intégralité, alors que la projection *B'* du polygone *B* est découpée selon l'opération booléenne *B'–A'*. Reste à déterminer les intersections sur la face « réelle » *B* par projection inverse, depuis le plan de projection, des points d'intersection lus sur le polygone projeté *B'*.

7.1.3 Échantillonnage de la scène

7.1.3.1 Généralités

Le maillage de la géométrie est également un problème habituel en imagerie numérique ; il est en principe nécessaire dès qu'il s'agit de produire des images de synthèse (à moins de logiciels utilisant un langage de description de scène et un calcul de l'image par une technique autre que celle des radiosités, tel le *ray-tracing*) ; le maillage est un aspect fondamental également dans le cadre de la simulation numérique à caractère scientifique (méthode aux éléments finis notamment). Il est bien évident que chaque domaine d'application impose ses contraintes quant à la forme et à la dimension des mailles, avec pourtant des exigences similaires, comme un accroissement de la densité du maillage dans les zones à forte variations ; ainsi en imagerie, la production d'un rendu photo-réaliste implique un maillage fin au voisinage des limites des masses d'ombres ; de la même manière dans le cas de l'étude de la résistance et des déformation d'une pièce mécanique, où le maillage deviendra plus dense dans les zones à fortes contraintes... Dans tous les cas se posent des questions relatives à la nature du maillage (surfacique, volumique), de même qu'à la dimension des éléments (les mailles) ; ces aspects seront évidemment directement liés à la géométrie de la scène et à l'échelle des phénomènes étudiés.

On notera à ce sujet que dans le cas de l'imagerie traditionnelle, les différents éléments constitutifs de la scène présentent souvent des échelles (relativement) similaires, où bien, dans le cas contraire, les éléments situés au premier plan seront modélisés avec beaucoup plus de précision et de détails que ne le seront les arrière-plans (en cohérence avec la perte d'acuité visuelle liée à l'éloignement) ; le problème est moins simple dès qu'il s'agit de simulations dans un environnement urbain, où l'étude d'un aspect singulier (phénomène micro-climatique, dispositif architectural), évènement donc très localisé, peut être affecté par des phénomènes dont les causes sont d'une toute autre échelle, et/ou relativement éloignés du domaine d'étude. Ces aspects devraient être envisagés dès la phase de modélisation de manière à ce que le niveau de détail, l'étendue de l'environnement, etc. soient en adéquation avec l'échelle des phénomènes étudiés. Ces conditions sont en fait rarement remplies dans la mesure où les objectifs des différents opérateurs sont la plupart du temps divergents (en général la modélisation n'est pas réalisée exclusivement dans un objectif de simulation, mais davantage avec une finalité de (re)présentation).

7.1.3.2 Contraintes et type de maillage utilisé

En ce qui concerne la détermination de l'énergie diffuse en provenance de la voûte céleste, il s'avère que le type de maillage – surfacique évidemment – n'est pas très critique ; un maillage trop lâche fera évidemment perdre en précision dans les zones à fort contraste. Par contre les développements relatifs aux échanges radiatifs sont, en général, beaucoup plus exigeants en ce qui concerne la taille relative, le nombre et la géométrie des éléments de surface de la discrétisation ; dans notre cas, la méthode de calcul des facteurs de forme (voir la section 7.2.2.3.3) impose une contrainte quant aux aires des éléments de surface (elles devront être voisines), mais laisse par contre toute latitude en ce qui concerne leur géométrie (que les mailles soient triangulaires, rectangulaires, etc. n'a aucune importance).

Les quelques programmes qui emploient la méthode des radiosités en image de synthèse utilisent le plus souvent, à l'heure actuelle, un maillage adaptatif, dont l'avantage essentiel est de ne discrétiser que si nécessaire : le maillage initial – le plus souvent carré ou rectangulaire – est relativement lâche, puis affiné uniquement si le gradient de la distribution d'énergie sur un élément de surface est supérieur à un seuil prédéfini (Fig. 162.). Ainsi le maillage est *adapté* précisément aux conditions lumineuses de la scène à calculer ; si les conditions d'éclairage viennent à changer, le maillage lui aussi est modifié puisqu'il est défini durant la phase de calcul.

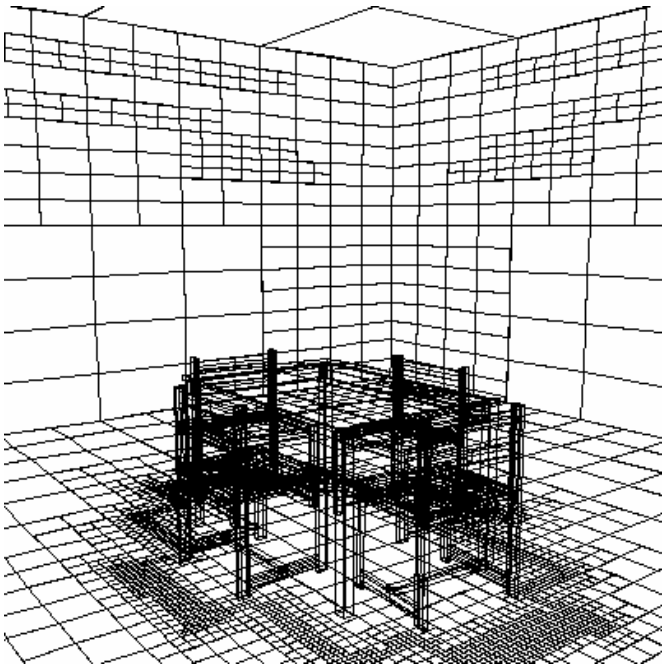


Fig. 162. Exemple de maillage adaptatif utilisé en imagerie ; les zones de fort gradient sont subdivisées « à la demande », et correspondent pour la plupart aux « séparatrices » d'ombre.

Le principe de discrétisation adopté dans SOLENE est différent ; bien qu'il soit sans aucun doute plus coûteux en temps de calcul, il présente néanmoins certains avantages, et notamment une plus grande souplesse quant au choix des différents types de simulation possibles, et donc dans la sélection des descripteurs qui seront affichés au terme de ces simulations. Contrairement à la création d'images photo-réalistes, l'analyse d'un tissu urbain vis-à-vis de l'éclairement énergétique ou lumineux suppose plusieurs types de simulations, qui pourront donc être réalisées avec un seul modèle de discrétisation spatiale ; l'avantage supplémentaire est de permettre ou de faciliter les analyses croisées (obtenues à partir des bases de données produites par les différentes simulations), puisque celles-ci portent sur les mêmes éléments spatiaux (opérateurs numériques et logiques par exemple)...

Le choix s'est finalement porté sur un maillage de type surfacique, avec discrétisation en éléments triangulaires dont les aires restent voisines les unes des autres (Fig. 163.) ; cet aspect est important dans la suite, principalement pour la précision de la solution de l'algorithme de radiosité à raffinement progressif décrit dans la suite (voir le paragraphe 7.2.2.4.3). Il s'agit du code *Triangle*[110], écrit par Jonathan Richard Shewchuck de l'Université Carnegie Mellon (Pittsburgh, Pennsylvanie), qui réalise une triangulation de type Delaunay avec une contrainte sur l'aire maximale des éléments.

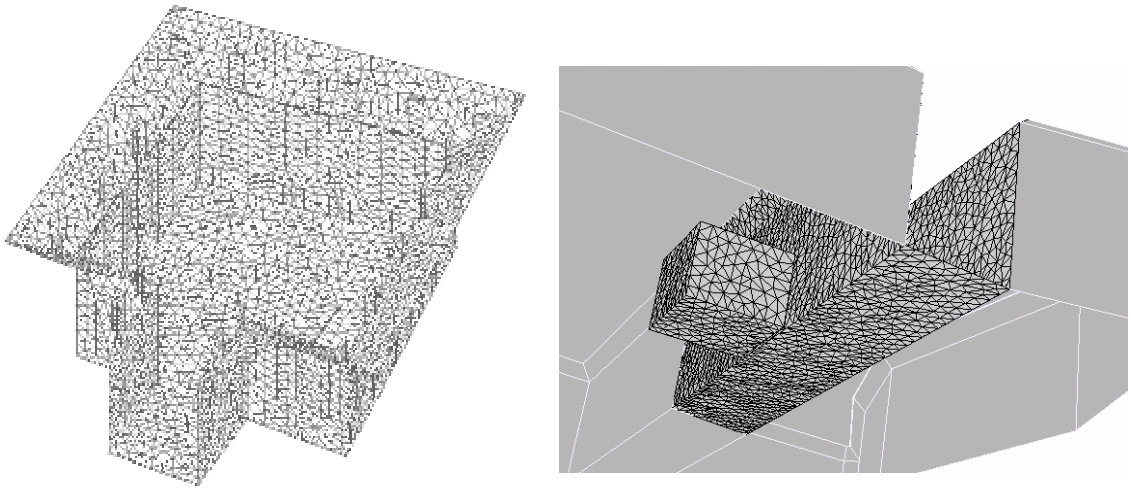


Fig. 163. Deux exemples utilisant le maillage triangulaire : à gauche le maillage d'une cour urbaine comportant le sol, les façades et les toitures (6700 éléments environ), à droite une portion de rue et un local ouvert sur cette rue (4800 éléments environ).

[110] *Triangle* est disponible en *freeware* à l'adresse http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html

Pour des raisons de simplicité le code a été utilisé sans aucune modification, mais a en revanche nécessité l'interfaçage des entrées et sorties au format SOLENE ; son défaut majeur est sans doute une certaine lenteur. Évidemment rien ne s'oppose au choix d'un code de maillage plus performant ou de type différent[111] (Fig. 164.).

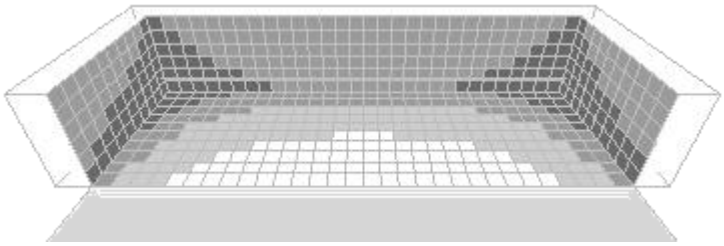


Fig. 164. En haut le maillage triangulaire « d'origine » ; en bas un maillage rectangulaire également implémenté dans SOLENE, utilisé dans le cadre de la simulation des transferts thermiques.

7.2 Réflexions multiples

Les étapes précédentes ont permis de déterminer l'énergie reçue par les différents éléments de surface de la scène directement éclairés par la voûte céleste. Mais les surfaces qui ne « voient » aucune portion de ciel (la voûte céleste est alors totalement masquée par l'environnement urbain) reçoivent pourtant de l'énergie, alors qu'elles ne sont pas éclairées *directement* (ni par le soleil ni par la voûte céleste). Cette énergie provient donc de la réflexion de l'énergie incidente par tous les éléments de surfaces de l'environnement, chacun d'eux se comportant alors comme un émetteur d'énergie secondaire (une source intermédiaire). Finalement, chaque surface se comporte comme un émetteur ou un récepteur potentiel, en fonction de l'énergie reçue initialement et de son coefficient de réflexion (seuls les absorbeurs parfaits, totalement noirs ne réfléchissent pas la lumière). Dans le cas d'un environnement clos, le jeu de ces inter-réflexions tend à terme vers un équilibre, atteint lorsque tous les éléments ont distribué leur énergie envers tous les autres (ou plutôt, d'une manière moins absolue, lorsque l'énergie qui reste à distribuer dans l'environnement est devenue très faible – en pratique inférieure à un seuil donné).

[111] Un code de maillage par éléments rectangulaires a d'ailleurs été développé dans SOLENE pour des applications relatives à l'étude des champs radiatifs.

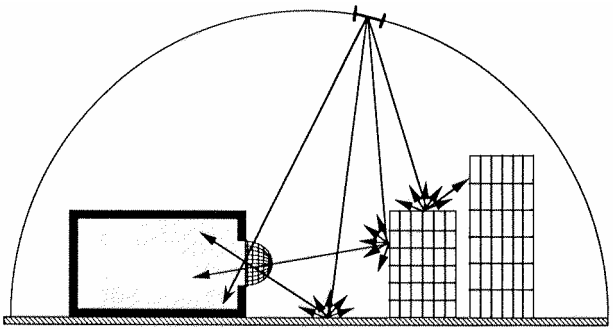


Fig. 165. Réflexion des différents éléments de surface de l'environnement.

7.2.1 Hypothèses simplificatrices

Le nombre et surtout la complexité des paramètres à mettre en œuvre dans un modèle de réflexions multiples conduisent à rechercher quelques simplifications.

- dans le cadre d'une scène urbaine éclairée par la voûte céleste, on fait l'hypothèse qu'il n'y a aucune ré-émission d'énergie vers le ciel, ce qui est faux en toute rigueur ; d'autre part dans le cas d'un plafond nuageux très bas, la face inférieure des nuages ré-émet également vers le sol une quantité d'énergie (lumineuse essentiellement) non négligeable.

- la quantité d'énergie reçue ou émise par un élément de surface est constante sur tout l'élément; il en est de même pour son coefficient de réflexion. En fait, la scène est discrétisée suffisamment finement pour que tous les paramètres puissent être considérés comme constants sur l'étendue d'un élément de surface.

- toutes les surfaces non transparentes sont considérées pour l'instant comme opaques et parfaitement diffuses[112] (ou lambertiennes) ; autrement dit elles réfléchissent la lumière incidente de manière identique dans toutes les directions, de telle sorte que la surface apparaît également « brillante » quelle que soit la direction d'observation ; mais la quantité réfléchie est modulée par l'angle de réflexion des rayons géométriques qui « portent » le flux (approximation possible puisqu'il s'agit de sources ponctuelles, et donc d'aires élémentaires dA) ; l'intensité de chaque rayon I_θ quittant la surface avec un angle θ est alors donné par la loi de Lambert (Fig. 166.) :

$$I_\theta = I_n \cdot \cos\theta$$

où I_n est l'intensité du rayon normal à l'élément de surface.

[112] De nombreuses surfaces mates (plâtre, papier...) suivent approximativement cette loi.

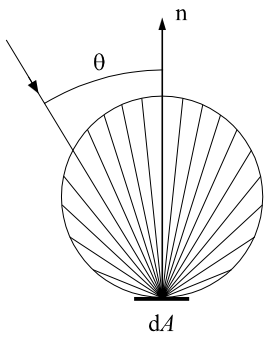


Fig. 166. Réflexion d'une surface idéalement diffuse (lambertienne).
Son diagramme polaire est une sphère tangente la surface.

- les surfaces transparentes, c'est-à-dire les vitrages, sont effectivement pris en considération par le logiciel SOLENE ; leur traitement est suffisamment original (traitement simultané intérieur/extérieur) pour justifier des développements plus importants qui prennent place dans les applicatifs (chapitre suivant).

Mais en pratique une surface idéalement diffuse n'existe pas ; cependant la plupart des matériaux mats employés dans le domaine de l'architecture sont proches de cette caractéristique, autorisant par là-même l'approximation précédente. Pourtant, si l'on se préoccupe des aspects relatifs au confort visuel par exemple, il est impossible de passer sous silence les réflexions spéculaires qui, bien qu'elles n'affectent pas l'environnement dans son ensemble (elles ne concernent finalement que des directions très localisées et des occurrences temporelles très courtes), n'en demeurent pas moins extrêmement perturbatrices sur le plan visuel, voire dangereuses dans certains cas...

Comme déjà précisé plus haut, le traitement de surfaces non lambertiennes, comportant donc des réflexions diffuses directionnelles ou spéculaires est d'ores et déjà en cours de réalisation ; en revanche il n'est pas implémenté à l'heure actuelle dans SOLENE mais les développements théoriques afférents ont été présentés en fin du chapitre *Aspects physiques*.

7.2.2 Traitement du processus de réflexions multiples

7.2.2.1 Principes généraux

Ce calcul est basé sur l'expression physique qui traduit le fait que chaque élément de surface peut distribuer et recevoir, donc échanger avec tous les autres éléments de l'environnement. Le principe qui régit ces échanges est plus connu en imagerie sous le nom de « radiosité », mais il est en fait calqué sur le principe des échanges radiatifs entre surfaces, dont l'origine se situe dans le champ de l'ingénierie thermique.

L'idée de base réside dans le fait que si une partie ou la totalité d'un corps est à une température plus élevée que son environnement, il tend à se refroidir avec le temps en émettant de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie peut être réfléchie, transmise et / ou absorbée.

Plus généralement encore, une radiation électromagnétique est émise à la surface d'un corps dès que celui-ci a été excité thermiquement, en obéissant aux règles suivantes :

- L'échange d'énergie se fait du corps le plus « chaud » vers le corps le plus « froid ».

- L'échange d'énergie tend vers zéro dans le temps.

- L'échange d'énergie dépend de la taille, de la forme, de l'orientation relative et de l'éloignement des éléments de surface. Ce point fondamental mène directement à la notion de facteur de forme, à l'origine nommé facteur de vue, ou encore facteur géométrique ; ce dernier terme est sans doute le plus exact dans le mesure où les interactions du rayonnement diffus entre deux surfaces dépendent de paramètres géométriques exclusivement, et non pas des caractéristiques intrinsèques des surfaces (réflexion, émission...).

Il semble que l'équation fondamentale de transfert des flux radiatifs entre des surfaces diffuses ait été découverte par le japonais Yamanouti en 1926. Mais l'énorme quantité de calculs nécessaires a fait que la méthode n'a guère été utilisée à cette époque (à l'exception de cas très simples). Elle est finalement quasiment tombée dans l'oubli, pour être « redécouverte » par les thermiciens dans les années cinquante, lors de l'avènement des premiers calculateurs ; pourtant son histoire ne s'arrête pas là puisque la communauté infographique se l'est réappropriée au début des années quatre-vingts, époque à laquelle l'informatique graphique a pris son envol[113].

Les principes qui régissent les échanges radiatifs entre deux ou plusieurs éléments de surface sont schématisés sur la Fig. 167. ; le flux émis uniformément depuis une surface *1* est reçu par chacune des surfaces de l'environnement (y compris *1* elle-même dans l'hypothèse où elle est concave), et donc la surface *2* en particulier (à condition qu'il n'y ait aucune obstruction entre ces deux surfaces). Le flux parvenant sur *2* l'est au prorata du facteur de forme F_{12}, qui traduit la topologie de l'ensemble *1-2* (éloignement et orientation relative de ces deux surfaces).

L'éclairement énergétique de la surface *2* est finalement dû aux flux que lui renvoient toutes les autres surfaces, augmenté du flux E_{02} si la surface en question est radiative ; la partie réfléchie vaut alors $\rho_2 E_2$ et la partie absorbée $\alpha_2 E_2$ (ρ et α étant les coefficients de réflexion et d'absorption de la surface *2* respectivement).

[113] C'est sans conteste cette communauté infographique qui a contribué aux avancées les plus importantes dans le domaine, grâce notamment à la mise au point de nombreuses techniques de calcul numérique susceptibles de traiter des géométries bien plus complexes que celles considérées par l'ingénierie thermique.

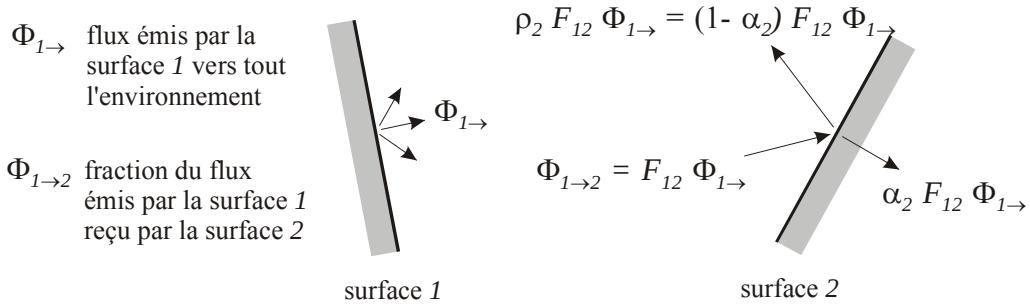


Fig. 167. Principe des échanges radiatifs entre deux éléments de surface opaques *1* et *2*.

L'exitance M (ou la radiosité B) est une quantité tout à fait similaire à l'éclairement énergétique E (exprimé en $W \cdot m^{-2}$) – se reporter aux définitions de ces grandeurs dans l'annexe 1 ; si ce dernier représente le flux *incident* par unité de surface, la radiosité B_i d'un élément de surface i représente au contraire la densité d'énergie (flux par unité de surface également) qui *quitte* cet élément, et est égale à la somme des densités des énergies émises et réfléchies (Fig. 168.).

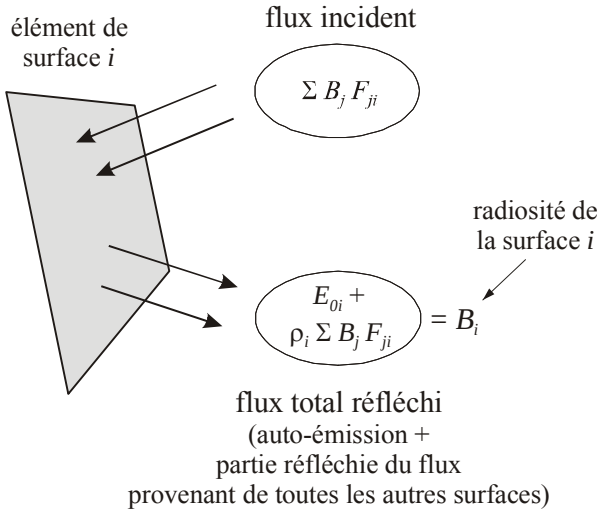


Fig. 168. Bilan radiatif sur un élément de surface i. Sa radiosité est égale à l'émission directe de la surface augmentée de la partie réfléchie de l'irradiation.

7.2.2.2 Mise en équation

Si l'on considère deux éléments de surface *i* et *j*, la radiosité B_i ($W \cdot m^{-2}$) de l'élément *i* s'écrit :

$$B_i \cdot \mathrm{d}A_i = E_{0i} \cdot \mathrm{d}A_i + \rho_i \int_j B_j \cdot \mathrm{d}A_j \cdot F_{\mathrm{d}A_j\,\mathrm{d}A_i} \quad ,$$

qui traduit sous forme algébrique la relation :

radiosité ∗ aire = énergie émise + énergie réfléchie

entre les différentes grandeurs physiques, et dans laquelle :

énergie réfléchie = coefficient de réflexion ∗ énergie incidente en provenance de tous les autres éléments.

où E_{0i} est l'énergie émise par l'élément *i* ($W \cdot m^{-2}$),

ρ_i est le facteur de réflexion de *i* , soit la fraction d'énergie incidente réfléchie dans l'environnement,

et $F_{\mathrm{d}Aj\,\mathrm{d}Ai}$ est le facteur de forme entre les éléments $\mathrm{d}A_j$ et $\mathrm{d}A_i$, où encore la fraction d'énergie quittant $\mathrm{d}A_j$ qui arrive sur $\mathrm{d}A_i$.

Comme on l'a précisé plus haut, le facteur de forme est uniquement fonction des relations géométriques entre les deux éléments, tels que leur distance et leur orientation relatives ; par exemple les échanges seront importants entre deux éléments proches dont les normales sont presque opposées, beaucoup plus faibles si les éléments sont éloignés et leurs normales quasiment colinéaires (Fig. 169.).

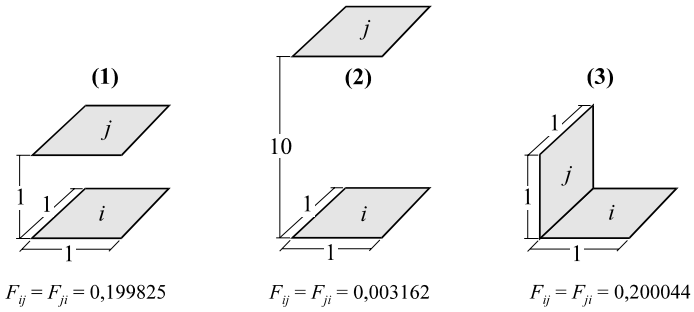


Fig. 169. Quelques exemples de la valeur des facteurs de forme pour des configurations extrêmement simples, calculés à partir de relations analytiques pourtant lourdes et complexes. On peut remarquer que pour un cube *fermé*, la somme des facteurs de forme de l'une des faces avec les 5 autres vaut 4 ∗ 0,200044 + 0,199825 ≈ 1 (voir la section 7.2.2.3.2).

En appliquant l'équation précédente à chaque élément de surface de la scène, on aboutit à un système linéaire comportant *n* équations, *n* étant le nombre d'éléments de la scène discrétisée :

$$B_i \cdot A_i = E_{0i} \cdot A_i + \rho_i \sum_{j=1}^{n} B_j \cdot A_j \cdot F_{A_j A_i}$$

L'égalité précédente n'apportant aucune précision quant au statut des surfaces *i* et *j*, celles-ci sont permutables et il est donc possible d'écrire une relation dite de réciprocité, qui exprime le fait que la notion de facteur de forme est « réversible » à condition de la pondérer par l'aire des surfaces qu'il met en relation – autrement dit que le rapport des aires des surfaces *i* et *j* est inversement proportionnel au rapport des facteurs de forme F_{ij} et F_{ji} :

$$A_i \cdot F_{A_i A_j} = A_j \cdot F_{A_j A_i} \quad \text{ou} \quad A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji}$$

La relation précédente peut ainsi s'écrire sous la forme :

$$B_i \cdot A_i = E_{0i} \cdot A_i + \rho_i \sum_{j=1}^{n} B_j \cdot A_i \cdot F_{ij}$$

Physiquement, cette équation traduit le fait que le flux total $B_i A_i$ (en W) qui quitte un élément de surface A_i dépend du flux émis et du flux réfléchi. Lui-même dépend du flux quittant toutes les autres surfaces de l'environnement puisqu'une fraction de ce flux peut atteindre la surface en question. Cette fraction est directement liée aux facteurs de forme.

La relation de réciprocité permet en outre de simplifier l'égalité précédente par A_i (l'aire A_i intervient cependant dans le calcul des facteurs de forme) :

$$B_i = E_{0i} + \rho_i \sum_{j=1}^{n} B_j \cdot F_{ij} \quad \text{, ou encore} \quad E_{0i} = B_i - \rho_i \sum_{j=1}^{n} B_j \cdot F_{ij}$$

Ce système peut encore s'écrire sous la forme matricielle bien connue :

$$\begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \\ \dots \\ E_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \dots & -\rho_1 F_{1n} \\ -\rho_2 F_{21} & 1-\rho_2 F_{22} & \dots & -\rho_2 F_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\rho_n F_{n1} & -\rho_n F_{n2} & \dots & 1-\rho_n F_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix}$$

qui peut encore se noter, sous forme condensée :

$$[E_0] = [\mathrm{I} - PF][B] \ ,$$

où $[B]$ est le vecteur des radiosités cherchées et $[\mathrm{I} - PF]$ une matrice carrée n x n.

Le vecteur $[E_0]$ représente la valeur initiale de la densité d'énergie pour chacun des éléments de surface. Pour un environnement intérieur (clos), la plupart des E_{0i} sont égaux à 0 ; seuls les éléments de surface émetteurs d'énergie (*i.e.* les sources de lumière ou de chaleur) ne sont pas nuls ; la situation est identique en images de synthèse, où seules les sources de lumière se voient attribuer une valeur non nulle. Dans tous les cas il s'agit bien d'un état initial, tous les éléments de surface qui ne sont pas émetteurs possédant une énergie nulle.

Mais il en va différemment dans le cas d'une scène urbaine qui reçoit l'énergie naturelle du ciel. En observation diurne, aucun élément de surface n'est *a priori* émetteur spontané d'énergie (sauf les luminaires – soleil et ciel – évidemment). On considère alors le système à l'issue de la première réflexion, la valeur initiale émise par chaque élément étant en fait la valeur réfléchie, c'est-à-dire le produit de l'énergie totale reçue du ciel (soleil + voûte céleste) par le coefficient de réflexion de l'élément considéré.

$$E_{0j} = \rho_j \cdot E_j$$

On peut considérer que, le soleil et le ciel constituant les sources d'énergie, le calcul des E_{0j} revient à déterminer les réflexions d'ordre 1, et la méthode des radiosités permet le traitement des réflexions d'ordre supérieur.

On a vu dans les paragraphes précédents que l'énergie E_j reçue par chaque élément de surface de la scène dépendait des modèles de soleil et de ciel (radiance solaire, distribution des luminances sur la voûte céleste), ainsi que d'aspects géométriques (orientation de l'élément de surface en question, présence éventuelle de masque...) ; les coefficients de réflexion ρ_j, fonction des matériaux utilisés, sont une autre donnée du problème. La matrice du système linéaire ne sera donc totalement déterminée qu'après calcul des facteurs de forme, objet de la section qui suit.

7.2.2.3 Détermination des facteurs de forme

7.2.2.3.1 Généralités

Comme on l'a déjà vu plus haut, le facteur de forme entre deux éléments est uniquement fonction des relations géométriques entre ces deux éléments, et plus précisément de leur distance et de leur orientation relative. Le facteur de forme entre les éléments dA_j et dA_i exprime, par rapport à l'énergie totale quittant dA_j , la fraction d'énergie qui quitte dA_j et qui arrive sur dA_i .

Ce quotient peut s'écrire :

$$F_{\mathrm{d}A_i \mathrm{d}A_j} = \frac{\text{Energie qui atteint d}A_j \text{ depuis d}A_i}{\text{Energie totale quittant d}A_i \text{ dans toutes les directions}}$$

L'angle solide sous lequel est vu dA_j depuis dA_i est égal à (Fig. 170.) :

$$\mathrm{d}\omega_{ij} = \cos\phi_j \frac{\mathrm{d}A_j}{r^2}$$

où r est la distance séparant les deux éléments de surface dA_i et dA_j .

Le flux quittant dA_i pour atteindre dA_j vaut :

$$\mathrm{d}E_i \mathrm{d}A_i = I_i \cos\phi_i \, \mathrm{d}\omega_{ij} \, \mathrm{d}A_i = I_i \cos\phi_i \cos\phi_j \, \mathrm{d}A_i \frac{\mathrm{d}A_j}{r^2}$$

Le flux total quittant dA_i est obtenu par intégration sur l'hémisphère centré en dA_i. La surface obéissant, par hypothèse, à la loi de Lambert (intensité indépendante de la direction), ce flux vaut :

$$E_i \mathrm{d}A_i = \pi \cdot I_i \mathrm{d}A_i$$

On obtient finalement :

$$F_{\mathrm{d}A_i \mathrm{d}A_j} = \frac{\mathrm{d}E_i \, \mathrm{d}A_i}{E_i \, \mathrm{d}A_i} = \frac{\cos\phi_i \cos\phi_j \, \mathrm{d}A_j}{\pi \cdot r^2}$$

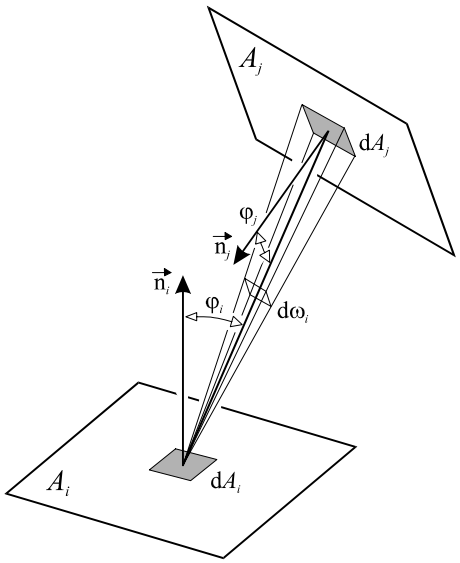


Fig. 170. Géométrie des facteurs de forme entre deux éléments d'aire infinitésimale.

Le facteur de forme depuis dA_i vers l'élément A_j est obtenu par intégration sur l'aire A_j :

$$F_{\mathrm{d}A_i A_j} = \int_{A_j} \frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{\pi \cdot r^2} \, \mathrm{d}A_j$$

Par une nouvelle intégration sur l'élément de surface A_i et en prenant la moyenne sur cet élément, on obtient l'expression du facteur de forme d'élément à élément :

$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{\pi \cdot r^2} \, \mathrm{d}A_i \, \mathrm{d}A_j \qquad \text{(équation 1)}$$

Malheureusement le calcul analytique de cette intégrale double est d'une manière générale extrêmement complexe ; de plus le nombre très important de facteurs de forme à calculer (n^2 si la scène est discrétisée en n éléments) suggère la recherche de simplifications éventuelles dans le calcul lui-même, mais aussi une réduction de la quantité de facteurs à déterminer.

Il faut enfin remarquer que l'expression précédente des $F_{A_i A_j}$ ne tient pas compte des obstructions ; en réalité, le facteur de forme de l'élément i à l'élément j s'écrira plutôt :

$$F_{ij} = v_{ij} \cdot F_{A_i A_j} \ ,$$

v_{ij} étant la fonction de visibilité entre ces deux éléments. À noter que celle-ci était calculée de centre de gravité à centre de gravité lorsqu'il s'agissait de déterminer, à partir d'un élément de surface de la scène (un point donc), la visibilité des éléments de ciel ; cette approximation devient trop grossière ici, et le calcul est en fait effectué de point à surface, avec prise en compte des obstructions partielles éventuelles (dans le cas d'une visibilité partielle, c'est la partie vue de l'élément qui est prise en compte lors du calcul des facteurs de forme).

7.2.2.3.2 Simplifications

La complexité des calculs et leur nombre fait de la détermination des facteurs de forme l'opération de loin la plus longue de tous les traitements qui ont été décrits jusqu'alors. Les deux remarques qui suivent permettent de réduire leur nombre de moitié environ :

- Si l'élément i est une surface plane ou convexe, aucun flux en provenance de lui-même ne peut l'atteindre directement : les facteurs de forme F_{ii} sont donc tous nuls. Cette configuration est toujours possible à réaliser, surtout dans un environnement urbain où la prise en compte des phénomènes thermiques par exemple ne nécessite pas un niveau de détail très élevé (encore une fois il ne s'agit pas ici d'image photoréaliste). Par extension deux éléments quelconques appartenant à une même surface plane n'échangent aucun flux (et les morphologies urbaines comportent de très nombreuses surfaces planes) :

$F_{kl} = 0$ si $k \in S$ et $l \in S$, S surface plane.

- La relation de réciprocité permet de n'évaluer que $n(n-1)/2 \approx n^2/2$, soit la moitié des facteurs de forme seulement, en utilisant la relation suivante – qui suppose le calcul préalable de l'aire de chaque élément de surface (cette simplification n'est pas mise en place pour l'instant dans SOLENE) :

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

- À condition de se situer dans *une enceinte close*, tout élément *i* vérifie la somme suivante :

$$\sum_{j=1}^{n} F_{ij} = 1$$

Cette relation traduit la conservation de l'énergie dans l'environnement clos : toute l'énergie qui quitte une surface est nécessairement interceptée par les autres éléments de surface de la scène – la totalité d'entre eux ou une partie seulement, selon les occultations (voir la Fig. 168.).

Le problème est évidemment très différent dans un environnement urbain (ou dans un local ouvert sur l'extérieur), car une partie de l'énergie réfléchie dans toutes les directions, depuis une façade ou un toit par exemple, l'est dans la direction du ciel. Cette énergie est donc perdue par l'ensemble du système et par suite la somme des facteurs de forme devient inférieure à 1 ; autrement dit il faut fermer la scène par une surface fictive pour assurer la complémentarité des facteurs de forme.

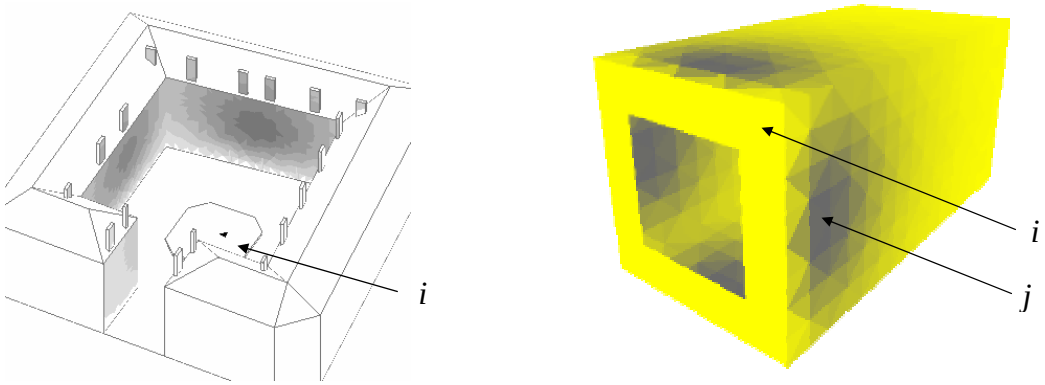


Fig. 171. À gauche cartographie des échanges radiatifs possibles pour un élément de surface particulier *i*, après calcul des facteurs de forme.
À droite, cartographie de la somme des facteurs de formes dans un local ouvert sur l'extérieur (il s'agit bien de la face interne des éléments de surface).
L'énergie de l'élément *i* sera distribuée à tous les autres (la somme des facteurs de forme est égale à 1), par contre une partie de l'énergie de *j* sera perdue vers l'extérieur (15 % environ pour cet élément).

Finalement la sommation des facteurs de forme quantifie, pour un élément *i*, l'importance de sa relation avec tous les autres éléments de surface de la scène (en termes de visibilité bien sûr, mais également en termes d'orientation relative et d'éloignement). Plus cette somme sera proche de 1, plus l'élément en question sera susceptible d'échanger de l'énergie avec les autres. La figure ci-dessus (Fig. 171.) montre, après calcul des facteurs de forme, une cartographie des échanges radiatifs possibles, indépendamment du coefficient de réflexion des surfaces et de leur énergie initiale (voir le paragraphe suivant pour les techniques de calcul concernant ces facteurs de forme).

7.2.2.3.3 Méthodes de calcul

Une littérature abondante traite de ce sujet, depuis les abaques qu'utilisaient les thermiciens (Fig. 172.) jusqu'aux techniques spécifiquement adaptées et optimisées pour le calcul numérique.

On peut globalement les scinder en deux groupes : les méthodes analytiques et les méthodes numériques ; les premières donnent une solution exacte mais ne tiennent pas compte des obstructions alors que les secondes fournissent une solution approchée tout en tenant compte des visibilités.

Elles s'emploient toutes à proposer des techniques permettant d'accélérer la détermination de ces facteurs de forme, soit en diminuant leur nombre (on ne calcule pas ceux dont leur valeur relative est assurément très faible), soit en simplifiant les calculs en considérant un élément de surface parfaitement diffus comme une source ponctuelle (approximation valable sous certaines conditions à vérifier), ou encore en utilisant des artifices géométriques bien adaptés aux techniques numériques.

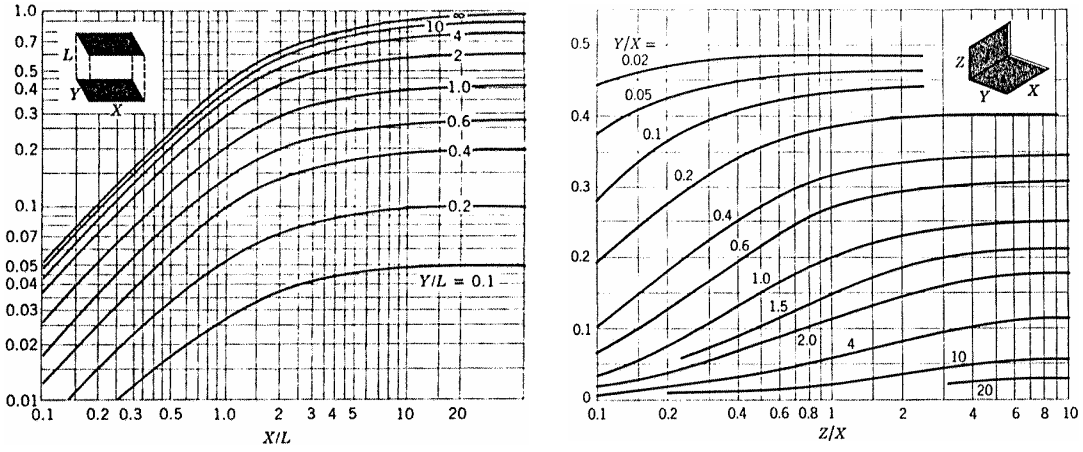


Fig. 172. Exemples d'abaques pour la détermination des facteurs de forme.
Cas (très simples) de surfaces rectangulaires orthogonales ou parallèles.

Il s'agit finalement de trouver un compromis entre la précision des calculs et leur rapidité d'exécution, alternative classique dans toutes les techniques de simulation qui font appel à la discrétisation de l'espace ou/et du temps (et qui conduisent en général à une quantité de calculs très importante).

Il n'est pas question de développer ici chacune de ces méthodes dans le détail, mais plutôt de montrer, pour les plus utilisées d'entre elles, leurs particularités et leur domaine d'application, pour finalement préciser davantage la méthode retenue.

- L'hémicube

Cette méthode a vu le jour en 1985 à l'université de Cornell et est devenu aujourd'hui la technique sans doute la plus utilisée en imagerie de synthèse. La méthode est efficace mais elle ne fournit qu'une solution approchée. De plus l'émetteur est modélisé comme une surface infinitésimale et le facteur de forme est donc calculé d'un point vers un polygone (cette approximation n'est valable que sous certaines conditions, décrites à la fin de la section 7.2.2.3.3 *Intégration sur un contour*).

La principale remarque qui justifie son utilisation est l'analogie de Nusselt (explicitée en 1928). Comme on peut l'observer sur la Fig. 173. (à gauche), les facteurs de forme de l'élément de surface dE_i vers les surfaces E_h, , E_k, et E_j sont identiques, et aussi équivalents à la fraction d'aire du disque unité obtenue après une double projection (A_i/π sur la figure) : la première consiste à projeter l'élément sur la surface de l'hémisphère et la seconde à effectuer une projection orthographique de la surface obtenue précédemment sur le disque de base. Cette propriété se démontre facilement par projection de l'angle solide.

Ainsi le facteur de forme F_{ij} de l'élément de surface dE_i à la surface E_j est égal à :

$$F_{ij} = \frac{A_j}{\pi}$$

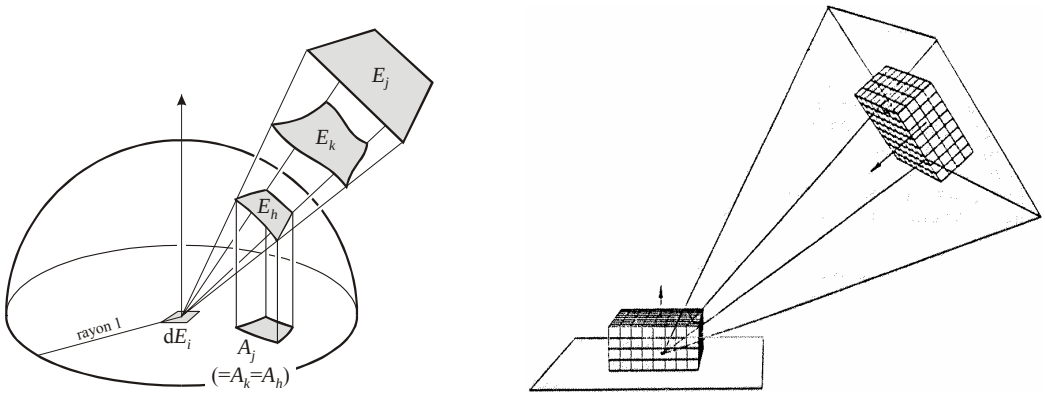


Fig. 173. À gauche, schématisation de l'analogie de Nusselt.
À droite, chaque élément de surface porte son propre hémicube, orienté selon un système de coordonnées local (d'après Cohen et Greenberg).

En conséquence, toutes les surfaces qui ont la même projection sur l'hémisphère auront le même facteur de forme ; autrement dit il est possible de projeter sur une entité géométrique mieux adaptée à une résolution de type numérique (l'hémisphère étant quant à lui mieux adapté à une solution analytique). Il s'agit en l'occurrence d'un demi-cube centré sur chaque élément de surface (chaque hémicube possède donc sa propre orientation – Fig. 173., à droite), dont les faces sont divisées en éléments carrés (la résolution de la face supérieure varie généralement de 32x32 à 1024x1024 carrés en imagerie), chacun d'entre eux définissant une direction et un angle solide, donc un facteur de forme. Ces *delta form factors* peuvent être prédéterminés selon les calculs analytiques exposés ci-dessous, avec les variables de la Fig. 174., puis stockés (1/8 de l'hémicube suffit en raison de la symétrie cubique, soit $3n^2/8$ valeurs à calculer si la face supérieure est divisée en n^2 carrés) ; ce sont précisément ces aspects (prédétermination et stockage) qui constituent l'efficacité de la méthode.

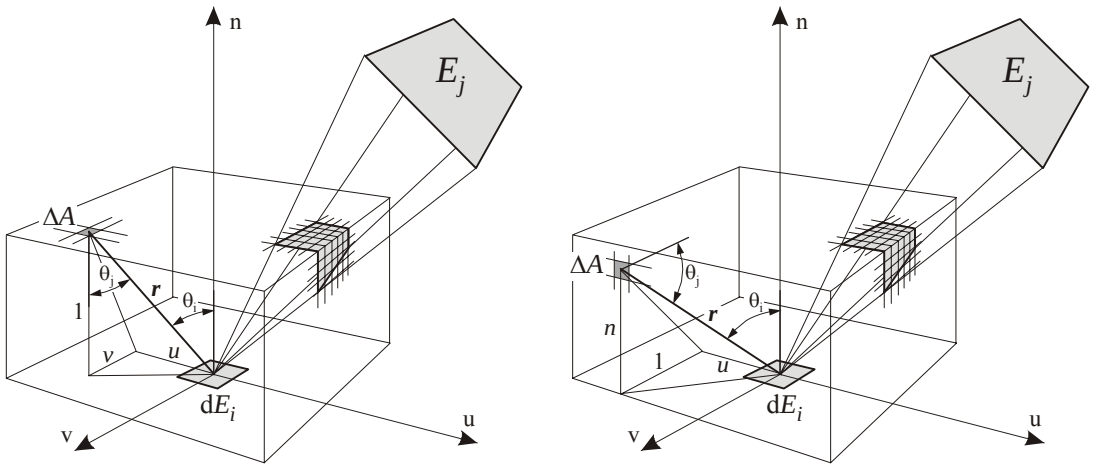


Fig. 174. Le facteur de forme F_{ij} est obtenu en projetant l'élément *j* sur l'hémicube centré en *i*, puis en sommant les différents delta-facteurs de forme. À gauche, aspects géométriques dans le cas d'un élément situé sur la face supérieure de l'hémicube ; à droite, élément situé sur une face latérale.

Si la hauteur de l'hémicube est de 1 unité et la face supérieure un carré de côté 2 unités, on obtient les relations qui suivent :

- pour la face supérieure de l'hémicube :

$$r = \sqrt{u^2 + v^2 + 1} \quad , \quad \cos\theta_i = \cos\theta_j = 1/r \quad \text{et} \quad \Delta F_{dessus} \approx \frac{\Delta A_{dessus}}{\pi \cdot \left(u^2 + v^2 + 1\right)^2}$$

- pour les faces latérales :

$$r = \sqrt{u^2 + n^2 + 1}\ ,\ \cos\theta_i = n/r\ \ ,\ \cos\theta_j = 1/r\ \ \text{et}\ \ \Delta F_{faces} \approx \frac{n \cdot \Delta A_{faces}}{\pi \cdot \left(u^2 + n^2 + 1\right)^2}$$

où ΔA_{dessus} et ΔA_{faces} sont les fractions d'aire de la face supérieure et des faces latérales (l'aire totale valant 4 unités^2).

Après projection de l'élément *j* sur l'hémicube centré en *i*, il reste à sommer les delta-facteurs de forme concernés par cette projection (qu'ils appartiennent à la face supérieure ou aux faces latérales) :

$$F_{dA_i A_j} = \sum \Delta F$$

Malgré son efficacité, la méthode de l'hémicube présente pourtant quelques inconvénients :

- principalement des problèmes de crénelage, sensibles en imagerie surtout, dus à la division régulière de l'hémicube en « pixels ».

- le principe même devient inefficace dans le cas particulier où les deux éléments de surface sont adjacents ou très proches.

- comme le montre la figure ci-dessus, la visibilité de l'élément E_j s'effectue depuis le centre de l'élément E_i ; la méthode est donc considérée comme valable sur toute l'étendue de l'élément de surface, ce qui peut être évidemment faux.

- Intégration sur un contour

Dans la formulation générale relative au calcul des facteurs de forme (équation 1), la double intégrale de surface est remplacée par une intégrale sur les contours des deux polygones qui cernent les surfaces pour lesquelles on cherche le facteur de forme, par utilisation du théorème de Stokes.

On obtient par cette technique :

$$F_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot A_i} \int_{C_j} \int_{C_i} \left[\ln r \cdot \mathrm{d}x_i\, \mathrm{d}x_j + \ln r \cdot \mathrm{d}y_i\, \mathrm{d}y_j + \ln r \cdot \mathrm{d}z_i\, \mathrm{d}z_j \right]$$

où r est la distance entre un segment du contour C_i et un segment du contour C_j ,

et $\mathrm{d}x_i$, $\mathrm{d}y_i$, ... , $\mathrm{d}z_j$ les longueurs des projections des segments.

Bien que cette méthode soit très générale et puisse être appliquée à tout type de polygone (même non plan), elle est extrêmement coûteuse en temps de calcul et donc pratiquement inutilisable.

Nous appliquerons pourtant une technique similaire, mais dans un cas particulier, permettant ainsi de simplifier les calculs et donc d'en réduire les temps d'exécution.

Dans cette approche, le polygone émetteur est considéré comme une surface infinitésimale, c'est-à-dire une source ponctuelle (comme dans le cas de l'hémicube d'ailleurs) ; le facteur de forme est donc calculé d'un point vers un polygone et non pas de polygone à polygone. Il est couramment admis que cette simplification reste valable tant que la distance à la surface réceptrice est supérieure à environ 5 fois la dimension maximale de la surface émettrice projetée. Cette condition est évidemment mise en défaut pour deux éléments de surface adjacents et non coplanaires.

Ce problème peut alors être contourné en subdivisant la surface émettrice en éléments plus petits (la dimension maximale projetée diminue alors), puis en considérant comme facteur de forme global la moyenne des facteurs de forme calculés pour chacun des éléments réduits. La scène étant discrétisée en éléments triangulaires, un triangle émetteur peut ainsi être divisé en 4, 16 ou 64 éléments d'aire égale (figure ci-dessous), selon un principe similaire à celui employé lors de la discrétisation de l'hémisphère céleste. Rien n'empêche *a priori* de diviser davantage, mais l'augmentation de précision se fait évidemment au détriment des temps de calcul. La « règle des 5 fois » permet de limiter l'erreur à 1 % au maximum (Fig. 175.et Fig. 176.). En outre elle ne concerne que les éléments adjacents des angles rentrants et n'est donc guère significative rapportée à la scène dans sa totalité.

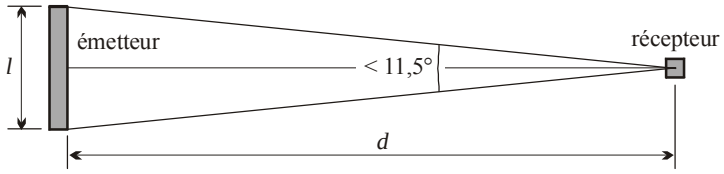
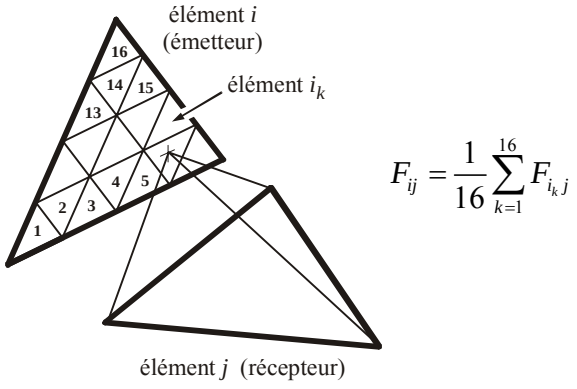


Fig. 175. La subdivision de la surface réceptrice devient nécessaire si d/l devient inférieur à 5 (dessin à l'échelle).



$$F_{ij} = \frac{1}{16}\sum_{k=1}^{16} F_{i_k j}$$

Fig. 176. Principe de subdivision de l'émetteur en 4^n sources ponctuelles (ici 16) pour le calcul du facteur de forme d'une aire élémentaire vers un polygone dans le cas où la distance de l'émetteur au polygone récepteur est inférieure à une valeur prédéfinie.

Cette méthode contraste singulièrement avec les précédentes par sa simplicité. Elle est en effet très facile à mettre en œuvre, mais elle ne prend pas en compte les obstructions, qui doivent donc faire l'objet d'un traitement indépendant. Comme on l'a déjà précisé plus haut, ce problème crucial de détermination des parties cachées est traité par SOLENE (voir la section 7.1.2) et rend donc la méthode d'intégration de contour point-polygone particulièrement bien adaptée au problème traité.

L'expression du facteur de forme, pour un élément A_j totalement visible depuis dA_i (si ce n'est pas le cas, A_j représente la partie visible d'un polygone plus grand) s'écrit, avec les notations de la Fig. 177. :

$$F_{dA_i A_j} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k \cos\alpha_k$$

ou encore

$$F_{dA_i A_j} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k \, \mathrm{n}_i \cdot \left(\overline{R}_k \times \overline{R}_{(k+1)\%n} \right)$$

où β_k est l'angle entre R_k et $R_{(k+1)\%n}$ (en rd),
α_k l'angle que fait le plan défini par R_k et $R_{(k+1)\%n}$ avec le plan contenant dA_i ,
et n_i la normale à dA_i .

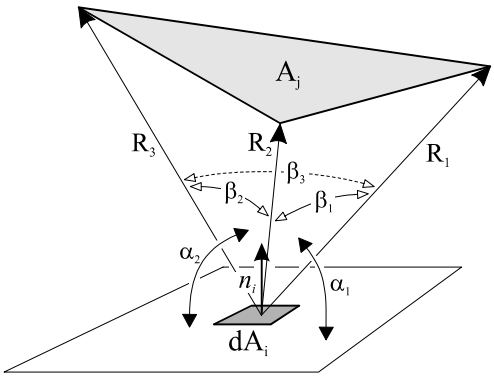


Fig. 177. Calcul du facteur de forme par la méthode d'intégrale de contour, d'aire infinitésimale à polygone.

De manière à situer la précision de la méthode on donne, dans le tableau de la Fig. 179., les valeurs des facteurs de forme pour trois configurations particulières de deux éléments de surface en vis à vis ; les valeurs obtenues par la méthode d'intégration de contour sont comparées au calcul analytique (exact), et le tableau montre clairement que

les performances de cette technique sont excellentes à condition de procéder, si besoin est, à une subdivision de la surface émettrice (situations où la « règle des 5 fois » est transgressée) ; c'est très nettement le cas pour les configurations 1 et 3, où les rapports sont manifestement inférieurs à 1.

Les résultats de ce tableau, même s'ils ne concernent que trois dispositions géométriques particulières, suffisent à montrer que la méthode d'intégration sur un contour est d'une précision suffisante à condition de subdiviser la surface émettrice si la « règle des 5 fois » n'est pas respectée (de cette manière, on s'assure d'une erreur toujours inférieure à 1 %).

Technique de calcul	Configurations (rappel ci-contre)		
	1	2	3
Calcul analytique (valeur exacte)	0,199825	0,003162	0,200044
Intégration de contour (sans subdivision)	0,239456 + 20 %	0,003173 **+ 0,35 %**	0,190136 - 5 %
Intégration de contour (avec subdivision)	0,201041 **+ 0,61 %**	0,003162 0 %	0,199740 **- 0,15 %**

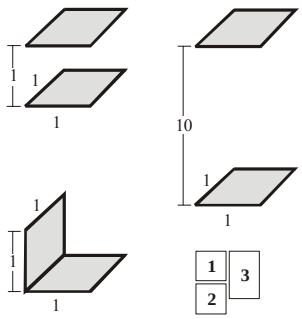


Fig. 178. Valeur du facteur de forme en fonction de la technique de calcul utilisée ; dans le cas d'une subdivision, le carré émetteur de côté 1 x 1 a été partagé en 5 x 5 = 25 éléments d'aire égale de manière à satisfaire (mais sans plus) aux conditions précisées dans le texte.

- Autres méthodes

Il ne s'agit évidemment pas d'être exhaustif en ce qui concerne les différentes techniques permettant la détermination des facteurs de forme, mais d'autres méritent pourtant d'être mentionnées. Certaines ne sont que des variantes de l'hémicube, d'autres approches sont totalement différentes :

- Variantes de l'hémicube : L'une d'entre elles consiste à projeter sur un tétraèdre trirectangle pour palier les problèmes de dissymétrie de l'hémicube (Fig. 179. (a)), ou encore projection sur un plan unique, c'est-à-dire sur la face supérieure de l'hémicube (Sillion [71]), en arguant du fait que si le plan est de dimension suffisante, la valeur des facteurs de forme « oubliés » près de l'horizon peut être considérée comme négligeable. Puech et Sillion ont montré que l'approximation devient valable si le rapport *S/H* est supérieur à une valeur de l'ordre de 28 (Fig. 179. (b)) ; l'erreur ne dépasse pas 1 % dans ce cas. De plus les pixels employés par Sillion ne sont pas de même taille (contrairement à la figure), mais sont tels que leurs fac-

teurs de forme restent à peu près identiques (il sont alors dénommés *proxels*). L'avantage de la méthode est d'économiser 4 projections perspectives et de simplifier le calcul des delta-facteurs de forme ; en effet la contribution de chaque carreau étant identique, on a :

$$F_q \approx \frac{1}{N^2}$$

où N^2 est la résolution de la surface en proxels.

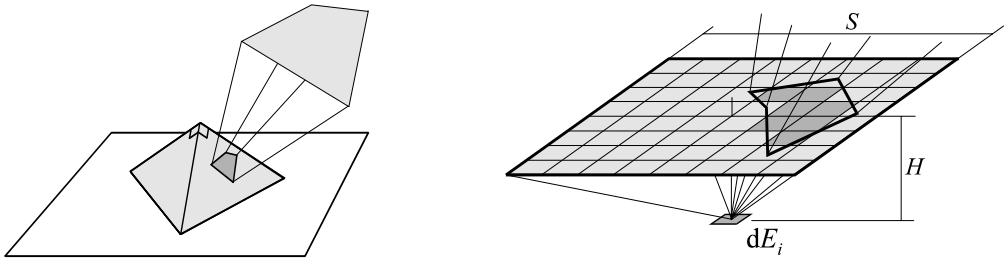


Fig. 179. Projections sur un tétraèdre cubique (1) et sur un plan unique (2).

- Calcul par une méthode de lancer aléatoire de rayons (de type Monte Carlo).

- Méthode Wallace et *al*. (1989) qui calcule le facteur de forme « point vers source », la source étant subdivisée en éléments suffisamment petits pour que leur dimension maximale reste inférieure à la distance qui les sépare du point visé. Il serait alors possible d'utiliser l'intégration de contour, mais Wallace et *al*. proposent de considérer chaque élément de surface comme un *disque* orienté. Cette approximation est valable à condition que la discrétisation produise des éléments de type triangle équilatéral ou bien carré (ou tout au moins des triangles ou des rectangles pas trop « allongés », c'est-à-dire tels que les côtés successifs soient de longueur sensiblement égale).

  L'expression analytique du facteur de forme d'un élément infinitésimal dE_j parallèle à un disque d'aire finie E_i s'écrit (Fig. 180.) :

$$F_{\mathrm{d}E_j E_i} = \frac{a^2}{r^2 + a^2} \quad \text{ou} \quad F_{E_i \mathrm{d}E_j} = \frac{\mathrm{d}A_j}{\pi \cdot r^2 + A_i}$$

où dA_j est l'aire de l'élément infinitésimal dE_j ,
A_i l'aire de l'élément source,
et r la distance entre dE_j et E_i .

En généralisant la relation précédente, en incluant les angles entre les normales et enfin en usant de la relation de réciprocité, on obtient finalement :

$$F_{ji} \approx \frac{A_i}{n} \sum_{k=1}^{n} v_k \frac{\cos\phi_{ik} \cos\phi_{jk}}{\pi \cdot r_k^{\,2} + A_i / n}$$

où n est le nombre d'éléments de la source,

et v_k la fonction de visibilité entre E_i et le $k^{ième}$ élément de dE_j (1 ou 0 selon que cet élément est ou n'est pas visible depuis E_i).

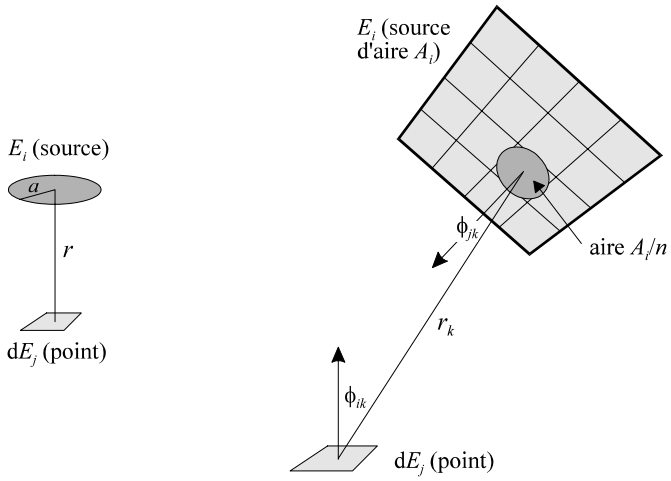


Fig. 180. Principe et géométrie du calcul des facteurs de forme selon la méthode « point vers source ».

Le principal avantage de cette technique est de palier les défauts déjà cités à propos de l'hémicube, mais encore une fois, cette solution n'est qu'approchée dans la mesure où chaque élément polygonal est remplacé par un disque d'aire identique.

7.2.2.3.4 Conclusion

Il est bien évident que chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients... Ils sont la plupart du temps extrêmement ponctuels, c'est-à-dire qu'ils ne concernent que certaines dispositions géométriques particulières, ou bien alors la précision de la méthode chute brutalement si certaines conditions ne sont pas respectées... C'est pourquoi des solutions hybrides, qui tentent de cumuler les avantages respectifs de plusieurs de ces méthodes, ont déjà été envisagées : par exemple Baum et *al.* [4] préconisent l'emploi de l'hémicube pour la détermination de la plupart des facteurs de forme et l'utilisation d'une solution analytique dans le cas où l'hémicube devient trop imprécis

(éléments de surface adjacents ou très proches, surfaces sources de lumière, l'hémicube ne servant plus alors qu'à la détermination de la visibilité).

Il est clair que notre propos n'étant pas la production d'images photo-réalistes, la précision obtenue par la méthode d'intégration sur les contours est largement suffisante (aucun lissage ultérieur, de type Gouraud par exemple, n'est effectué sur les éléments de surface, dont l'éclairement est identique sur toute leur étendue). De toutes manières, compte tenu de la structure même de l'ensemble logiciel, il est tout à fait possible de changer la procédure de calcul des facteurs de forme sans affecter en quoi que ce soit les autres éléments entrant dans la chaîne de simulation ; en effet leur calcul est autonome, indépendant de tout processus de simulation.

7.2.2.4 Solution du système d'équations linéaires des radiosités

Là encore, une littérature importante traite des différentes techniques de résolution des systèmes d'équations linéaires, de leur complexité et des problèmes de convergence.

Le problème majeur réside essentiellement dans la taille de la matrice des facteurs de forme, une scène urbaine discrétisée en plusieurs dizaine de milliers éléments n'ayant rien d'extraordinaire...

7.2.2.4.1 Résolution directe

Une résolution classique par la méthode de Gauss est évidemment impossible à envisager en raison de la taille de la matrice !

Une autre possibilité réside dans la méthode itérative de Jacobi, qui décompose la matrice en sous-matrices diagonales, ou dans une variante, la méthode de Gauss-Siedel, qui présente l'avantage de converger plus rapidement vers la solution. C'est cette dernière qui a été privilégiée par la communauté infographique dans les premiers temps où la radiosité a été utilisée comme technique de réalisation d'images photo-réalistes.

7.2.2.4.2 Méthodes Gauss-Seidel

Cette méthode itérative converge en résolvant le système $B_i = E_{0i} + \rho_i \sum_{j=1}^{n} B_j \cdot F_{ij}$ colonne après colonne. Le traitement de la $i^{\text{ème}}$ colonne donne une estimation de la radiosité de l'élément *i* qui est basée sur l'estimation de la radiosité courante de tous les autres éléments de surface de l'environnement.

Physiquement, le principe revient à sommer, pour un élément donné, les contributions, en termes de flux, de tous les autres éléments de la scène vis-à-vis de l'élément considé-

ré ; un élément *reçoit* de tous les autres. La contribution d'un élément quelconque *j* au calcul de la radiosité de l'élément *i* s'écrit :

$$\Delta B_i = \rho_i B_j F_{ij}$$

Une itération consiste donc, pour l'élément *i*, à collecter les radiosités en provenance de tous les éléments *j* de l'environnement, multipliées par les valeurs du coefficient de réflexion ρ_i et des facteurs de forme F_{ij}. Cela implique qu'à chaque pas de calcul (à chaque ligne du système matriciel), un seul élément de surface voit sa valeur calculée (et de manière définitive pour cette itération) ; ce qui signifie également que tous les éléments sont traités de manière similaire (il ont tous le même « poids »), même s'ils ne reçoivent que très peu d'énergie de l'environnement. Enfin autre inconvénient notable, doubler le nombre d'éléments revient à quadrupler les temps de calculs puisque les complexités spatiales et temporelles sont en $\mathbf{O}(n^2)$.

7.2.2.4.3 Méthode à raffinement progressif

La méthode à raffinement progressif, due à Cohen et *al.* (1988) [10], est sans doute l'une des améliorations les plus importantes apportées à la méthode de radiosité depuis son introduction dans le champ de l'infographie ; cette méthode itérative présente en effet plusieurs avantages conjoints :

- Elle ne nécessite plus le pré-calcul ni le stockage des facteurs de forme (intéressant en imagerie).

- La méthode permet d'obtenir rapidement une approximation de la solution finale et réduit ainsi le *feedback* si certains paramètres de la scène sont à modifier. Contrairement au lancer de rayons, la résolution spatiale reste constante et seuls les calculs d'éclairement deviennent plus précis.

- Doubler le nombre d'éléments ne fait que doubler les temps de calculs (complexités spatiale et temporelle en $\mathbf{O}(n)$).

Ces avantages sont obtenus grâce à une réorganisation de l'algorithme de radiosité traditionnel ; grossièrement l'approche de type Gauss-Seidel est conservée, mais une modification de l'ordre des opérations au cours du cycle d'itérations permet d'obtenir une bonne approximation de la solution dès les premiers pas de calcul[114] (voir à ce propos la Fig. 184.).

[114] Même si la méthode à raffinement progressif apporte une convergence plus rapide lors des premières itérations, sa convergence « globale » (c'est-à-dire vers un seuil infinitésimal) n'est pas plus rapide qu'une méthode Gauss-Siedel.

Le point de départ de la méthode consiste en quelque sorte à mettre en évidence la notion de réversibilité dans les transferts d'énergie ; l'équation traditionnelle montre que la contribution de l'élément *j* à la radiosité de l'élément *i* s'écrit à l'aide du terme unique :

$$\Delta B_i = \rho_i B_j F_{ij}$$

Inversement donc, la contribution de l'élément *i* à la radiosité de l'élément *j* s'écrira sous la forme :

$$\Delta B_j = \rho_j B_i F_{ji}$$

Mais s'agissant de déterminer la contribution de *i* à l'ensemble des éléments *j* de l'environnement, il est intéressant de ne calculer que les *n* facteurs de forme F_{ij} concernés (*i* fixé, *j* variant) ; le passage aux F_{ji} s'effectue *via* la relation de réciprocité, et l'équation précédente peut ainsi s'écrire :

$$\Delta B_j = \rho_j B_i F_{ij} \frac{A_i}{A_j}$$

Cette relation est vérifiée pour tous les éléments de surface *j*, et elle permet ainsi de calculer la contribution d'un élément *i* vis à vis de tous les autres éléments *j* de l'environnement. À chaque itération, tous les éléments de surface *j* voient simultanément leur radiosité augmentée d'une fraction du flux distribué par l'élément *i* (cette fraction dépendant du coefficient de réflexion et du facteur de forme F_{ij}). En plus, de manière à ce que la contribution de cet élément *i* soit significative au sein de l'environnement, il est évidemment habile de sélectionner en premier lieu ceux qui ont le flux maximum à distribuer : les luminaires seront ainsi les premiers choisis ; par contre certains éléments pourront très bien n'avoir jamais été sélectionnés au terme du processus, puisque celui-ci est en fait stoppé dès que les échanges deviennent insignifiants.

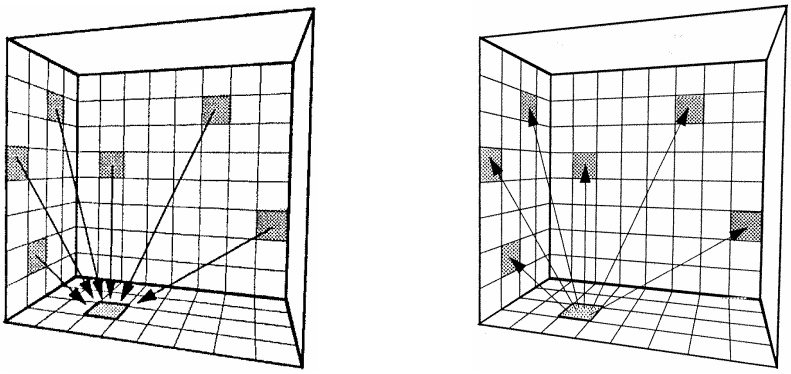


Fig. 181. Traduction graphique de la différence d'approche entre la méthode de résolution « classique » (Gauss-Siedel) à gauche, et la méthode à raffinement progressif à droite (d'après Cohen et Wallace, *Radiosity and Realistic Image Synthesis* [10]).

À noter que l'utilisation de la relation de réciprocité est susceptible de poser problème dans le cas où les aires des éléments émetteur et récepteur sont très différentes. En effet la valeur de F_{ij} a été obtenue en considérant l'élément *i* comme un point ; or si l'aire de l'élément *j* est beaucoup plus grande que celle de *i*, F_{ji} peut dépasser l'unité (ce qui signifie que *j* reçoit plus de flux que *i* n'en a distribué dans tout l'environnement !). L'une des solutions consiste à s'assurer que l'éventail des surfaces n'est pas trop important, ce qui est le cas ici compte tenu du mode de discrétisation choisi ; une solution complémentaire, également implémentée, consiste à limiter la valeur du facteur de forme réciproque $F_{ij} A_i/A_j$ à 1.

Le pseudo-code de l'algorithme à raffinement progressif, maintenant classique en imagerie, s'écrit de la manière suivante :

Initialisation

Pour chaque élément de surface *i*

$B_i = \Delta B_i = E_{0i}$

Solution

Tant que $\sum_{i=1}^{n} \Delta B_i A_i > \varepsilon$ (critère de convergence)

Sélectionner l'élément *i* qui doit distribuer le flux maximum, c'est-à-dire choisir le $\Delta B_i A_i$ maximum

Calculer les facteurs de forme F_{ij}

Pour chaque élément de surface *j*

Déterminer l'accroissement de radiosité de l'élément *j* dû à ΔB_i :

$$\Delta Rad = \rho_j F_{ij} \Delta B_i \frac{A_i}{A_j}$$

Actualiser la différence ΔB_j :

$\Delta B_j = \Delta B_j + \Delta Rad$

Actualiser la radiosité totale de l'élément *j* :

$B_j = B_j + \Delta Rad$

$\Delta B_i = 0$

Afficher éventuellement l'image avec B_i comme intensité pour l'élément *i*

Fin Tant que

Fin Pour

Cet algorithme peut physiquement être interprété comme suit (voir la Fig. 182.) :

Tous les éléments i possèdent une valeur B_i, qui représente la radiosité calculée jusqu'alors pour cet élément ; ils se voient également attribuer, en plus, une valeur ΔB_i qui est la fraction de radiosité de cet élément qui doit encore être distribuée dans l'environnement (cette valeur est nulle si l'élément ne reçoit aucun éclairement direct du soleil ou de la voûte céleste). À chaque itération est sélectionné l'élément pour lequel le flux à répartir (c'est-à-dire le produit de la fraction de radiosité ΔB_i par l'aire A_i de l'élément) est maximal, et ce flux est distribué dans l'environnement. Tous les autres éléments j reçoivent donc (à moins d'obstructions) une nouvelle radiosité ΔRad qui est ajoutée à la radiosité existante B_j ; ΔRad est également ajoutée à la fraction non distribuée ΔB_j de l'élément j en question puisque cette radiosité nouvellement reçue devra à son tour être répartie dans l'environnement (ΔB_j représente la différence entre les estimations précédente et actuelle de B_j ; au fil des itérations, ΔB_j diminue et B_j converge vers sa valeur finale). Au terme de l'itération, la quantité que doit distribuer l'élément i sélectionné au départ est rendue nulle ($\Delta B_i = 0$) ; la radiosité de l'élément i est ainsi toujours égale à B_i – elle n'a en effet aucune raison de changer puisqu'au cours de cette itération, l'élément i n'a reçu aucune énergie de la part de l'environnement ; par contre ce même élément pourra en distribuer à nouveau s'il cumule plus de flux que les autres éléments au cours des itérations suivantes.

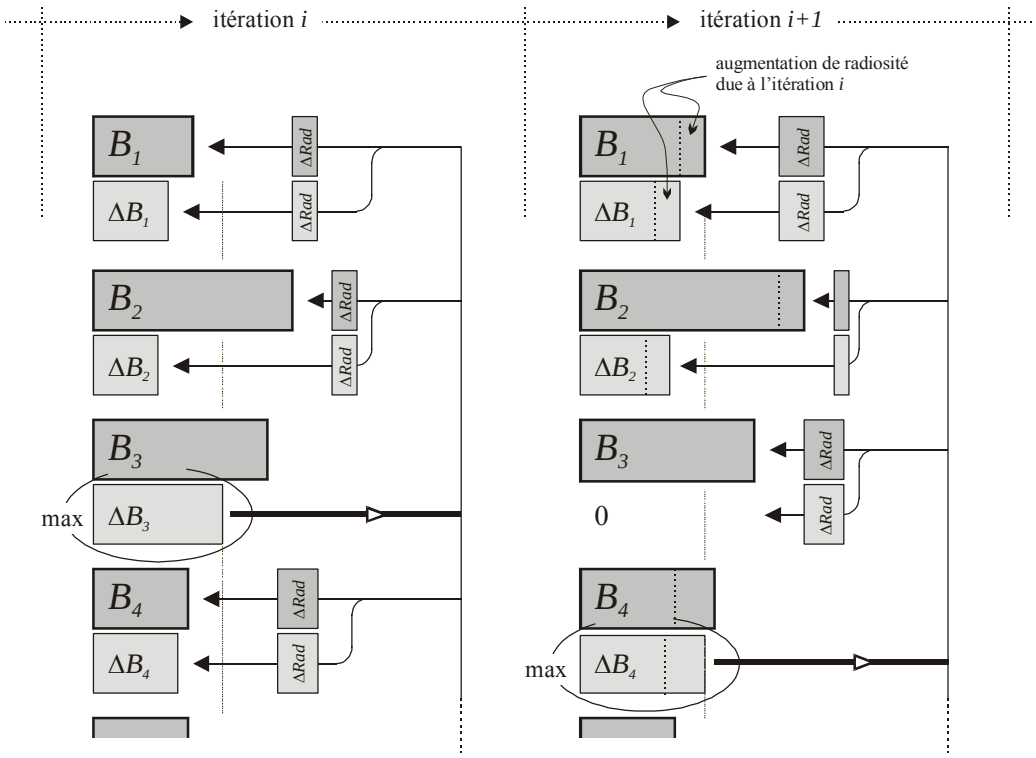
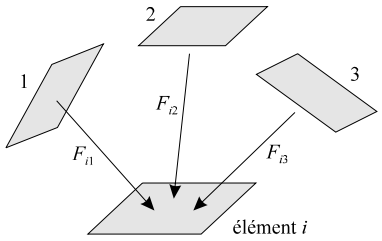
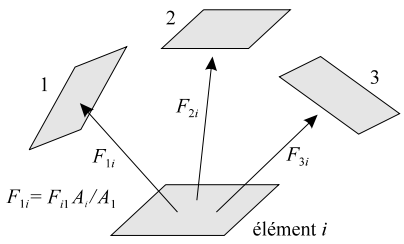


Fig. 182. Diagramme synthétique de l'algorithme à raffinement progressif :
À l'itération i, c'est par exemple l'élément 3 qui possède la plus grande quantité de flux à distribuer (ΔB_3) ;
il va la distribuer à tous les autres éléments de la scène (à condition qu'il n'y ait pas d'obstructions), au prorata des facteurs de forme F_{3j}, des coefficients de réflexion ρ_j et des aires A_3 et A_j ; en fin d'itération ΔB_3 est remis à 0.

Le processus consiste donc, pour chaque itération, à sélectionner l'élément qui possède le flux maximum et à répartir ce flux sur tous les autres éléments, au prorata des facteurs de forme concernés ; ceux-ci constituent une colonne de la matrice générale, et ils pourront donc être calculés « à la volée ». Un élément *distribue* vers tous les autres, et par conséquent, la radiosité de tous les éléments de surface est modifiée à chaque itération (à moins d'obstructions, chacun d'eux pourra encore recevoir dans une prochaine itération). Le processus se poursuit jusqu'à ce que le flux restant à distribuer devienne inférieur à un seuil ε défini par l'utilisateur (ou à une fraction du flux qui était à distribuer lors de la première itération) ; il peut également être stoppé en limitant le nombre d'itérations, sans critère de convergence particulier (mais dans ce cas il est préférable de comparer le flux qui reste à répartir au flux distribué lors de la première itération).



$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_i \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \\ \dots \\ E_{0i} \\ \dots \\ E_{0n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} & & & & \\ \rho_i F_{i1} & \dots & \rho_i F_{i2} & \dots & \rho_i F_{in} \\ & & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_i \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix}^{nouveau} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix}^{ancien} + \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ B_i \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dots & \rho_1 F_{1i} & \dots \\ \dots & \rho_2 F_{2i} & \dots \\ & & \\ & & \\ & & \\ \dots & \rho_n F_{ni} & \dots \end{bmatrix}$$

Fig. 183. Comparaison des principes de résolution de la matrice de radiosité :
méthode standard en haut (la radiosité de l'élément *i* est basée sur l'estimation actuelle des autres éléments),
raffinement progressif en bas (la contribution de l'élément *i* est distribuée à tous les autres éléments de la scène).

7.2.3 Remarques complémentaires

7.2.3.1 Vitesse de convergence

Le graphique ci-dessous donne une idée de la vitesse de convergence des différentes méthodes en fonction du nombre d'itérations. Il est manifeste que la méthode à raffinement progressif est beaucoup plus intéressante qu'une banale Gauss-Siedel. On note sur ce graphique qu'il est possible d'accélérer encore le traitement en rajoutant un terme d' « ambiance » à la méthode à raffinement progressif.

Mais cet artifice de calcul concerne avant tout l'infographie, où les facteurs de forme sont en général calculés « à la volée », c'est-à-dire à chaque fois qu'ils sont appelés par la solution itérative. L'ajout du terme d'ambiance a pour seul objet une visualisation de la scène dès les premiers pas de calcul ; à ce moment peu de surfaces ont distribué leur énergie, laissant la scène extrêmement sombre, avec peu d'éléments discernables. Ce terme d'*ambiance* consiste en une approximation grossière de l'énergie qui n'a pas encore été prise en compte dans le calcul de la solution (qui n'a pas encore été distribuée). Il remplace finalement une quantité d'énergie inconnue provenant de directions inconnues par une énergie constante en provenance de toutes les directions ; en pratique il est basé sur des approximations concernant les facteurs de forme, les radiosités et le facteur de réflexion moyen de l'environnement dans son ensemble. Le terme en question n'est là que pour des commodités de visualisation, et il n'entre pas dans le calcul de la solution ; d'ailleurs sa valeur tend rapidement vers zéro au fur et à mesure que l'on se rapproche de la convergence (Fig. 184.).

En ce qui nous concerne, l'ajout de ce terme n'apporte rien puisque la plupart du temps, les facteurs de forme sont pré-calculés (voir le § suivant). La solution à raffinement progressif est de ce fait extrêmement rapide (quelques minutes pour 5000 éléments de surface, soit une matrice de facteur de forme comportant 25 millions de termes).

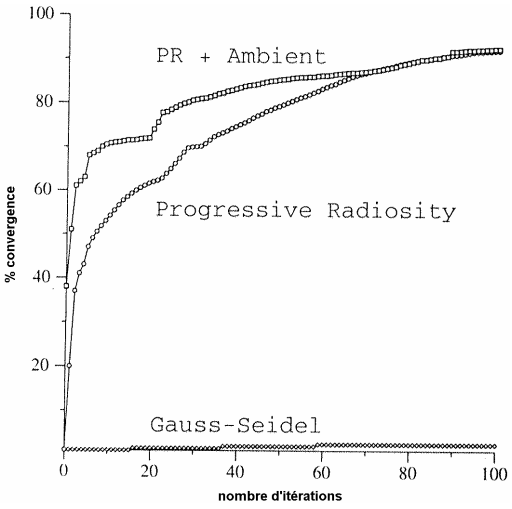


Fig. 184. Comparaison de la convergence des différentes méthodes, en fonction du nombre d'itérations (d'après Cohen et Wallace, *op. cit.*).

7.2.3.2 Aspects technologiques

Bien que les équations de transfert radiatif et l'expression analytique des facteurs de forme soient connues depuis longtemps, et d'ailleurs utilisées de manière simplifiée par les thermiciens depuis les années cinquante, la complexité et la quantité de calculs nécessaires à leur résolution les ont laissés à l'écart de toute velléité d'utilisation dans le domaine de l'éclairement. On peut néanmoins citer, pour l'anecdote, Moon et Spencer qui, dès 1946, montraient des photographies de différents locaux éclairés par un plafond lumineux ; ils avaient calculé manuellement les facteurs de forme entre les éléments de surface, découpé des rectangles de papier dans des chartes de couleur, puis assemblé et collé ces rectangles ; les auteurs présentaient finalement une photographie de l'ensemble ainsi reconstitué...

Ce sont essentiellement les développements de l'informatique et les capacités sans cesse croissantes des machines en termes de vitesse de calcul, de quantité mémoire et de capacité de stockage qui ont rendu ces méthodes utilisables en simulation.

Comme on l'a déjà évoqué, le problème majeur se situe principalement au niveau de la détermination des facteurs de forme (mode de calcul, nombre, stockage éventuel sur disque...). On peut estimer qu'ils représentent à eux seuls, en temps de calculs, plus de 80 % du processus de traitement des multi-réflexions.

On peut envisager leur traitement de plusieurs manières :

- Soit ils sont tous calculés et stockés ; mais pour un environnement comportant par exemple 50000 éléments, chaque facteur de forme étant codé sur 4 octets, l'espace disque nécessaire sera de $50000^2 \cdot 4$ octets, soit une capacité de stockage de 10 Go (5 Go au minimum en tenant compte de la relation de réciprocité), vers les sommets des configurations « courantes » actuelles.

- Dans le cas de l'utilisation de la méthode de résolution à raffinement progressif, ils peuvent être calculés « à la volée », c'est-à-dire qu'à chaque itération seront calculés l*es* *n* facteurs de forme nécessaires (50000 dans l'exemple précédent).

Compte tenu des capacités moyenne de stockage disponibles à l'heure actuelle (20 Go sont maintenant courants), 70000 éléments semblent être un maximum ; au-delà de ce seuil, il devient nécessaire de déterminer les facteurs de forme à chacune des itérations de la méthode à raffinement progressif.

- La première méthode présente l'avantage de résoudre l'algorithme de radiosité extrêmement rapidement (un accès disque par itération pour la lecture des facteurs de forme) ; elle permet ainsi, à partir du moment où la géométrie de la scène est définie, de simuler facilement et très rapidement diverses conditions d'insolation et différents matériaux (plusieurs centaines d'itérations par minute) ; par contre la capacité de stockage limite nécessairement le nombre d'éléments de surface.

- La seconde technique nécessite le calcul de *n* facteurs de forme à chaque itération, sans stockage sur disque. Or l'une des particularités de la méthode à raffinement

progressif est de sélectionner, à chaque pas, l'élément devant distribuer dans l'environnement le flux maximum (il s'agit des sources de lumière en imagerie). Si l'on se place dans le domaine des aspects lumineux, il s'avère que les facteurs de forme d'un élément très masqué par l'environnement ne seront finalement jamais pris en compte, réduisant d'autant les temps de calcul ; cet élément recevra évidemment un peu de flux de la part des autres éléments de la scène, mais il n'aura jamais à en distribuer (il ne contribuera pas à l'éclairement des autres). Par conséquent le calcul de ses facteurs de forme n'est pas nécessaire pour la solution de la matrice des radiosités ; par contre s'il s'agit de cartographier les échanges radiatifs par exemple, la détermination de la totalité des facteurs de forme est cette fois indispensable. On notera finalement que certains aspects de notre recherche présentent parfois des exigences similaires à celles de l'imagerie, mais qu'elles peuvent tout aussi bien être radicalement différentes.

De ces différentes remarques se dégage le processus adopté ici en ce qui concerne le calcul des facteurs de forme :

- Si le nombre d'éléments n de la scène n'excède pas une valeur prédéfinie (qui dépend de la capacité de stockage – guère au delà de 50000 éléments sans doute), les facteurs de forme sont tous calculés puis stockés, permettant ainsi de réaliser tout calcul ultérieur très rapidement (il suffit de les lire par blocs de n valeurs, de F_{i1} à F_{in} si i est l'élément courant).

- Si au contraire le nombre d'éléments de la scène est supérieur à cette valeur, les facteurs de forme seront calculés à la demande : si i est l'élément courant, il faut calculer les n valeurs F_{i1} à F_{in} . En outre, le nombre de calculs de facteurs de forme à effectuer est égal au nombre d'itérations, en général très inférieur au nombre d'éléments de la scène ; aussi peut-il être intéressant de stocker les valeurs des facteurs de forme – jusqu'à une capacité limite prédéfinie – si l'on doit procéder à plusieurs simulations pour lesquelles ne seront modifiés que les coefficients de réflexion ; en effet le processus itératif réclamera les mêmes facteurs de forme. Par contre si les conditions initiales changent (les valeurs des E_{0i}), le stockage devient inutile puisque le processus ne demandera pas nécessairement les mêmes facteurs de forme (en effet, à la première itération devront être calculés les F_{ij} correspondant à la valeur maximale des $E_{0i}A_i$).

7.2.4 Conclusion

Les remarques effectuées dans les paragraphes précédents ne traitent finalement que de questions relatives aux temps de calcul, problème assez crucial en imagerie numérique à vocation photo-réaliste, où un « rendu » satisfaisant n'est obtenu qu'au prix de nombreuses corrections successives ; ces modifications concernent la géométrie des éléments constitutifs, leur positionnement relatif, les sources de lumière, l'emplacement de la « caméra » (l'observateur) mais aussi et surtout les matériaux et les textures, dont le choix est déterminant pour le « réalisme » de la scène. De multiples rendus (même par-

tiels) sont nécessaires à la vérification de ces choix, et les temps de calcul peuvent devenir rapidement rédhibitoires (d'où l'intérêt du terme d'ambiance (7.2.3.1) qui permet une visualisation rapide de la scène).

On a déjà mentionné que les propos développés ici sont bien éloignés de la production d'images photo-réalistes et qu'ils s'attachent bien davantage à la réalité physique des phénomènes étudiés. Dans ce cas, l'aspect temps de calcul devient moins critique dans la mesure où les allers-retours qui viennent d'être évoqués sont moins nombreux : en fait aucun comme outil d'analyse de l'existant, quelques uns seulement s'il s'agit de tester l'impact d'un dispositif urbain ou architectural particulier vis-à-vis de l'éclairement. Enfin ces trois ou quatre dernières années ont connu un accroissement considérable de la capacité de stockage des disques (dans un facteur 10, voire au-delà), ce qui permet, pour tous les travaux « courants », un stockage des facteurs géométriques et finalement une solution extrêmement rapide du processus de réflexions multiples.

Il faut également garder à l'esprit que les temps de calculs réservés au processus de simulation proprement dit restent le plus souvent nettement inférieurs au temps nécessaire à la modélisation 3D du bâtiment ou du site urbain (et aux ajustements dits « de détail » liés aux problèmes inhérents à la conversion de format), quels que soit d'ailleurs la technique ou le modeleur retenus.

7.3 Réflexion et facteurs optiques des matériaux

Les développements précédents ont supposé que les surfaces se comportaient en diffuseurs parfaits, approximation tout à fait légitime pour de nombreux matériaux de construction (pierres, enduits, etc.). Pourtant l'emploi de plus en plus fréquent de produits verriers réfléchissants, de parements de marbre, de capotage d'aluminium, etc. fait que les réflexions spéculaires sont loin d'être inexistantes dans l'environnement urbain ; et si elles n'affectent pas les aspects thermiques (car en général fugitives, puisque leur occurrence n'a lieu que pour un angle d'incidence bien particulier), les effets lumineux (éblouissement, réflexions parasites, etc.) sont quant à eux bien réels...

La présente section présente les éléments théoriques relatifs aux interactions complexes qui ont lieu entre le rayonnement incident et la surface des matériaux, leur mise en pratique dans SOLENE étant actuellement en cours de réalisation. L'objectif est d'embrasser toute la gamme des matériaux utilisés en architecture, dont le mode de réflexion ne se limite plus au domaine diffus exclusivement ; il s'agit donc de considérer également les réflexions spéculaires ainsi que toutes les modes de réflexion situés entre ces deux extrêmes. L'hypothèse retenue pour ce document a été de ne considérer que les surfaces parfaitement diffuses, simplification légitime dans la mesure où la plupart des matériaux de construction « traditionnels » y souscrivent ; en revanche les produits verriers (autres

que les vitrages clairs), les marbres, les peintures en général, etc. ne se placent pas dans ce cas de figure...

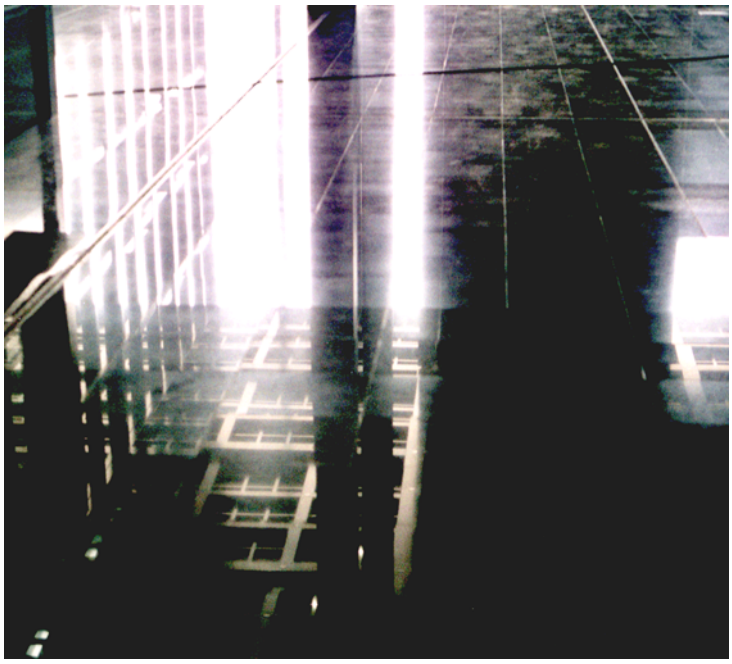


Fig. 185. Réflexion des parois et du plafond sur le sol en marbre (l'effet est saisissant dans la réalité, même si le cadrage de la photographie ci-dessus tend à le renforcer par perte des repères dimensionnels de l'environnement) ; Palais de justice de Nantes, J. Nouvel architecte, 1997-2000.

7.3.1 Principes

Tout objet de l'espace constitue un obstacle plus ou moins important au passage de l'énergie incidente, qu'il s'agisse d'énergie solaire ou de lumière ; le comportement du flux d'énergie après sa rencontre avec la surface de l'objet va dépendre du matériau constitutif de cet objet et de son état de surface. Les facteurs optiques vont caractériser les propriétés de réflexion, de transmission et d'absorption des matériaux vis à vis d'un rayonnement incident ; leur finalité est d'exprimer mathématiquement les interactions complexes rayonnement / matière dans l'infrarouge et le visible. On a vu précédemment que celles-ci restent relativement simples dans l'hypothèse de surfaces parfaitement diffuses (approximation qu'il est possible de faire avec de nombreux matériaux de construction) ; elles deviennent par contre très difficiles à déterminer en dehors de ce cas idéal, car elles vont dépendre de plusieurs facteurs : principalement des paramètres géométriques (direction et angle d'incidence), et des paramètres physiques (longueur d'onde du rayonnement incident, rugosité de la surface du matériau, son indice de réfraction, lui-même fonction de la longueur d'onde...).

Les modèles de réflexion (respectivement de transmission) sont en général présentés sous la forme d'une fonction de distribution bidirectionnelle (*Bidirectional Reflectance Distribution Fonction* ou BRDF, resp. BTDF), qui traduit les modalités de distribution du facteur de réflexion (resp. de transmission) sur une surface élémentaire ; on trouve une description très précise de ces fonctions BRDF et BTDF au *National Bureau of Standards*[115]. Dans la suite, on s'intéressera principalement à la fonction de réflexion puisqu'elle concerne tous les matériaux opaques (les aspects théoriques sont similaires pour la transmission).

Les formulations des pages précédente ont montré que par définition la luminance énergétique « incidente » $L = d^2\Phi / dA \cdot d\omega \cdot \cos\alpha$ (c'est-à-dire arrivant sur une surface élémentaire d'aire *dA* selon une inclinaison α avec sa normale) peut s'écrire, avec les notations de la figure ci-dessous (Fig. 186.), où l'angle avec la normale à la surface s'appelle désormais θ (afin de rester cohérent avec les notations communément utilisées pour les BRDF), et où les indices *i* et *r* concernent les flux incident et réfléchi respectivement :

$$d^2\Phi_i = L_i \cdot \cos\theta_i \cdot d\omega_i \cdot dA = dE_i \cdot dA$$

soit $$d^2\Phi_i = dE_i \cdot dA$$

où dE_i est l'éclairement dû au flux $d\Phi_i$ mesuré au niveau de la surface *dA*,

et $d\omega_i$ l'élément d'angle solide dans la direction (θ_i, φ_i).

Il est maintenant possible de mesurer la luminance énergétique réfléchie par la surface *dA* dans la direction de réflexion (θ_r, φ_r), et considérer que cette luminance ne provient que de l'interaction du flux incident $d\varphi_r$ avec le matériau constituant la surface *dA* (c'est-à-dire qu'il ne possède pas d'émission propre) permet d'écrire la relation de proportionnalité :

$$dL_r = f_r\left(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r\right) \cdot dE_i ,$$

d'où la fonction bidirectionnelle f_r du facteur de distribution de la réflexion (la notation simplifiée de cette réflectance bidirectionnelle est BRDF) ; sa dimension est celle de l'inverse du stéradian :

$$f_r\left(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r\right) = \frac{dL_r}{dE_i} = \frac{dL_r\left(\theta_r, \varphi_r\right)}{L_i\left(\theta_i, \varphi_i\right) \cdot \cos\theta_i \cdot d\omega_i} = \frac{\text{luminance}}{\text{éclairement}} \qquad [\text{sr}^{-1}]$$

[115] National Bureau of Standards, *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*, NBS Monograph 160, Washington, 1977.

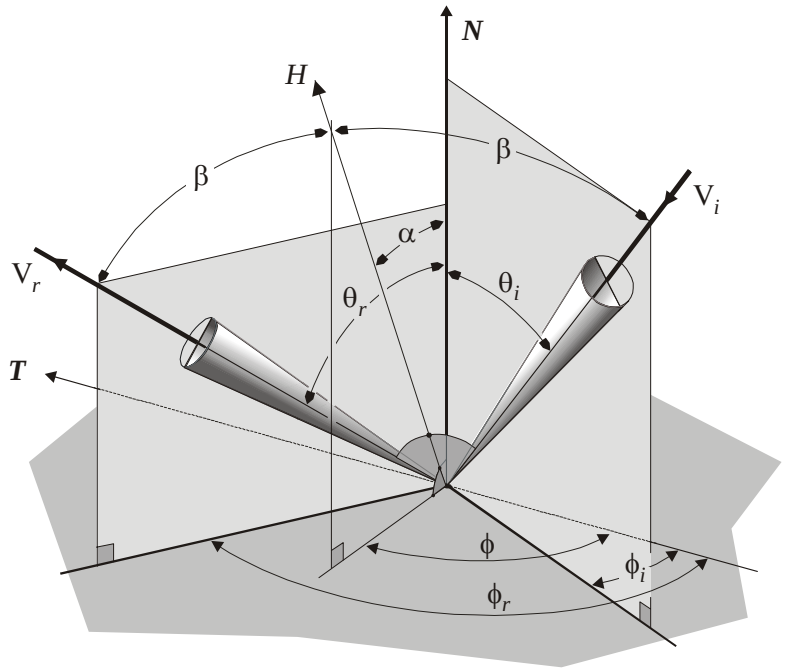


Fig. 186. Les différents éléments géométriques nécessaires au calcul de la fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de réflexion : *N* et *T* respectivement vecteurs normal et tangent à la surface, *H* vecteur bissecteur des directions V_i et V_r.
Le rayon incident V_i est repéré par les angles (θ_i, φ_i), le rayon réfléchi V_r par (θ_r, φ_r).

Dans la mesure où le sens de propagation du rayonnement n'a aucune conséquence sur l'écriture des égalités précédentes, la BRDF est une fonction symétrique (appelé encore principe de réciprocité) :

$$f_r(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$$

De plus la fonction de distribution est invariante par rotation dans le cas d'une surface isotrope, et peut donc s'écrire :

$$f_r(\theta_i, \theta_r, |\varphi_i - \varphi_r - \pi|), \text{ avec } 0 \le |\varphi_i - \varphi_r - \pi| \le \pi .$$

Par contre cette fonction n'est pas indépendante de la longueur d'onde du flux incident, même si dans la plupart des cas on admet que la répartition spectrale de ce flux reste sans effet sur la répartition géométrique du flux réfléchi ; la BRDF peut se scinder en deux termes indépendants :

$$f_r(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i, \lambda) = f_{r1}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot f_{r2}(\lambda)$$

L'utilisation de ces fonctions dans les codes de calcul nécessite en principe des fonctions analytiques plus ou moins complexes, dont les différents paramètres sont en général établis à partir de mesures réalisées à l'aide de gonioréflectomètres (Fig. 187.).

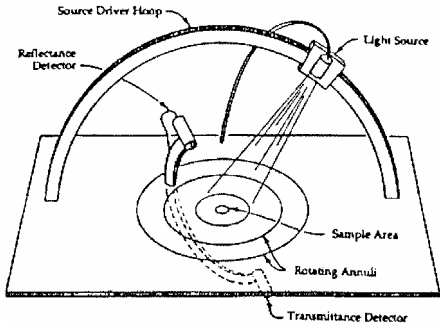


Fig. 187. Gonioréflectomètre.

On a vu précédemment que la luminance réfléchie dans la direction (θ_r, φ_r) pouvait s'écrire, en fonction de la luminance incidente dans une direction (θ_i, φ_i) :

$$dL_r = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos\theta_i \cdot d\omega_i$$

En considérant l'angle solide élémentaire $d\omega_r$ dans la direction (θ_r, φ_r), le rapport du flux réfléchi $d^3\Phi_r$ dans la direction particulière (θ_r, φ_r) (alors que $d^2\Phi_r$ représente le flux réfléchi dans toutes les directions) au flux incident $d^2\Phi_i$ dans la direction (θ_r, φ_r) s'écrit :

$$\frac{d^3\Phi_r}{d^2\Phi_i} = d\left[\frac{d^2\Phi_r}{d^2\Phi_i}\right] = \frac{dL_r}{L_i} = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos\theta_r \cdot d\omega_r$$

On en déduit la réflectivité ρ, qui s'exprime comme le rapport du flux réfléchi Φ_r au flux reçu Φ_i par unité de surface élémentaire :

$$\rho(\theta_i, \varphi_i) = \frac{d^2\Phi_r}{d^2\Phi_i} = \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos\theta_r \cdot d\omega_r = \frac{dB_r}{dE_i} = \frac{\text{radiosité}}{\text{éclairement}}$$

Comme on l'a vu précédemment, le cas d'une surface Lambertienne (parfaitement diffuse) conduit à une exitance (flux émis par l'élément de surface) indépendante de l'angle d'incidence ; la BRDF est donc une constante qui a pour valeur :

$$\rho_{Lambert} = \frac{\rho_0}{\pi}$$

où ρ_0 correspond au facteur de Fresnel sous incidence normale.

Pour un matériau spéculaire parfait au contraire, le flux sera émis dans un cône dont l'angle solide sera limitée à celui de la radiation incidente, au voisinage de la direction de réflexion, selon la loi de Descartes.

$$\rho_{spéculaire}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \rho_0 \cdot \delta(\theta_r - \theta_i) \cdot \delta(\varphi_r - \varphi_i - \pi \bmod 2\pi)$$

où δ est la fonction *delta* de Dirac, qui vérifie $\delta(u) = 0$ si $u \neq 0$ et $\int_{-\infty}^{+\infty} f(u) \cdot \delta(u-a)du = f(a)$.

Il est évident que les matériaux réels ne correspondent à aucun de ces deux cas, mais qu'ils se situent plutôt entre ces deux extrêmes ; la réflexion est le plus souvent diffuse directionnelle (voir la Fig. 188.), et augmente avec la rugosité de la surface ; la réflexion spéculaire se produit dans le cas de matériaux dont les surfaces sont optiquement lisses, c'est-à-dire telles que la dimension des aspérités reste inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident.

Les développements précédents sont également valables pour la fonction de transmission bidirectionnelle f_t ; celle-ci s'écrira de manière analogue, mais cette fois comme rapport de la luminance transmise dL_t dans une direction de réfraction donnée (θ_t, φ_t) à l'éclairement incident de direction (θ_i, φ_i):

$$f_t(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_t}{dE_i} = \frac{\text{luminance}}{\text{éclairement}}$$

Ainsi la luminance transmise dans la direction (θ_t, φ_t) s'exprimera en fonction de la luminance incidente dans une direction (θ_i, φ_i) selon l'expression :

$$dL_t = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_t, \varphi_t) \cdot L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos\theta_i \cdot d\omega_i$$

7.3.2 Les modèles de réflexion

Les environnements architecturaux urbains étant composés en majeure partie de surfaces « mates », la composante diffuse y est souvent prépondérante, et c'est précisément l'importance de cette composante qui nous a conduit à implanter un modèle global dans SOLENE ; la composante spéculaire n'est pas pour autant inexistante dans cet environnement puisqu'elle peut prendre naissance sur le verre et les surfaces métalliques polies,

matériaux qui de nos jours sont de plus en plus utilisés dans la construction ; mais elle ne se produit que pour une incidence précise, donc pour une position solaire particulière, de fait très limitée dans le temps et dans l'espace... Ce type de réflexion peut néanmoins devenir fort désagréable, voire dangereux dans le cas où la lumière solaire directe est réfléchie par une façade composée d'éléments métalliques polis, ou de larges panneaux de verre... Il peut conduire à l'éblouissement temporaire – inconfortable ou perturbateur[116] – d'un conducteur automobile par exemple ; mais il ne s'agira que de circonstances exceptionnelles puisque leur durée ne dépassera guère quelques dizaines de secondes, et si elles sont susceptibles de nuire au confort ou à la perception visuelle d'un usager à un instant et en un lieu donnés, elles n'affecteront pas de manière significative l'éclairement global d'un site urbain.

De plus les surfaces métalliques ne sont que très rarement parfaitement lisses, et la réflexion spéculaire ne se produit pas dans une direction unique (cas de la réflexion spéculaire idéale), mais selon un ensemble de directions voisines de celle-ci ; toutes ces directions sont finalement contenues dans un cône dont l'axe est celui de la réflexion spéculaire parfaite, et dont l'ouverture de l'angle au sommet est directement liée à l'état de surface du matériau ; la taille de ce cône de réflexion spéculaire dépend donc de la rugosité de la surface du matériau. Mais comme on l'a précisé plus haut, les matériaux réels n'offrent jamais, à de rares exceptions près, l'une ou l'autre de ces réflexions : on parle alors de réflexion mixte ; en outre il a été montré que le fait de distinguer deux (spéculaire et diffuse), ou même trois (spéculaire, directionnelle diffuse et diffuse uniforme) « types » de réflexion permet de caractériser assez précisément le comportement de la plupart des matériaux courants (Fig. 188.).

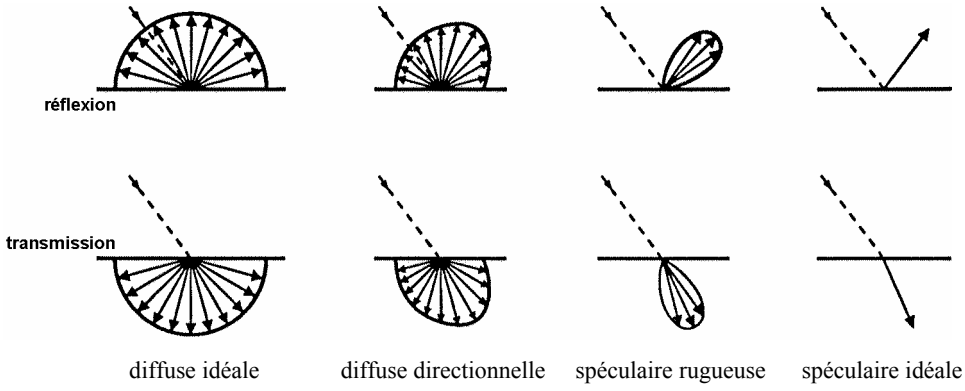


Fig. 188. Les différents types de réflexion (et de transmission). A titre d'exemple, on peut citer la craie et le métal poli comme approximations de réflecteurs diffus et spéculaire parfaits respectivement ; le papier de riz et le verre s'approchent quant à eux des transmissions diffuse et spéculaire parfaites.

[116] L'éblouissement *inconfortable* se traduit par une sensation visuelle désagréable ne troublant pas nécessairement la vision des objets (par exemple vision directe et rapprochée d'une lampe à incandescence) ; l'éblouissement *perturbateur* diminue la capacité de vision des objets sans forcément provoquer de sensation désagréable (par exemple difficulté à discerner une personne à contre-jour, reflet sur un écran cathodique ou sur du papier glacé...).

Historiquement, les modèles de réflexion ont été développés avant tout pour la réalisation d'images infographiques ; mais les premiers modèles restaient tout à fait empiriques, et le très connu modèle Phong a rapidement montré ses limites ; aussi les chercheurs se sont orientés vers des modèles susceptibles de rendre compte des réalités physiques de l'interaction lumière / matière. Le premier modèle théorique de réflexion a été introduit dans la communauté infographique, au début des années 80, par Cook et Torrance [12], à partir des travaux réalisés par Beckmann et Spizzichino[117] principalement, concernant la réflexion des ondes électromagnétiques sur des surfaces rugueuses, travaux qui se situaient donc dans le domaine des sciences physiques. Le modèle proposé par Cook est par conséquent élaboré à partir des lois physiques de la réflexion, et peut s'appliquer à un grand nombre de matériaux ; l'évaluation de la réflectance bidirectionnelle prend en compte l'orientation du rayonnement incident, la direction de réflexion (aspects géométriques), l'état de surface du matériau et son indice de réfraction (aspects physiques).

La plupart des modèles utilisés à l'heure actuelle partent du principe que la BRDF « globale » (c'est-à-dire vue à l'échelle macroscopique) résulte de l'état de surface du matériau (sa rugosité) observé à une échelle microscopique : la surface est supposée formée d'une multitude de minuscules facettes planes et adjacentes (micro-facettes) distribuées de manière aléatoire[118]. Ce principe permet ainsi de se ramener au cas des matériaux idéalement réfléchissants, pour lesquels l'amplitude de l'onde réfléchie dans une direction donnée est fournie par le facteur de Fresnel. La rugosité globale de la surface est ensuite prise en compte en pondérant le facteur de Fresnel par la proportion de micro-facettes qui sont effectivement susceptibles de réfléchir le rayonnement dans cette direction (seules les micro-facettes dont la normale se situe dans la direction de la bissectrice des rayons incident et réfléchi participent à la réflexion). De plus, en raison de leurs orientations différenciées, la lumière est susceptible de se réfléchir sur plusieurs facettes avant de quitter la surface, de même qu'elles peuvent se masquer mutuellement.

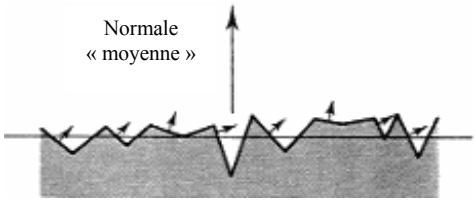


Fig. 189. La rugosité de la surface d'un matériau, sorte de discrétisation en éléments de surface d'orientations variables.

[117] P. Beckmann, A. Spizzichino, *Scattering of Electromagnetic from Rough Surfaces*, Pergamon Press, 1963.

[118] Cette idée n'est pas nouvelle puisqu'elle semble avoir été proposée pour la première fois par le scientifique français Bouguer dans les années 1750 !

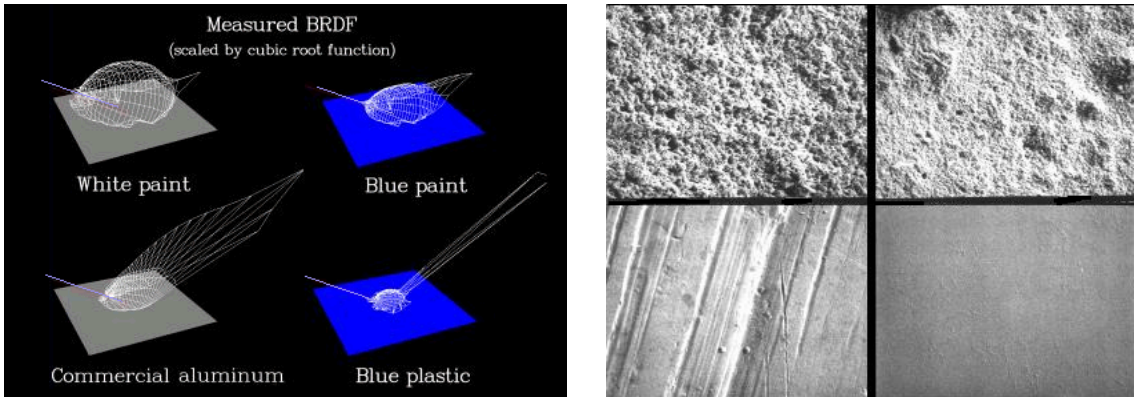


Fig. 190. A gauche représentations tridimensionnelles de BRDF mesurées expérimentalement (pour une longueur d'onde de 550 nm et un angle d'incidence de 60°) ; à droite les micro-photographies correspondantes de la surface pour les quatre cas.

La fonction de réflexion bidirectionnelle (BRDF) est, depuis les travaux de Cook et Torrance, en général exprimée sous la forme d'une combinaison linéaire des réflexions spéculaire et diffuse, selon l'égalité simplifiée suivante (on trouve également des décompositions en trois termes, spéculaire, directionnel diffus et uniforme diffus) :

$$R = k_s \cdot R_s + k_d \cdot R_d \quad \text{avec} \quad k_s + k_d = 1$$

où R_d et R_s sont respectivement les composantes diffuse et spéculaire de la réflectance bidirectionnelle,

et k_d et k_s les proportions de lumière incidente qui sont à l'origine des composantes diffuse et spéculaire.

Dans la décomposition en deux termes uniquement, les composantes diffuse et spéculaire sont respectivement égales à :

$$R_d = \frac{1}{\pi} \cdot C$$

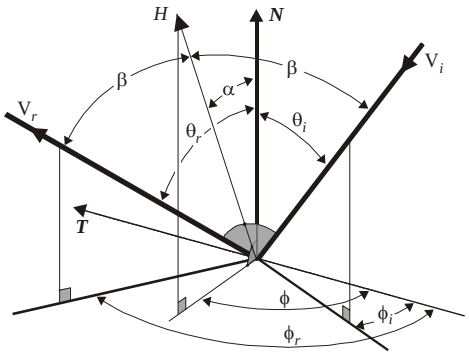
où $C \in [0;1]$ est la proportion de lumière réfléchie par la surface diffuse.

$$R_s = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{D(\alpha,\varphi) \cdot G(\theta_i,\theta_r) \cdot F(\beta)}{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_r}$$

où $D \in [0;\infty[$ représente la distribution de l'inclinaison des micro-facettes, et donc la fraction de facettes dont la normale est orientée selon la direction H (fonction de Beckmann),

$G \in [0;1]$ est une fonction d'atténuation géométrique, qui tient compte du masquage des micro-facettes entre elles (*self-shadowing*),

et $F \in [0;1]$ est le facteur de Fresnel, qui définit la proportion de lumière réfléchie par chaque micro-facette.



$$t = H \cdot N \qquad \alpha = \cos^{-1} t$$
$$u = H \cdot V_i \qquad \beta = \cos^{-1} u$$
$$v = V_i \cdot N \qquad \theta_i = \cos^{-1} v$$
$$v' = V_r \cdot N \qquad \theta_r = \cos^{-1} v'$$

Fig. 191. Rappel des angles et définition des variables utilisées dans l'expression des coefficients du modèle.

Si l'expression globale de R_s n'a rien de très complexe, en revanche celle des coefficients *D*, *G* et *F*, est loin d'être élémentaire, comme le montrent les écritures proposées par Cook et Torrance ; les variables nécessaires sont explicitées ci-dessus (Fig. 191.).

- Fonction de distribution de la pente des micro-facettes *D* :

$$D(t) = \frac{1}{m^2 t^4} \cdot \mathrm{e}^{\frac{t^2-1}{m^2 t^2}}$$

où $t = H \cdot N$,

et *m* correspond à la rugosité de la surface (en théorie $m \in [0;\infty[$, mais en pratique la valeur supérieure ne dépasse guère 0,5 pour les surfaces réelles). Si la surface est très rugueuse, l'orientation des microfacettes est extrêmement variable ; si sa rugosité diminue (*m* faible), l'orientation moyenne des normales *H* aux microfacettes se rapproche de la normale moyenne *N* ; pour une surface parfaitement lisse enfin (m = 0), la distribution devient une fonction de Dirac.

Pour nous l'intérêt de ce modèle réside dans le fait que les valeurs de *m* ont une signification physique (elles peuvent être mesurées expérimentalement).

- Atténuation géométrique *G* :

$$G(t,u,v,v') = \min\left[1; 2\frac{tv}{u}; 2\frac{tv'}{u}\right]$$

- Facteur de Fresnel :

$$F_\lambda(u) = \frac{1}{2}\frac{(a-u)^2+b^2}{(a+u)^2+b^2}\left[\frac{(a+u-1/u)^2+b^2}{(a-u+1/u)^2+b^2}+1\right]$$

où $a^2 = \frac{1}{2}\left(\sqrt{(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + u^2 - 1)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2} + n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + u^2 - 1\right)$

et $b^2 = \frac{1}{2}\left(\sqrt{(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + u^2 - 1)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2} - n_\lambda^2 + k_\lambda^2 - u^2 + 1\right)$

avec n_λ le rapport des indices de réfraction des milieux situés de part et d'autre de la surface,

et k_λ le coefficient d'extinction de la surface.

Depuis les travaux de Cook, Torrance et Sparrow, de nombreux autres modèles de réflexion plus précis ont été développés par la communauté infographique, même si les sources d'inspiration sont bien antérieures ou se situent dans des domaines *a priori* éloignés ; on peut citer ceux de He, Torrance, Sillion, Greenberg [25], dont les modèles (complexes) sont susceptibles de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques (polarisation, diffraction, conductivité, etc.), ou celui de Ward, valable dans le cas d'une réflexion anisotrope mais beaucoup plus simple que le précédent, dont le principe consiste à remplacer la symétrie de révolution de la BRDF isotrope par une asymétrie elliptique dans laquelle l'anisotropie augmente avec l'excentricité, ou encore le modèle Oren-Nayar, assez voisin du premier cité, mais plus récent et paraissant mieux adapté aux matériaux de construction (en majorité diffus), ou enfin l'approche de Koenderink et *al*., qui utilise les polynômes de Zernike pour l'interpolation des mesures.

Ainsi le coefficient d'atténuation géométrique *G* proposé par Cook et Torrance ne correspond pas aux résultats expérimentaux ; il a été reformulé par He et *al*., validé expérimentalement, mais mène à une expression de maniement beaucoup plus délicate encore :

$$G(v) = \frac{g}{g+1}$$

avec $g = \sqrt{\pi h}(2 - \mathrm{erfc}\sqrt{h})$ (où la fonction erfc est définie par $\mathrm{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty \mathrm{e}^{-t^2} dt$),

et $h = \frac{v^2}{2m^2(1-v^2)}$.

Il apparaît donc clairement que la mise en oeuvre de ces modèles reste extrêmement délicate et coûteuse en temps de calcul, mais au-delà, certains aspects restent insatisfaisants, notamment la formulation de la BRDF sous la forme d'une combinaison linéaire à coefficients constants (le poids relatif des réflexions spéculaire et diffuse ne varie donc pas). Si cette approximation reste possible pour certains matériaux, en fait les proportions relatives des composantes diffuse et spéculaires dépendent de l'angle d'incidence ; dans le cas d'un sol vernis par exemple, la loi de Fresnel montre que pour un angle d'incidence important, une grande partie de la lumière est réfléchie de manière

spéculaire par le vernis (Fig. 192.(a)), alors que pour une faible incidence, la majeure partie pénètre le vernis avant d'être réfléchie par le bois sous forme diffuse (Fig. 192.(b)). On pourrait penser que ce phénomène est lié à l'hétérogénéité du matériau (bois + vernis), mais le problème subsiste avec des matériaux homogènes, de telle sorte que la distinction même entre réflexion diffuse et réflexion spéculaire devient sans objet puisque le passage de l'une à l'autre s'effectue de manière quasi continue, et finalement n'est fonction que de la rugosité de la surface.

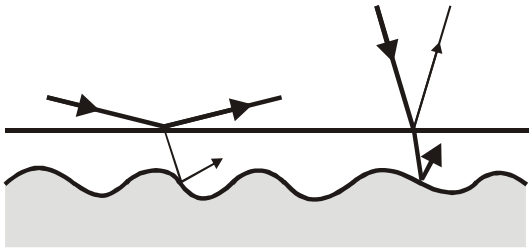


Fig. 192. Influence de l'angle d'incidence sur les réflexions de la couche et de la sous-couche.

Un autre problème apparaît dans le cas de surfaces rugueuses où certaines micro-facettes viennent masquer la réflexion qui se produit sur des facettes voisines ; on a vu que le coefficient atténuateur G venait pondérer la quantité de lumière réfléchie, et finalement exprimer celle qui n'était pas sujette à obstruction. Mais dans la réalité, il est évident que la partie restante $(1-G)$ n'est pas simplement bloquée par les facettes qui font obstruction, mais elle est renvoyée vers certaines des facettes voisines. À l'heure actuelle peu de modèles de réflexion considèrent convenablement la « ré-émission » de ces facettes. L'ensemble de ces phénomènes correspond très exactement, mais à une échelle « microscopique » cette fois, au problème des inter-réflexions entre les éléments de surface d'un bâtiment (des facettes planes de dimension variable), problème qui fait précisément l'objet de cette étude ; ces aspects sont similaires à ceux qui ont développés dans les pages précédentes : discrétisation de la surface, problèmes de visibilité entre facettes... Le cas macroscopique globalise le phénomène de réflexion à l'étendue d'un élément de surface dans sa totalité, alors qu'à une échelle microscopique il s'agit de dégager les éléments constitutifs du phénomène de réflexion par le biais d'une discrétisation en éléments de taille réduite (les micro-facettes).

Un dernier problème concerne le ratio précision / coût – en temps de calcul – du modèle ; or cet aspect essentiel il y a quelques années tend à être moins critique à l'heure actuelle, encore que l'évolution de la technologie s'accompagne d'une exigence de précision toujours plus importante. D'autre part le modèle de réflexion n'est que l'un des nombreux modèles utilisés dans la chaîne d'opérations visant à simuler la lumière naturelle ; à l'instar de tous les autres, ce maillon est générateur d'erreur, aussi la mise en oeuvre d'un modèle extrêmement performant à un stade particulier du processus de si-

mulation n'apportera aucune amélioration à son exactitude globale si la précision des autres maillons de la chaîne est moindre (on ne peut espérer une précision meilleure que celle du maillon le moins précis). Et il est bien évident qu'à partir du moment où la simulation de la lumière naturelle utilise comme données initiales des ciels statistiques, que la scène est discrétisée en éléments de surface considérés comme isotropes, que les propriétés des matériaux de construction évoluent avec le temps (en particulier leur coefficient de réflexion), etc., il paraît raisonnable de s'accommoder d'un modèle un peu moins précis sans doute[119] (de quelques % seulement), mais qui en contrepartie présente des aspects correspondant directement à nos exigences, à savoir être en premier lieu basée sur des considérations physiques, et au second plan dépendre d'un nombre de paramètres le plus faible possible.

Ainsi une direction intéressante paraît être l'approximation des expressions précédentes (*D*, *G* et *F*) par des fractions rationnelles, dont l'avantage majeur est d'être aisées et rapides à calculer numériquement dans la mesure où elles n'impliquent que des opérations du type + – * /. Cette approche proposée par C. Schlick [70] permet également d'assurer une continuité parfaite entre réflexion parfaitement spéculaire et réflexion diffuse idéale...

7.3.3 Modèle en phase d'implémentation dans SOLENE

Les développements précédents ont montré que notre volonté d'approcher le comportement réel des matériaux vis-à-vis des rayonnements incidents conduit à rechercher des solutions plus performantes que le simple modèle de Lambert (l'expérimentation se trouve rarement en accord avec cette modélisation du phénomène de réflexion), au prix il est vrai d'un accroissement non négligeable de la complexité.

Mais en dehors de ces problèmes de complexité – et finalement de temps de calcul –, les diverses expressions analytiques précédemment exposées présentent surtout l'inconvénient de dépendre de paramètres choisis par l'utilisateur de manière totalement empirique, sans corrélation particulière avec les matériaux existants ou supposés ; or cet aspect constitue un défaut majeur dans le cadre de notre problématique, puisqu'il s'agit de simuler des configurations « réelles », et donc d'étudier conjointement l'impact de la morphologie et celui des matériaux (penser aux tissus urbains anciens par exemple, où la rénovation des façades venant modifier leur coefficient de réflexion, elle affecte de manière très sensible la disponibilité en lumière naturelle pour les étages bas, par réflexion sur les prospects – voir à ce propos les applicatifs du Chapitre 8.). A noter que

[119] Les préoccupations de la communauté infographique sont évidemment différentes : elle est à la recherche de modèles de réflexion toujours plus précis permettant d'augmenter le réalisme des images produites, comme par exemple permettre de déduire sans aucune ambiguïté la nature des « matériaux » utilisés (penser aux scènes obtenues par *ray-tracing* il y a quelques années encore, dans lesquelles tous les objets semblaient issus de la même matière plastique – précisément en raison de l'utilisation d'un modèle unique, celui de Phong...).

l'infographie tente plutôt de trouver les « bons » coefficients – c'est-à-dire ceux qui visuellement vont permettre à l'observateur d'identifier le matériau, non plus en le rapportant à l'objet, mais de manière « autonome »[120] ; cette remarque ne relativise en rien les énormes progrès effectués dans ces domaines par la communauté infographique précisément, pour laquelle la quête de réalisme s'est toujours accompagnée de la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu...

Mais ce problème crucial de cohérence entre le matériau réel et les coefficients affectés au modèle de simulation trouve une solution si les mesures effectuées à partir de matériaux réels sont directement associées à un modèle analytique ; cette approche nous paraît de loin la plus pertinente, car elle permet d'assurer à la fois la cohérence entre le matériau réel et les coefficients de son modèle numérique, ainsi que la continuité spatiale (les mesures étant réalisées pour un certain nombre de directions seulement).

7.3.3.1 Choix des modèles

C'est sans aucun doute la raison pour laquelle deux universités[121] ont mené conjointement, au cours de l'année 1996, une importante campagne de mesures à propos de la luminance énergétique des matériaux. Elle a concerné plus d'une soixantaine de matériaux réels – et de nombreux matériaux de construction notamment – incluant surfaces spéculaires, surfaces diffuses, isotropes, anisotropes, etc. Pour chaque matériau, les mesures ont été effectuées selon un certain nombres d'orientations relatives entre les rayonnements incident et réfléchi (205 mesures par matériau). Les résultats des mesures sont proposés en termes de coefficients s'ajustant parfaitement aux modèles d'Oren-Nayar d'une part et de Koenderink et *al*. d'autre part. Les comparaisons effectuées par les auteurs [13] montrent que le second est plus précis à condition de l'utiliser dans une version employant 55 coefficients ! En revanche, avec 5 coefficients ce modèle devient inférieur en précision à celui d'Oren-Nayar, qui en nécessite 3 seulement... Ce dernier convient d'ailleurs particulièrement bien pour les surfaces diffuses, et paraît donc une alternative intéressante – voire indispensable – au modèle Lambertien traditionnel. En revanche si le modèle Oren-Nayar prend convenablement en compte la réflexion diffuse, il est manifestement moins performant dans le domaine des réflexions spéculaires, et celles-ci seront laissées aux soins d'un modèle Torrance-Sparrow, dont les coefficients ont été définis précédemment.

---

[120] À relativiser toutefois, puisque la vue ne suffit pas toujours à identifier le matériau dont est constitué l'objet réel ; les autres sens viennent alors à son secours pour lever l'indétermination : le toucher (chaud/froid, lourd/léger, etc.), l'ouïe (son mat, résonance, etc. lorsque l'objet est frappé), l'odorat éventuellement...

[121] Il s'agit de l'université américaine Columbia University (New-York) et de l'université d'Utrecht (Pays-Bas), dans un programme commun dénommé CURET (Columbia-Utrecht Reflectance and Texture Database) ; http://www.cs.columbia.edu/CAVE/curet/.index.html

L'intérêt du modèle dans sa globalité (Oren-Nayar + Torrance-Sparrow) est de n'être défini que par trois paramètres seulement (l'albédo moyen des micro-facettes ρ, la rugosité de la surface σ et la composante diffuse k_d pour le modèle Oren-Nayar, le paramétrage du modèle Torrance-Sparrow se faisant quant à lui par $k_s = 1 - k_d$), mais surtout trois paramètres totalement transparents pour l'utilisateur dans la mesure où ceux-ci sont extraits de la base de données fournie par les mesures évoquées précédemment ; finalement l'utilisateur ne fait que choisir un matériau, indépendamment de toute préoccupation vis-à-vis de ses caractéristiques optiques...

La luminance L d'une surface est ainsi donnée par :

$$L(\theta_r, \theta_i, \varphi_r - \varphi_i, \rho, \sigma) = k_s \cdot L_s + k_d \cdot L_d \quad \text{avec} \quad k_s + k_d = 1$$

À partir du moment où ont été définies la direction du rayonnement incident et celle de la direction d'observation (respectivement (θ_i, φ_i) et (θ_r, φ_r)), le modèle Oren-Nayar prend en compte le fait que les facettes sont susceptibles d'affaiblir ce rayonnement (orientation), de se masquer, de se porter ombre, ou encore de réfléchir mutuellement la lumière (inter-réflexions).

Le principe retenu par les auteurs consiste en quelque sorte à disséquer le phénomène et à évaluer indépendamment chacune de ses composantes ; il se décline en deux étapes principales :

- tout d'abord une séparation de la luminance diffuse L_d (la quantité réfléchie donc) en deux composantes L_1 et L_2, avec $L_d = L_1 + L_2$; L_1 correspond à la première réflexion et L_2 traduit la contribution des micro-facettes aux inter-réflexions ; à remarquer qu'il s'agit là d'un principe identique à celui que nous avons retenu pour le traitement « global » du phénomène d'inter-réflexions (c'est-à-dire entre les éléments de surface du bâti) ; cette similarité dans la manière d'envisager le traitement de problèmes équivalents, mais à échelles différentes (macroscopique dans l'environnement urbain ou microscopique au niveau de l'état de surface du matériau) mérite à notre sens d'être notée ; en revanche les modes de résolution restent extrêmement différents.

- en second lieu la construction, pour la première réflexion L_1, de trois fonctions, chacune d'entre elles correspondant à l'un des « effets » susceptibles de se produire entre les micro-facettes (affaiblissement, masque, ombre) ; elles sont affectées chacune d'un coefficient C_i.

Sont listés ci-dessous l'ensembles des éléments analytiques nécessaires à la construction du modèle Oren-Nayar, ses paramètres d'entrée se limitant aux valeurs ρ, σ et k_d :

- Les deux composantes L_1 et L_2 sont données par les formulations approchées suivantes :

$$\begin{cases} \dfrac{L_1}{E_0 \cos\theta_i} = \dfrac{\rho}{\pi}\Big[C_1(\sigma) + \cos(\varphi_r - \varphi_i)\cdot C_2(\alpha,\beta,\varphi_r - \varphi_i,\sigma)\cdot\tan\beta \\ \qquad\qquad + \left(\left(1 - \left|\cos(\varphi_r - \varphi_i)\right|\right)\cdot C_3(\alpha,\beta,\sigma)\cdot\tan\dfrac{\alpha+\beta}{2}\right)\Big] \\ \dfrac{L_2}{E_0 \cos\theta_i} = \dfrac{0{,}17\rho^2\sigma^2}{\pi(\sigma^2 + 0{,}13)}\cdot\left(1 - \cos(\varphi_r - \varphi_i)\cdot\left(\dfrac{2\beta}{\pi}\right)^2\right) \end{cases}$$

où $E_0 \cos\theta_i$ est l'éclairement énergétique incident (à la surface réceptrice),

ρ est l'albédo des facettes,

$\alpha = \max\left[\theta_i, \theta_r\right]$,

et $\beta = \min\left[\theta_i, \theta_r\right]$.

- Enfin les coefficients C_1, C_2 et C_3 sont définis par :

$$\begin{cases} C_1 = 1 - 0{,}5\dfrac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0{,}33} \\ C_2 = \begin{cases} 0{,}45\dfrac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0{,}09}\cdot\sin\alpha & \text{si } \cos(\varphi_r - \varphi_i) \geq 0, \\ 0{,}45\dfrac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0{,}09}\cdot\left(\sin\alpha - \left(\dfrac{2\beta}{\pi}\right)^3\right) & \text{sinon} \end{cases} \\ C_3 = 0{,}125\dfrac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0{,}09}\cdot\left(\dfrac{4\alpha\beta}{\pi^2}\right)^2 \end{cases}$$

où σ est l'orientation de la pente des facettes (il s'agit ici en fait du paramètre de rugosité « macroscopique » ou global).

7.3.3.2 Visualisation

Plus encore sans doute que pour la distribution des luminances sur la voûte céleste, il est difficile de présager de l'influence des différents coefficients sur la distribution spatiale de la BRDF ; une visualisation tridimensionnelle est donc la bienvenue ; celle-ci est d'ores et déjà implémentée dans SOLENE, et elle permet de représenter dans la fenêtre OpenGL les deux modèles de BRDF qui viennent d'être décrits (Cook-Torrance-Sparrow et Oren-Nayar), en fonction de leurs différents paramètres (Fig. 193.).

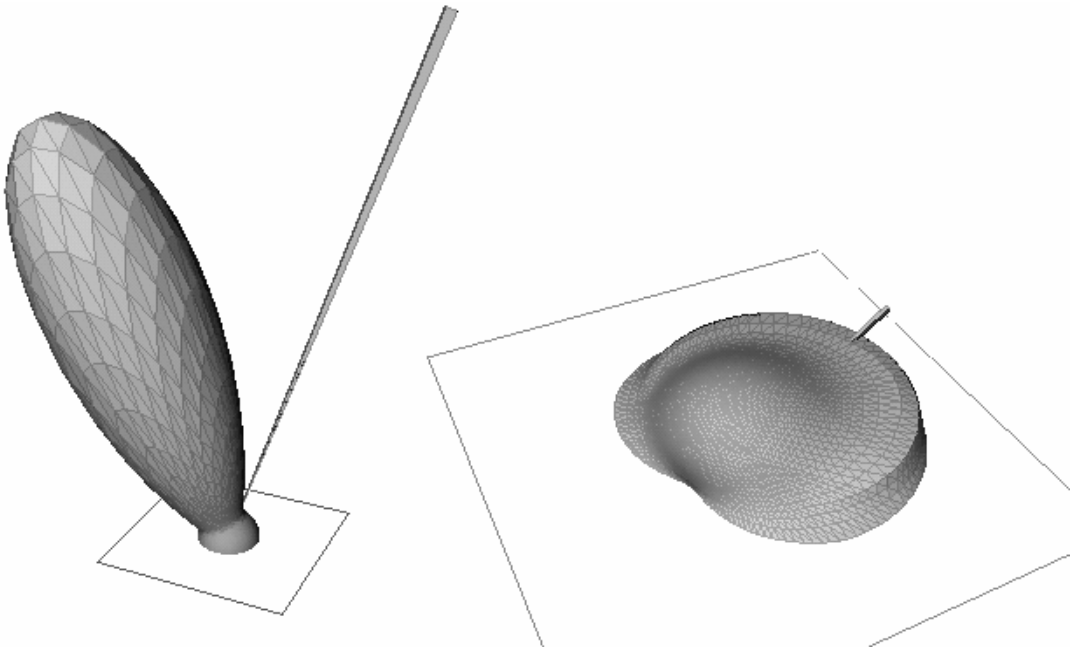


Fig. 193. Visualisation dans SOLENE des modèles de BRDF utilisés :
Cook-Torrance-Sparrow (à gauche), et Oren-Nayar (à droite).

7.3.4 Conclusion

Comme déjà précisé dans l'introduction de cette section, les modèles qui viennent d'être définis (Oren-Nayar pour la partie diffuse, Cook-Torrance-Sparrow pour les aspects spéculaires) sont en phase d'implémentation au sein du logiciel SOLENE. Si l'objet de notre intérêt vis-à-vis des BRDF était avant tout la prise en compte des réflexions spéculaires, il en résulte également une amélioration sensible de la qualité du traitement des aspects diffus ; de plus le paramétrage par matériau (au « vrai » sens du terme cette fois, et non plus par coefficients plus ou moins empiriques) constitue également une avancée significative, surtout dans le cas des espaces intérieurs, pour lesquels les matériaux constitutifs des parois ou de revêtement ont une influence déterminante sur la diffusion de la lumière naturelle vers les profondeurs du local.

7.4 Conclusion

Ce chapitre vient de mettre en évidence le traitement de l'éclairement diffus dans les espaces intérieurs de même que dans l'environnement urbain, à partir d'une méthode relevant de la physique des échanges thermiques entre deux éléments de surface. Elle ne peut être mise en œuvre qu'à la condition d'une détermination préalable de l'énergie incidente en provenance de la voûte céleste et du soleil éventuellement (cas d'un ciel clair) (Fig. 194.). La section relative aux facteurs optiques des matériaux montre comment s'approcher encore davantage des conditions réelles de réflexion en s'intéressant à la structure microscopique de la surface des matériaux.

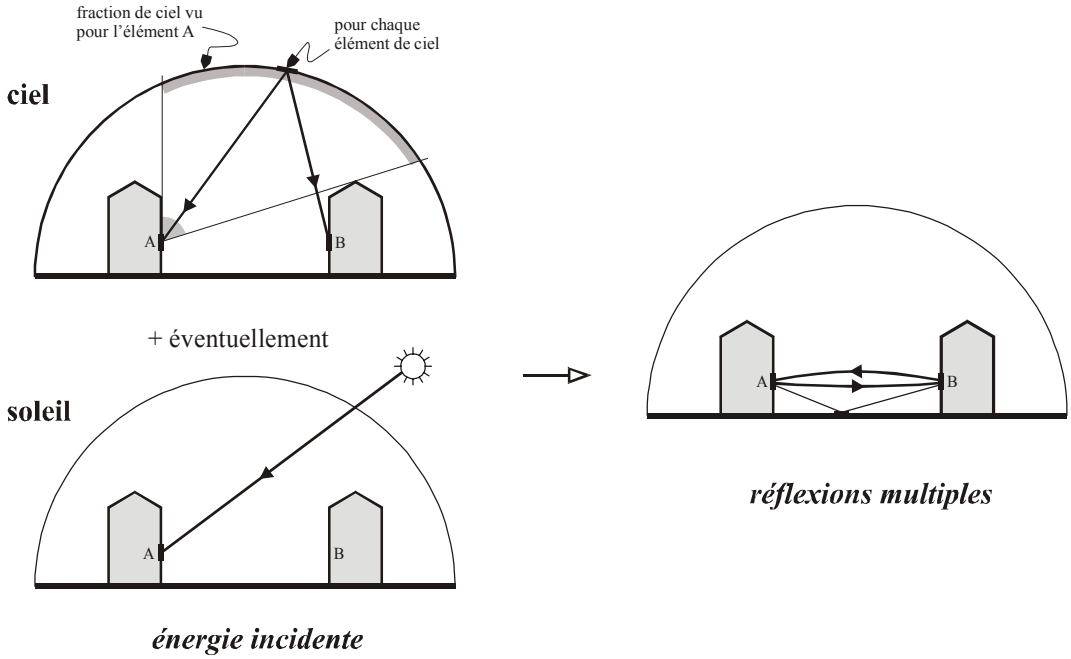


Fig. 194. À gauche évaluation de l'énergie incidente (problèmes de masques) ;
à droite traitement des réflexions multiples.

En dépit de leur lourdeur (essentiellement dues au calcul des facteurs de forme), les méthodes mises en œuvre ici sont très performantes, même si certains domaines d'incertitude persistent ; ils concernent avant tout les conditions d'insolation (modèles statistiques de ciels), et dans une moindre mesure les coefficients de réflexion des matériaux. En outre les méthodes développées contribuent à ouvrir de manière presque immédiate la voie pour le traitement de problèmes de micro-climatologie urbaine (par exemple des problèmes radiatifs liés à la présence d'eau ou de végétation...).

► Le modèle de réflexion SOLENE : notre contribution

Les trois parties principales de ce chapitre ont traité dans l'ordre des problèmes de visibilité et de maillage, des principes du modèle radiatif et des solutions apportées dans SOLENE, enfin des aspects relatifs à la réflexion des matériaux réels. Chacun de ces aspects a donné lieu à des développements logiciels implémentés dans SOLENE.

- Affectation, pour chaque élément de surface de la scène discrétisée, de l'énergie qu'il reçoit du soleil et des éléments de la voûte céleste, relativement à leur orientation relative et en considérant les masques éventuels (fonction *masques_ciel*, ainsi que les fonctions dérivées *fraction_ciel* et *ciel_vu_du_contour*). Notre méthode présente l'avantage de répercuter l'anisotropie des ciels sur les éléments de l'urbain, contrairement à d'autres techniques qui, si elles prennent en compte la distribution des luminances sur la voûte céleste, ne font que réaliser une intégration sur cet ensemble de manière à obtenir un éclairement horizontal diffus à la surface terrestre ; le principe développé ici est ainsi capable de refléter fidèlement un passage nuageux sur les surfaces de la scène (pour peu que l'on dispose des informations réelles – et non plus statistiques –, qui seront alors « plaquées » sur l'hémisphère), permettant par conséquent de mettre en évidence des situations directionnelles éphémères dans la perception d'un site urbain.

- Mise en évidence des spécificités de notre approche et de nos contraintes par rapport à celles de l'imagerie, d'où des différences notables dans le choix de certaines méthodes (par exemple la mise en œuvre dans SOLENE de la méthode d'intégration sur contour pour le calcul des facteurs de forme – fonction *facform*, et les fonctions associées *somme_facform* et *facform_du_contour*).

- Mise en oeuvre de l'algorithme à raffinement progressif au sein de SOLENE, en attribuant aux différents éléments de surface de la scène un éclairement énergétique initial correspondant à l'énergie qu'ils reçoivent directement depuis les éléments de ciel (ainsi que du soleil) ; le traitement concerne à nouveau une problématique de visibilité (ne sont concernés que les éléments de la scène qui « voient » une portion de ciel, aussi minime soit-elle).

▼ Comme viennent de le montrer les deux derniers chapitres, l'ensemble des aspects théoriques de cette recherche s'est concrétisé sous la forme d'un outil logiciel opérationnel ; il paraît donc indispensable ici – et sans prétendre à une quelconque exhaustivité –, d'expliciter quelques unes de ses potentialités au travers d'une « étude de cas », qui en outre corresponde à certaines des problématiques soulevées au début du document. Ceci constitue l'objet de la première partie du chapitre suivant qui, dans un second temps, s'attachera à développer le traitement des vitrages, déjà mentionné plus haut pour ses particularités, à nouveau sous la forme d'une application simple.

8 Instrumentation et traitement des vitrages

Les chapitres 6. et 7. ont explicité les modèles d'éclairement et de réflexion respectivement ; il s'agit maintenant, à partir d'un exemple qui renvoie aux interrogations développées dans le chapitre 4. (*Historique*), de montrer les potentialités de l'outil développé. Il n'est évidemment pas question ici d'en dresser une liste exhaustive, mais plutôt, comme déjà précisé en introduction, de tenter d'en dégager les principaux aspects et notamment de préciser le traitement original que nous proposons pour les parois vitrées.

La première partie de ce chapitre consiste donc, après un bref rappel de l'articulation des différents éléments décrits dans les chapitres précédents, à traiter un exemple d'application type au sein de l'environnement urbain ; la seconde explicite le mode de traitement des vitrages et propose également un exemple d'application, relatif cette fois aux espaces intermédiaires.

8.1 Le processus de simulation : synoptique

Il est bien évident qu'il est difficile d'établir un enchaînement précis des différentes simulations à effectuer afin de satisfaire à un questionnement donné ; pourtant au regard de l'énergie naturelle reçue par une scène urbaine (espaces extérieurs ou intérieurs), deux étapes parallèles seront nécessaires à la mise en place des simulations, chacune d'elles comportant une ou plusieurs opérations préalables :

- En premier lieu la détermination, pour chaque élément de surface de la scène, de l'énergie en provenance du soleil et de la voûte céleste ; cette première étape nécessite tout d'abord la modélisation des sources d'énergie, à la fois dans leurs aspects géométriques et quantitatifs (pour une date et des conditions d'insolation données).

- La seconde étape consistera à traiter les réflexions multiples entre les différents éléments de surface de la scène, qui mettent en jeu leur position relative et leur matériau. Le modèle de radiosité utilisé nécessite quant à lui la discrétisation de l'ensemble des surfaces qui participeront aux simulations.

Les opérations précédentes ayant eu pour effet la création de descripteurs simples ou de descripteurs fonctions du temps (voir la section 2.3.2.2), l'utilisateur peut à ce moment exploiter la base de données ainsi constituée, et donc formuler divers types d'interrogations à partir de l'un des descripteurs ou de la composition de plusieurs d'entre eux (si par exemple un descripteur correspond à la durée d'ensoleillement des éléments de surface d'un site urbain, il est ainsi possible de visualiser uniquement les

surfaces au soleil entre deux instants donnés, ou celles à l'ombre durant une période donnée... ; il en va de même pour des interrogations beaucoup plus complexes évidemment).

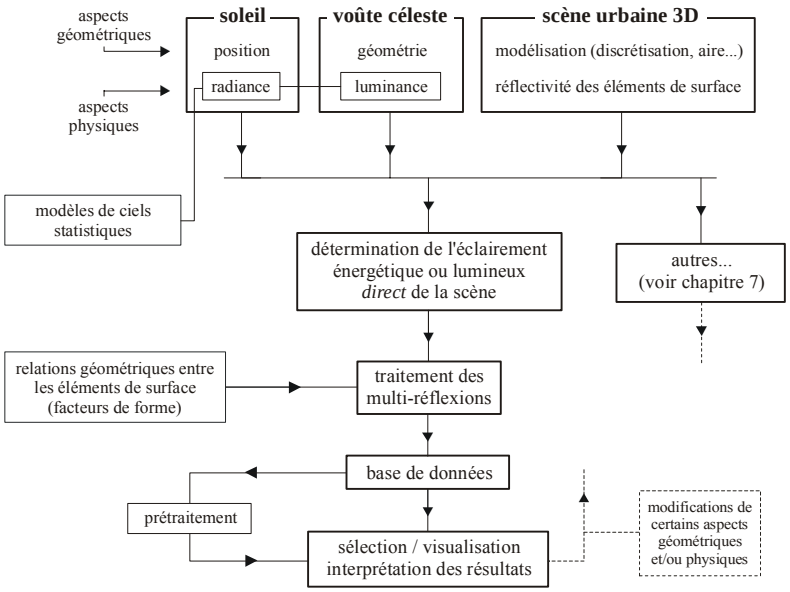


Fig. 195. Diagramme général du processus de simulation vis-à-vis des éclairements énergétiques et lumineux.

8.2 Le processus de simulation : exemple de traitement

8.2.1 Modélisation, simulations et exploitation des résultats

Le propos consiste ici à procéder à quelques simulations simples sur un site urbain dont la modélisation géométrique est importée dans SOLENE *via* les convertisseurs évoqués au chapitre 2. L'exemple retenu est celui d'une rue du cœur de Nantes, la rue d'Orléans, dont les caractéristiques dimensionnelles sont les suivantes : longueur 100 m, largeur 8 m, hauteur du bâti 16 m de part et d'autre de la rue, orientation décalée de 25° par rapport à l'axe est-ouest, amenant de fait des éclairements énergétiques et lumineux très différents pour chacune des deux façades en vis-à-vis. La pierre calcaire blanche, avec laquelle est réalisé l'ensemble des constructions de la rue ayant subi les dégradations dues aux intempéries et à la pollution, s'est considérablement noircie et les façades dirigées vers le sud réfléchissent finalement très faiblement l'énergie qu'elles reçoivent.

Le propos est donc ici d'étudier dans quelles proportions une restauration de la totalité des façades de cette rue pourrait apporter une modification sensible des niveaux lumi-

neux disponibles sur celle exposée au nord, et en conséquence la disponibilité en lumière naturelle à l'intérieur des habitations situées du côté sud de la rue.

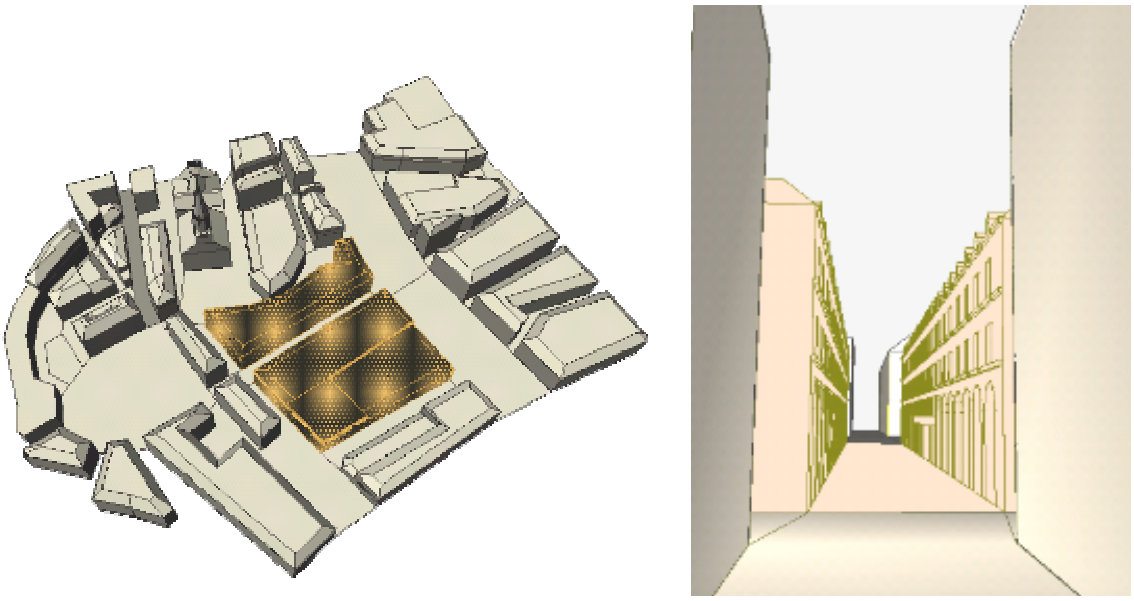


Fig. 196. À gauche le modèle numérique du site urbain retenu (la rue d'Orléans et son environnement bâti) ; à droite modèle numérique de la rue mettant en évidence la précision de la modélisation.

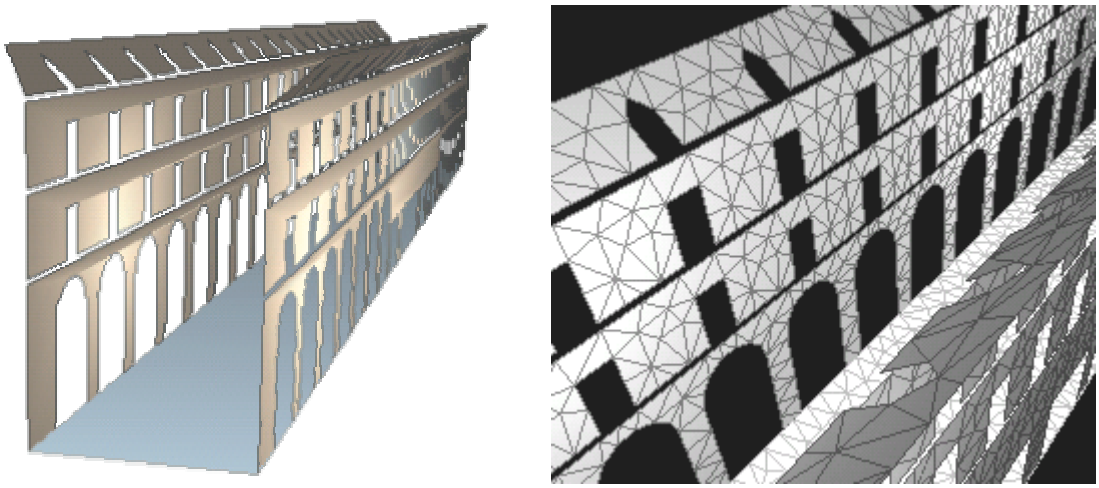


Fig. 197. À gauche les surfaces simulées (les deux façades + le sol de la rue) ; à droite ces mêmes surfaces après maillage.

8.2.1.1 Ensoleillement

La représentation des zones d'ombre et de soleil sur la maquette 3D fait désormais partie des potentialités « classiques » d'un logiciel de simulation de l'ensoleillement. SOLENE n'échappe pas à la règle et permet, pour une date donnée, la visualisation de la course solaire et de l'ensoleillement direct de manière séquentielle, par pas de temps au choix de l'utilisateur, à partir d'une simulation de type « héliodon » ou « masque » (voir la section 2.4.1). L'exploitation de la base de données permet également de mettre en évidence la durée d'ensoleillement en chaque point du site (la visualisation est grandement facilitée par une représentation en fausses couleurs).

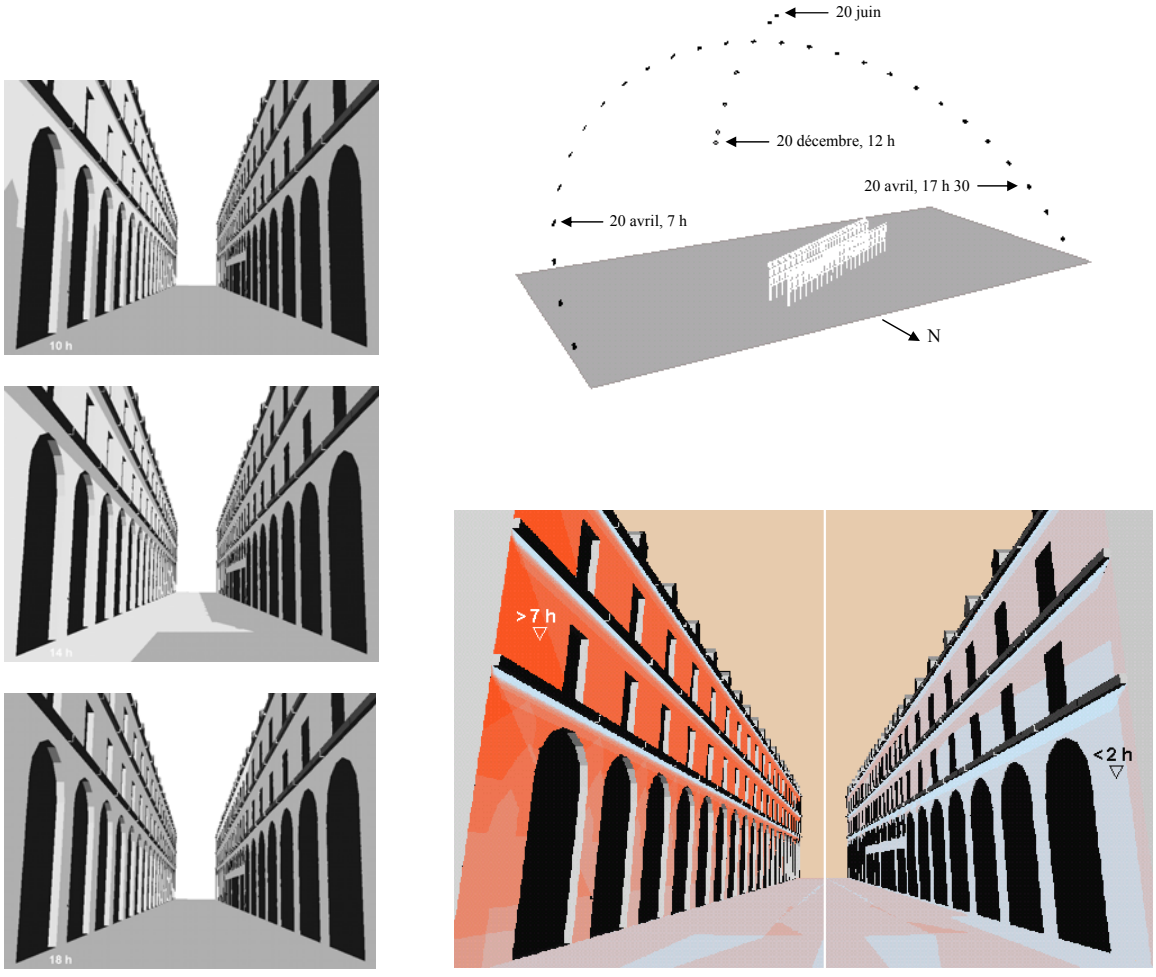


Fig. 198. À gauche les états d'ensoleillement à 10h, 14h et 18h, le 20 avril ;
en haut à droite, la course du soleil le 20 avril, par pas de ½ heure ; les points situés au-dessus et en-dessous de cette trajectoire correspondent à la position du soleil le 20 de chaque mois à 12 h ;
en bas, la cartographie des durées d'ensoleillement le 20 avril également.

8.2.1.2 Éclairement dû à la voûte céleste seule

À partir du moment ou a été défini un ciel (donc un modèle géométrique et un modèle de luminance), il est possible d'étudier la contribution de la voûte céleste seule à l'éclairement du site. Si dans le cas d'un ciel couvert CIE la répartition était symétrique par rapport au milieu de la rue (en raison de l'isotropie azimutale de ce type de ciel), l'hypothèse du ciel serein que nous prenons ici vient détruire cette symétrie : les luminances les plus fortes se situant dans la zone circum-solaire (Fig. 199.), ce sont les façades les plus ensoleillées qui vont recevoir le plus de lumière diffuse (Fig. 200.).

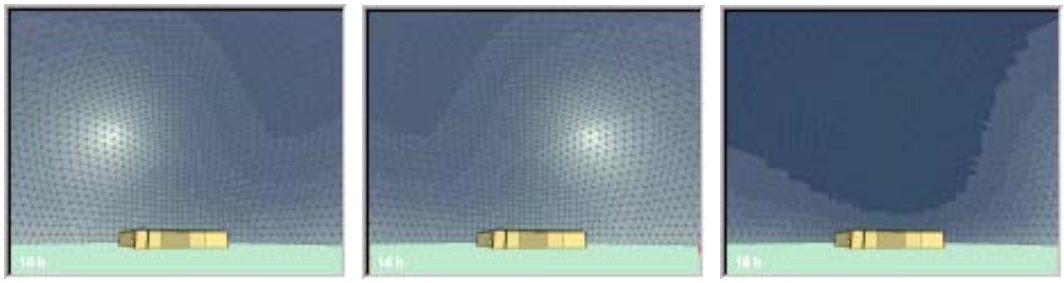


Fig. 199. Distribution des luminances sur la voûte céleste à 10h, 14h et 18h, pour un observateur situé dans le site, donc sous la voûte céleste.

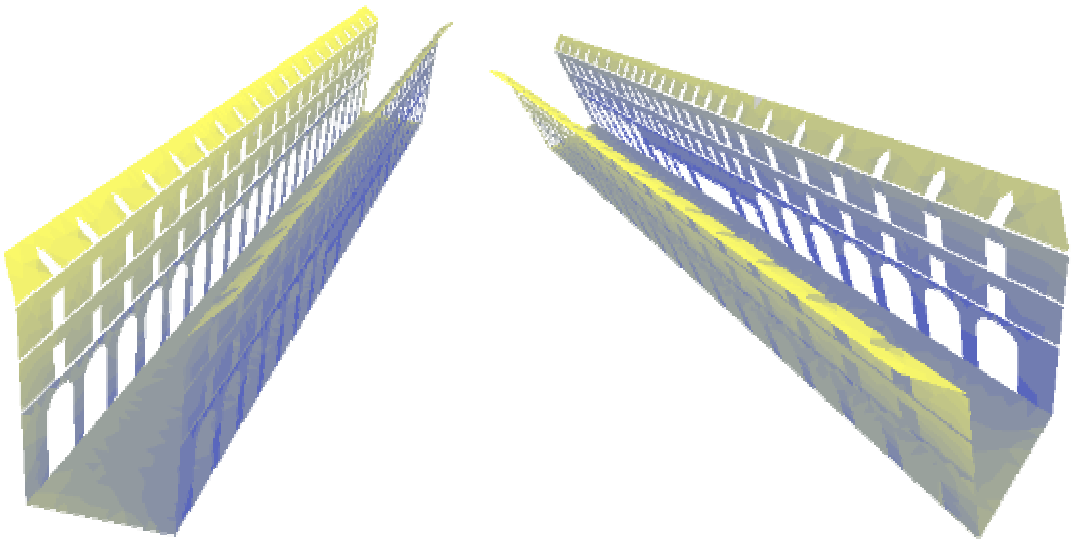


Fig. 200. Lumière diffuse inégalement distribuée sur les deux façades du site étudié.

8.2.1.3 Éclairement total

L'éclairement total reçu par le site, qu'il soit lumineux ou énergétique, correspond au cumul de l'ensoleillement et de la lumière diffuse, avec une large prépondérance du premier dans le cas du ciel serein. Cet éclairement correspond à la lumière reçue « directement » des sources, à l'exclusion de tout phénomène de réflexion entre les surfaces étudiées. Pratiquement il est obtenu dans SOLENE par somme algébrique des descripteurs correspondant à l'ensoleillement et à l'éclairement diffus ; à noter que cette somme n'a évidemment plus lieu d'être dans l'hypothèse d'un ciel totalement couvert.

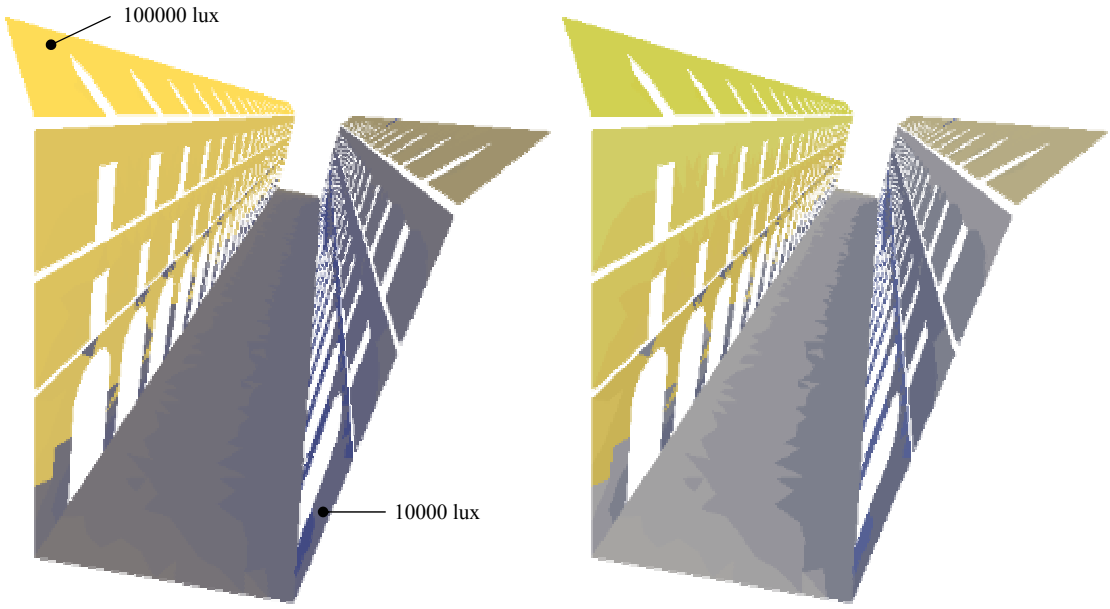


Fig. 201. Éclairement total reçu par le site urbain simulé (ensoleillement + lumière diffuse reçue de la voûte céleste) ; Les deux images représentent la même situation, mais pour une meilleure lisibilité en N&B, la luminosité de l'image de droite a été répartie par intervalles sur l'ensemble du spectre, du noir jusqu'au blanc.

8.2.1.4 Facteurs de forme

On a vu que le traitement des réflexions multiples imposait la détermination des « facteurs de vue » entre les différents éléments de surface du site étudié. Or la quantification de la relation géométrique existant entre deux éléments de surface mérite également une visualisation, car elle est porteuse de signification : elle permet de mettre en évidence les zones d'échange prépondérantes, désignant par là-même celles où les facteurs de réflexion des surfaces auront une influence majeure. Si de plus l'éclairement incident est important dans ces zones, elles seront finalement (après traitement des réflexions multiples) de loin les plus lumineuses ; si leur éclairement est faible au contraire (comparé à celui de zones où les échanges seront plus faibles), la valeur élevée des facteurs de vue est susceptible de venir homogénéiser les distributions.

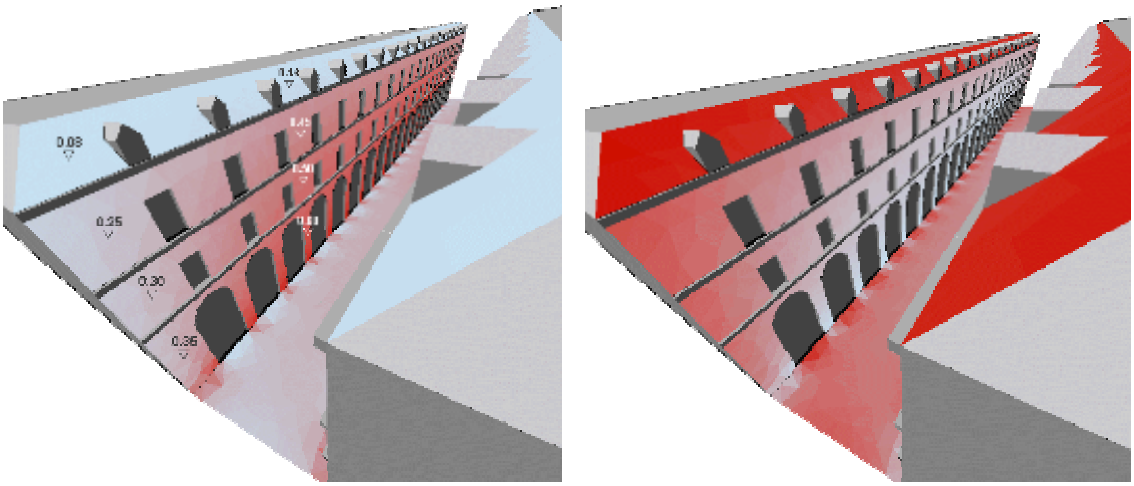


Fig. 202. À gauche cartographie des facteurs de vue (ou facteurs de forme), prépondérants aux niveaux bas de la partie centrale (comme on pouvait s'y attendre compte tenu de la simplicité de la géométrie) ; à droite cartographie « inverse » de la précédente (facteurs de forme « hors-scène »), au sens où elle rend compte des surfaces pour lesquelles l'énergie incidente se « perd » dans l'atmosphère.

8.2.1.5 Traitement des réflexions multiples

Ce traitement suppose que les éléments de surface de la scène soient porteurs d'une information complémentaire ; il s'agit de leur coefficient de réflexion ρ, c'est-à-dire une donnée relative au matériau utilisé. (à noter que dans cet exemple simple, seule la pierre sera considérée comme réfléchissante, les ouvertures des niveaux supérieurs et les arcades vitrées du rez-de-chaussée ne participant pas aux réflexions).

Deux configurations ont été simulées, la première correspondant à un revêtement ancien, donc dégradé, la seconde à l'issue d'une rénovation de l'ensemble des façades, y compris les toitures et le sol de la rue ; les facteurs de réflexion sont donnés dans le tableau suivant :

Surface	facteur de réflexion avant rénovation	facteur de réflexion après rénovation
façades	0,2	0,8
toitures	0,2	0,5
sol de la rue	0,2	0,5

Fig. 203. Coefficients de réflexions des surfaces pour les deux cas étudiés (à noter qu'ils ont été choisis davantage à titre de démonstration que pour correspondre exactement aux coefficients réels de ces surfaces).

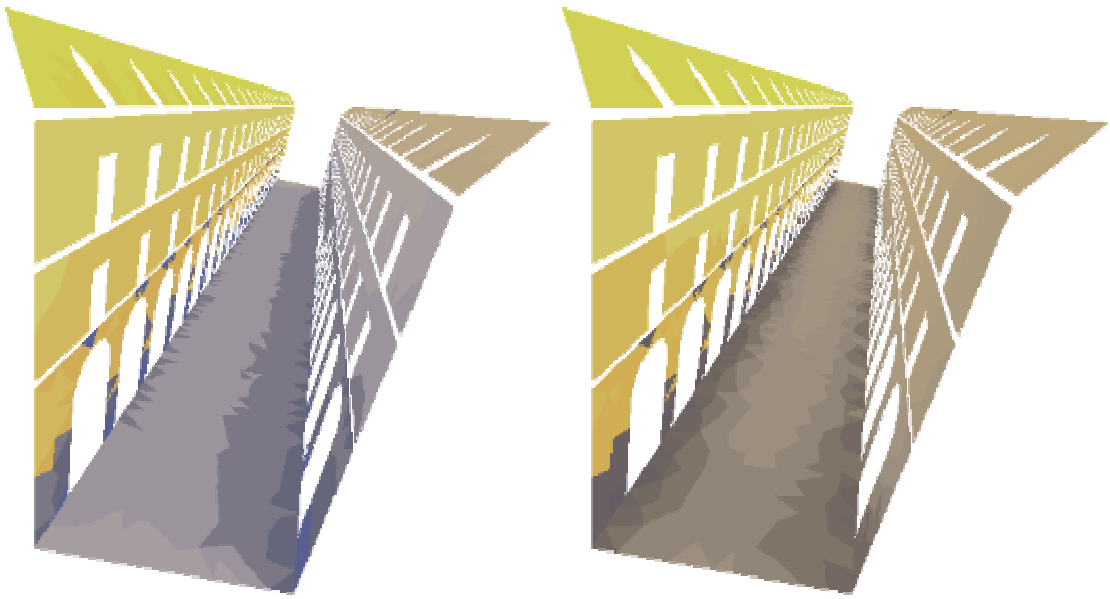


Fig. 204. Comparaison des deux configurations : à gauche avec coefficients de réflexion faibles, montrant une répartition très dissymétrique, en faible évolution par rapport à l'éclairement incident total ; il est intéressant de noter que la partie gauche du sol de la rue a gagné quelque peu en éclairement, accentuant encore la dissymétrie ; à droite avec coefficients de réflexion élevés, montrant clairement une répartition quasiment symétrique au niveau du sol de la rue et une augmentation sensible de l'éclairement lumineux de la façade droite.

8.2.1.6 Autres modes d'exploitation de la base de données

L'un des intérêts majeurs de la constitution d'une base de données réside dans les opérations (algébriques et numériques) qu'elle permet de réaliser après simulation ; il est ainsi possible de comparer, de cumuler, de classer, etc., pour un même site, différents états. Nous insistons à nouveau sur le fait qu'il ne s'agit en aucune manière de traitement d'image, mais d'opérations – au sens mathématique du terme – sur les valeurs « portées » par chaque élément de surface intervenant dans la simulation, indépendamment donc de toute direction d'observation ou mode de représentation...

Les deux premiers exemples proposés ici (Fig. 205.) correspondent aux différences entre l'état « après » et l'état « avant » le lancement du processus de réflexions multiples. Ils traduisent donc le gain provenant de ce processus, et par là-même l'influence des facteurs de réflexion des surfaces de l'environnement. Il devient ainsi possible de quantifier, en termes d'éclairement lumineux par exemple, les modifications résultant d'une rénovation, d'un changement de matériau, ou encore son impact sur l'environnement immédiat.

Le second exemple (Fig. 206.) traduit la différence d'éclairement entre les deux configurations après réflexions multiples, c'est-à-dire les gains d'éclairement obtenus grâce à une modification des facteurs de réflexion des surfaces. On note immédiatement que

ceux-ci sont loin d'être négligeables, mettant en évidence deux éléments d'importance : d'une part l'impact des matériaux de façade, non pas sur la perception « esthétique » qu'en aura l'usager, mais sur leurs effets induits : bénéfique, comme un relèvement du niveau lumineux de prospects mal éclairés, ou au contraire pervers, par éblouissement dû aux réflexions spéculaires par exemple ; d'autre part la nécessité de recourir à des outils de simulation susceptibles de mettre en évidence et de quantifier précisément ces effets.

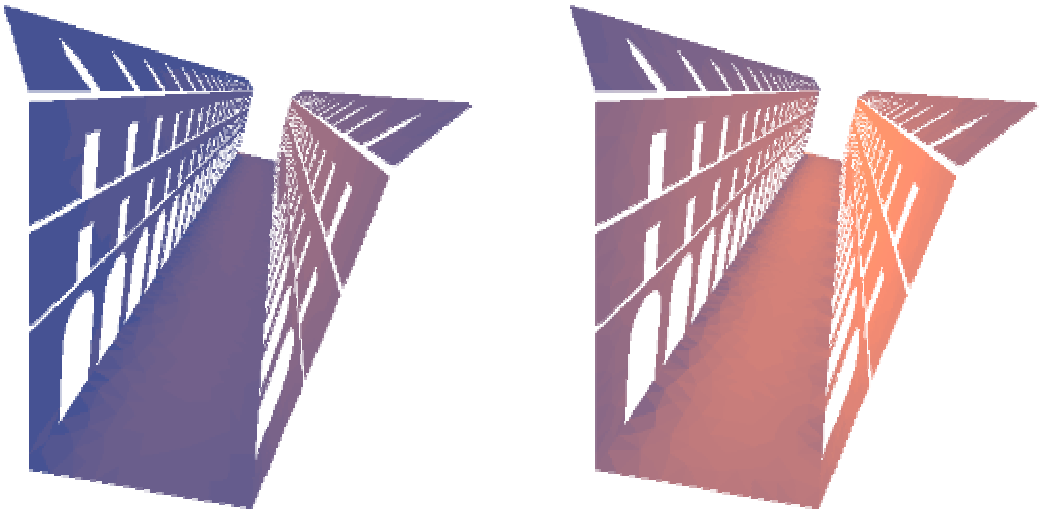


Fig. 205. Comparaison des deux configurations en ce qui concerne la différence entre les éclairements après et avant le processus de réflexions multiples : la configuration de droite (facteurs de réflexion importants) montre les gains en matière d'éclairement lumineux.

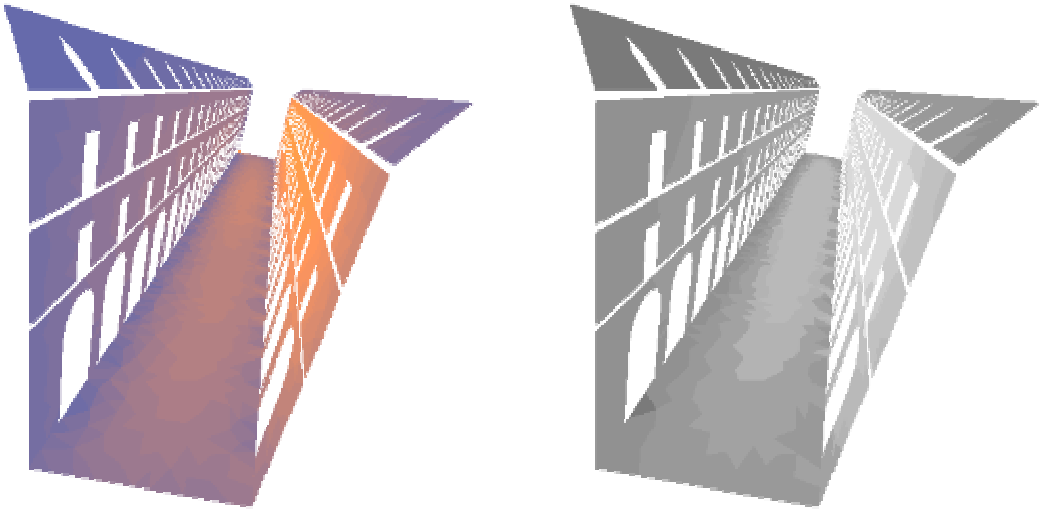


Fig. 206. Cartographie des différences d'éclairement entre les deux configurations ; à droite configuration identique, mais application d'une « postérisation » pour une meilleure lisibilité en N&B.

8.2.2 Conclusion

Les représentations tridimensionnelles proposées dans les pages précédentes sont évidemment de type « statique » ; mais au-delà de ces cartographies saisies à un instant donné, SOLENE permet d'effectuer de manière automatique le même type de simulation sur une plage temporelle définie par l'utilisateur, de manière à produire, par pas de une heure sur une journée par exemple, ou de un mois sur une année, etc., une animation rendant compte de l'évolution du phénomène étudié. À noter que le mode animation fonctionnant par lecture séquentielle des fichiers de descripteurs (écrits en ASCII sur le disque), la résolution temporelle n'est *a priori* pas limitée[122].

8.3 Traitement des vitrages

Sont rappelés dans cette section quelques généralités à propos des vitrages, leur mode de traitement habituel en imagerie, voire même en simulation ; puis sont explicitées leurs caractéristiques, en général fournies par les fabricants de produits verriers (les « caractéristiques fonctionnelles »). Sont ensuite détaillées les modalités que nous avons adoptées pour le traitement des parois vitrées au sein du logiciel SOLENE, ainsi que les perspectives qu'ouvre ce mode de résolution original. Un exemple reprenant la rue d'Orléans est enfin proposé de manière à préciser les modalités de calcul.

8.3.1 Généralités

Le traitement des vitrages nécessite une attention toute particulière dans la mesure où les prises de jour en général, qu'il s'agisse de simples fenêtres ou de baies vitrées de grandes dimensions, qu'elles soient verticales, obliques ou horizontales, constituent des éléments singuliers de l'enveloppe du bâtiment ; les architectes (et les fabricants) les ont déclinées en toutes formes, dimensions, modes d'ouverture, etc. Elles assurent une fonction de *filtre d'énergie*, à la fois au regard des aspects lumineux, thermiques et sonores ; dans ces vingt ou trente dernières années, c'est sans conteste dans le domaine thermique que les progrès les plus importants ont été accomplis, en raison de perfectionnements à la fois dans les technologies de réalisation (menuiseries) et dans la connaissance du matériau (physique du verre) ; ces améliorations ont évidemment des incidences sur les caractéristiques de transmission du rayonnement solaire vers l'intérieur du bâtiment, mais

[122] Elle doit simplement rester cohérente avec le phénomène étudié ; à remarquer toutefois que si une simulation d'ensoleillement par pas de 5 minutes ne présente *a priori* aucun d'intérêt d'une manière générale, elle peut contribuer à la mise en évidence d'éventuels phénomènes d'éblouissement, toujours très fugitifs.

également sur les aspects visuels : c'est notamment le cas de certains vitrages particuliers qui vont réfléchir l'environnement pour un observateur extérieur, et modifier de manière plus ou moins importante le spectre des éléments extérieurs pour l'observateur situé à l'intérieur du local.

8.3.1.1 Le vitrage comme source diffuse

Cette fonction de « séparateur d'ambiance » a en général conduit l'infographie à traiter de manière distincte les scènes extérieures et les scènes intérieures[123] [124], en quelque sorte à isoler les ambiances lumineuses intérieures des conditions extérieures. Ainsi lors du traitement des espaces intérieurs, les ouvertures sont le plus souvent assimilées à des sources lumineuses étendues, leurs caractéristiques étant évaluées à partir du type de ciel et de la position du soleil, ainsi que des directions d'émission. La contribution du soleil est alors déterminée en chaque point de l'ouverture, et le flux total émis à travers la fenêtre est estimé en calculant la luminance moyenne du demi-ciel visible depuis le plan de celle-ci (cas d'une ouverture verticale). Si la luminance de la fenêtre est supposée constante dans toutes les directions et égale à la moyenne précédente, l'émittance de la source (flux émis par unité de surface dans toutes les directions) est égale au produit de cette luminance par π (voir l'annexe 1). L'estimation du flux total émis par la source est finalement le produit de l'émittance par la surface de la source :

$$\Phi = \pi \cdot L_{moyen}^{ciel} \cdot S_{fenêtre}$$

Si le ciel est clair, il est nécessaire d'y ajouter le flux dû au soleil à condition qu'il se situe dans le demi hémisphère visible depuis le fenêtre (ouverture verticale toujours). Le flux du soleil susceptible de pénétrer dans la pièce est, comme précédemment, égal au produit de la luminance du soleil par la surface de la fenêtre :

$$\Phi = \Phi + L^{soleil} \cdot S_{fenêtre}$$

Il est manifeste que les aspects qui viennent d'être décrits – à savoir considérer la fenêtre comme un nouvel émetteur isotrope – contribuent à isoler totalement l'espace intérieur de son environnement extérieur ; ainsi l'espace intérieur devient aveugle et sa relation à l'extérieur « oubliée ». Cela revient également à dire qu'une ouverture située dans un angle rentrant dispensera une lumière diffuse (due à la voûte céleste exclusivement) de manière symétrique à l'intérieur du local puisque la luminance de cette « source » est

---

[123] P. Tellier, Synthèses d'images réalistes (simulation d'éclairage intérieur et extérieur mixte), CSTB Nantes, 1991.

[124] L. Bellia, A. Ceasarano, F. Minichiello, S. Sibilio, *De-Light : a software tool for the evaluation of direct daylighting illuminances both indoors and outdoors – comparison with Superlite 2.0 and Lumen 7.1*, Building and Environment 35, pp. 281-295, 2000 ; les restrictions semblent encore plus draconiennes ici : pièce rectangulaire, une seule surface transparente, épaisseur du mur supportant le vitrage négligeable...

moyennée sur l'ensemble de la surface et considérée comme identique dans toutes les directions ; or cette simplification paraît tout à fait abusive si l'on s'intéresse effectivement à la relation entre morphologie urbaine et conditions d'insolation, et donc à ses conséquences sur la disponibilité en lumière naturelle à l'intérieur du local.

En effet la présence d'un masque extérieur de taille importante au voisinage de l'ouverture va déplacer la répartition lumineuse à l'intérieur du local vers la zone de ciel vu ; inutile alors de s'interroger sur le coefficient de réflexion du mur opposé puisque son influence sera tout à fait négligeable... ; en revanche l'attention devra plutôt se porter sur la paroi qui fait face à la surface de ciel visible. A noter pourtant que les approximations précédentes, qui ont été effectuées dans le cas d'un vitrage clair, deviennent légitimes si le vitrage est parfaitement diffusant ; dans le cas d'un vitrage transparent, la lumière provient effectivement des sources primaires et secondaires (soleil, ciel et surfaces réfléchissantes extérieures), alors que dans le cas d'un vitrage parfaitement diffusant, il devient tout à fait acceptable de considérer qu'elle est issue de la surface du vitrage lui-même (faire « oublier » la nature et l'origine des sources est précisément la fonction première d'un tel vitrage)...

8.3.1.2 Le vitrage comme élément de transmission extérieur/intérieur

Mais de par son ambition à simuler certains des paramètres physiques des ambiances architecturales, le logiciel SOLENE ne peut se satisfaire d'une telle simplification : il paraît en effet essentiel d'assurer la continuité extérieur/intérieur dans le traitement du rayonnement solaire mais également dans celui du diffus puisque, comme on l'a déjà évoqué plus haut, la morphologie et les matériaux de l'environnement bâti ont une incidence sur la qualité des espaces intérieurs. De plus les aspects thermiques du bâtiment concernent précisément les interfaces que sont les parois en général, quel qu'en soit le matériau. Il s'agira donc de n'opérer aucune différenciation entre espace extérieur et espace intérieur, les deux n'étant séparés que par un médium (en fait un ou plusieurs vitrages) ayant des caractéristiques particulières ; quant au traitement des masques, il est globalement identique dans les deux cas, avec néanmoins une attention particulière s'il s'agit de faces correspondant à un vitrage (en ce qui concerne l'orientation de leur normale et la direction des rayons incidents notamment – voir la section 8.3.3 qui précise ces aspects). En revanche le traitement est alourdi par le fait que les caractéristiques du vitrage varient de manière importante avec la longueur d'onde du rayonnement qui vient le frapper.

8.3.2 Éléments caractéristiques d'un vitrage

Les fonctions que doivent assurer les prises de jour vitrées sont multiples : favoriser, à l'intérieur d'un local, la pénétration de la lumière naturelle, faciliter la vision vers l'extérieur, mais dans le même temps éviter l'éblouissement de ses occupants, les surchauffes en été, les déperditions calorifiques durant la saison froide, etc. ; finalement les nombreux paramètres à pendre en considération doivent parfois assumer des rôles et ré-

pondre à des besoins contradictoires. Si l'on se limite aux paramètres physiques susceptibles d'affecter la notion de confort intérieur, ils peuvent grossièrement se scinder en deux ensembles, le premier correspondant au positionnement et aux dimensions de la prise de jour – le « percement » de l'enveloppe –, le second aux caractéristiques du dispositif interface lui-même (le vitrage) :

- le positionnement de la prise de jour par rapport aux sources (soleil et ciel) et aux éléments du bâti environnant affecte la disponibilité potentielle en lumière naturelle eu égard à la morphologie du bâti ; pour ce qui concerne les aspects solaires, ce paramètre est connu sous le nom de facteur d'ensoleillement ; il prend le nom de composante directe du facteur de lumière du jour pour la lumière provenant de la voûte céleste (voir la section 5.3.3).

- les caractéristiques du médium traversé ; elles sont nombreuses (mécaniques, optiques, acoustiques, résistance au feu, etc.), mais au regard des aspects énergétiques et climatiques, seules sont intéressantes les caractéristiques fonctionnelles faisant intervenir les propriétés optiques du vitrage, dont trois d'entre elles (au moins) sont systématiquement fournies par les fabricants : le facteur solaire, le coefficient de transmission lumineuse et le coefficient de transmission thermique surfacique (Fig. 209.).

8.3.2.1 Le facteur d'ensoleillement

Le facteur d'ensoleillement traduit la proportion d'énergie solaire reçue effectivement par une paroi vitrée pendant l'ensemble de la période de chauffage, compte tenu de tous les obstacles de l'environnement à ce rayonnement solaire (relief, construction, végétation) ; il concerne les apports dus au soleil exclusivement. Il est traditionnellement (mais très approximativement ...) évalué sous la forme du quotient h/d, où h représente la hauteur de l'obstacle le plus important et d son éloignement par rapport au plan de la paroi vitrée (Fig. 207. gauche).

8.3.2.2 Le facteur solaire

Tous les fabricants de produits verriers utilisés dans le bâtiment fournissent le facteur solaire de leurs vitrages, en précisant s'il s'applique au vitrage seul ou à la totalité de l'ouverture (la baie vitrée comprenant le vitrage et les menuiseries). Ce coefficient est relatif aux aspects thermiques de cette interface, mais au regard cette fois des propriétés du matériau, c'est-à-dire son comportement (en réflexion, transmission et absorption) vis à vis de l'énergie solaire incidente. Le facteur solaire d'une paroi vitrée est défini comme l'énergie totale entrant dans le local à travers cette paroi, rapportée à l'énergie solaire incidente ; il correspond donc à la somme de deux termes : le flux transmis par le vitrage, et la fraction du flux absorbé par ce vitrage qui est ré-émise vers l'intérieur du local (Fig. 207. droite).

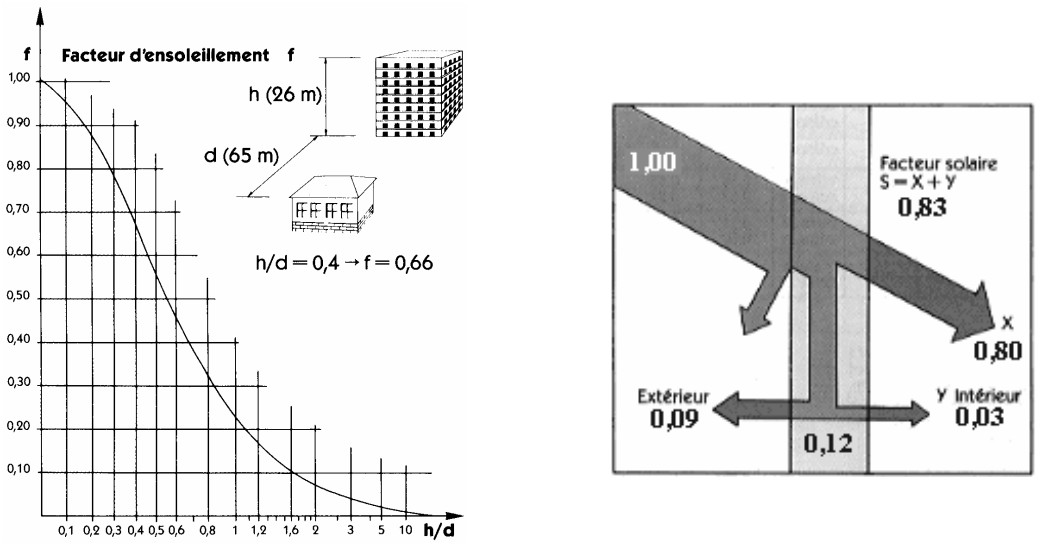


Fig. 207. A gauche, variation du facteur d'ensoleillement en fonction du quotient hauteur / éloignement ; A droite, le facteur solaire *FS* comme somme du flux transmis et de la partie ré-émise du flux absorbé ; il est clair que la partie transmise est prépondérante (environ 80% pour un double-vitrage conventionnel).

Nature du vitrage	Facteur solaire
Simple vitrage	0,88
Vitrage isolant classique	0,76
Vitrage isolant spécial (sels métalliques déposés par pyrolyse)	0,74

Fig. 208. Facteurs solaires des vitrages (source Saint-Gobain vitrage). A noter qu'il s'agit ici du vitrage « seul », c'est-à-dire sans châssis ; dans le cas de baies vitrées, le facteur solaire dépend également du type d'ouvrant et de son matériau, mais dans tous les cas, ce facteur solaire dépasse rarement 50%.

8.3.2.3 Le coefficient de transmission

Il s'agit du coefficient traditionnellement fourni en premier lieu par les fabricants (dans la mesure où c'est celui qui affecte de la manière la plus significative la quantité d'énergie pénétrant à l'intérieur d'un local), mais il est évidemment étroitement associé aux coefficients de réflexion et de transmission, l'énergie incidente ne pouvant être affectée que par l'un de ces trois coefficients (leur somme est donc égale à l'unité).

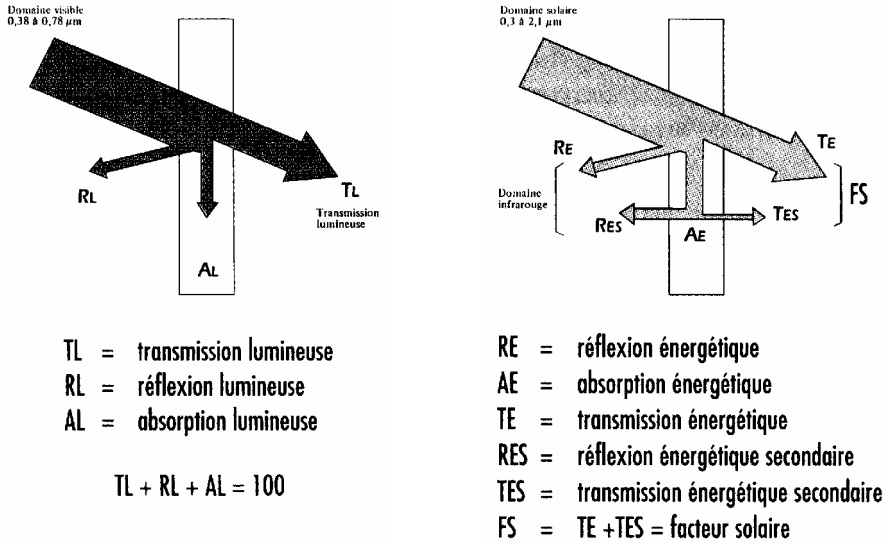


Fig. 209. Caractéristiques fonctionnelles d'un vitrage ; à gauche domaine visible, à droite ensemble du spectre.

Il est évident que les différents coefficients définis précédemment ont une incidence importante sur la température intérieure du local, et par suite sur son confort et sa consommation en énergie. Le facteur d'ensoleillement traduit la disponibilité du vitrage en terme de flux solaire direct (autrement dit les potentialités d'ensoleillement du vitrage), alors que le facteur solaire exprime, à partir de ce potentiel, la fraction qui parviendra effectivement à l'intérieur du local, compte tenu des caractéristiques du vitrage et de celles de l'ouverture (notamment de l'emprise des menuiseries et du type d'ouvrant). Le premier est donc un terme d'origine purement géométrique, lié à l'orientation de l'ouverture par rapport aux trajectoires solaires, à sa forme et à la morphologie des éléments du bâti, alors que le second résulte des différents éléments constitutifs de la prise de jour (nature du vitrage, épaisseur, position par rapport à la baie, matériau – et donc épaisseur – des menuiseries, et évidemment les propriétés optiques du vitrage).

Propriété	Verre clair ép. 3,2 mm	Film teinté à 35% sur verre clair		Film métallisé à 35% sur verre clair	
Réflexion solaire	8 %	7 %	Faible	43 %	Dans le visible et l'IR
Transmission solaire	87 %	55 %	Faible en UV Moyenne dans le visible Majeure partie dans l'IR	22 %	Un peu dans le visible Peu ailleurs
Absorption solaire	5 %	38 %	Majeure partie dans l'UV Beaucoup dans le visible Très peu dans l'IR	35 %	Majeure partie dans l'UV Un peu dans le visible Un peu dans l'UV
Total	100 %	100 %		100 %	

Fig. 210. Comparaison des propriétés solaires pour un verre clair seul et verre + film.

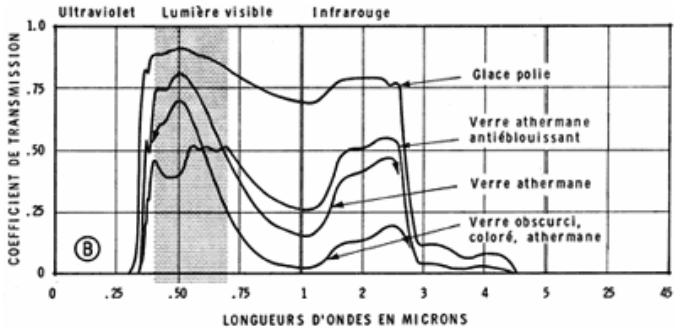


Fig. 211. Variation du coefficient de transmission, pour différents types de vitrages, en fonction de la longueur d'onde du rayonnement ; la partie grisée correspond au visible. (Verre *athermane* : verre laissant passer le spectre visible mais opaque aux infrarouges par dépôt d'une très fine couche métallique ; en raison d'un aspect de miroir semi-transparent, il est nommé plus couramment verre réfléchissant).

Dans le cas d'un verre clair et pour les longueurs d'onde du visible, l'interface vitrage n'a pas d'incidence sur la direction des rayons ; elle conduit simplement, comme le montrent la figure et le tableau qui précèdent, à leur affaiblissement lors du passage dans le médium qu'est le verre, affaiblissement susceptible de varier avec l'angle d'incidence des rayons lumineux. Par conséquent dans le cas où un objet transparent (un vitrage en l'occurrence) s'interpose entre les points *P* (le récepteur) et *S* (une source quelconque), on approche convenablement la contribution de la source en négligeant les réfractions et en pondérant l'intensité de cette source par l'absorption due à la distance parcourue par le rayon lumineux à l'intérieur du matériau ; elle sera donc affectée d'un coefficient de transmission dont la valeur pourra dépendre de l'angle d'incidence des rayons ; dans l'hypothèse où les vitrages sont multiples, l'affaiblissement global du rayon lumineux sera obtenu en effectuant le produit des absorptions dues à chacun d'entre eux.

La quantité d'énergie transmise par un vitrage va donc dépendre de ses caractéristiques géométriques (dimensions et épaisseur), du type de vitrage (clair, traitement de surface éventuels), mais aussi de l'inclinaison des rayons incidents par rapport à la normale au plan du vitrage ; la proportion transmise sera d'autant plus importante que le flux incident sera proche de la normale au vitrage (près de 90% pour un vitrage clair de bonne qualité).

Mitalas et Arseneault[125] proposent une formulation sous forme d'un développement en série de Fourrier, mais sans préciser la nature du vitrage (mais il paraît évident que la

[125] Mitalas G. P. et Arseneault J. G., *Fortran IV program to calculate absorption and transmission of thermal radiation by single and double glazed windows*, National Research Council, Ottawa, 1968.

proposition concerne un vitrage « classique », c'est-à-dire clair et d'une épaisseur de l'ordre de 4 à 5 mm) :

$$\tau_i = -0,028378 + 3,156075\cos i - 3,058376\cos^2 i$$
$$-1,428919\cos^3 i + 4,014235\cos^4 i - 1,775827\cos^5 i$$

où i est l'angle d'incidence en radians ; la transmittance à incidence normale vaut alors 0,88.

Une autre formulation classique (et relativement voisine de la précédente) fournit, dans le cas d'un vitrage clair, un facteur de transmission pour un angle quelconque rapporté à sa valeur dans le cas d'une incidence normale :

$$\tau_c(i) = 1.018 \cdot \tau_0 \cdot \cos i \cdot (1 + \sin^3 i)$$

où i est l'angle d'incidence en radians

et τ_0 le facteur de transmission à incidence normale.

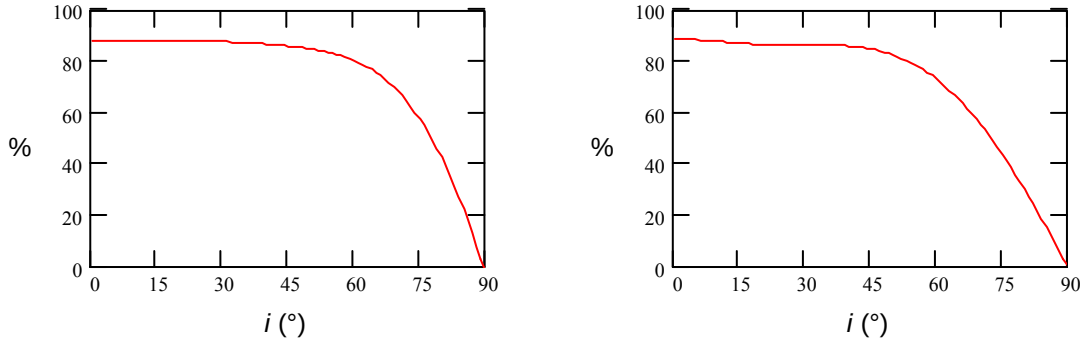


Fig. 212. Variation du facteur de transmission directionnel en fonction de l'angle d'incidence *i*, pour les deux formulations proposées ci-dessus (pour la seconde, la transmittance normale a été choisie égale à 0,88) ; on note des variations similaires dans les deux cas, avec un facteur de transmission quasiment constant jusqu'à 45° d'incidence, mais fortement décroissante au-delà d'une soixantaine de degrés.

Dans le cas d'une ouverture rectangulaire, Littlefair[126] propose, de manière à faciliter les calculs, une adaptation de la formulation de Mitalas et Arseneault afin de prendre en compte l'effet du vitrage (un type particulier de vitrage en fait) sur la composante de ciel ; la fonction polynomiale qui suit est valable pour un verre clair d'épaisseur 6 mm et fournit directement, pour la transmission, un facteur de correction qui vient affecter la valeur de la composante de ciel obtenue dans le cas d'une ouverture non vitrée.

[126] Littlefair P. J., *Effective glass transmittance under a CIE sky*, Lighting Research and Technology n°14 (4), pp 232-235, 1982.

$$T = 0,623 + 0,3\cos b - 0,137\cos^2 b + 0,51\cos a$$
$$- 0,66\cos a\cos b + 0,346\cos a\cos^2 b - 0,285\cos^2 a$$
$$+ 0,427\cos^2 a\cos b - 0,246\cos^2 a\cos^2 b$$

où a et b sont respectivement l'altitude et l'azimut du rayon incident (en radians).

8.3.3 Mode de résolution proposé dans SOLENE

Sur le plan de la mise en oeuvre et du traitement informatique, les problèmes majeurs liés aux vitrages ne sont finalement pas ceux exposés dans le paragraphe précédent. Le coefficient de transmission dépend effectivement de l'angle d'incidence du rayon *SP* sur la face vitrée (Fig. 213.), mais cette information est facilement disponible puisque les coordonnées des éléments de surface (de leur centre de gravité) sont connues. Comme on vient de la voir, cette variation n'est réellement sensible qu'à partir d'une incidence de 55 ou 60° ; en deçà le coefficient de transmission pourrait même être considéré comme constant, permettant ainsi d'éviter une certaine quantité de calculs.

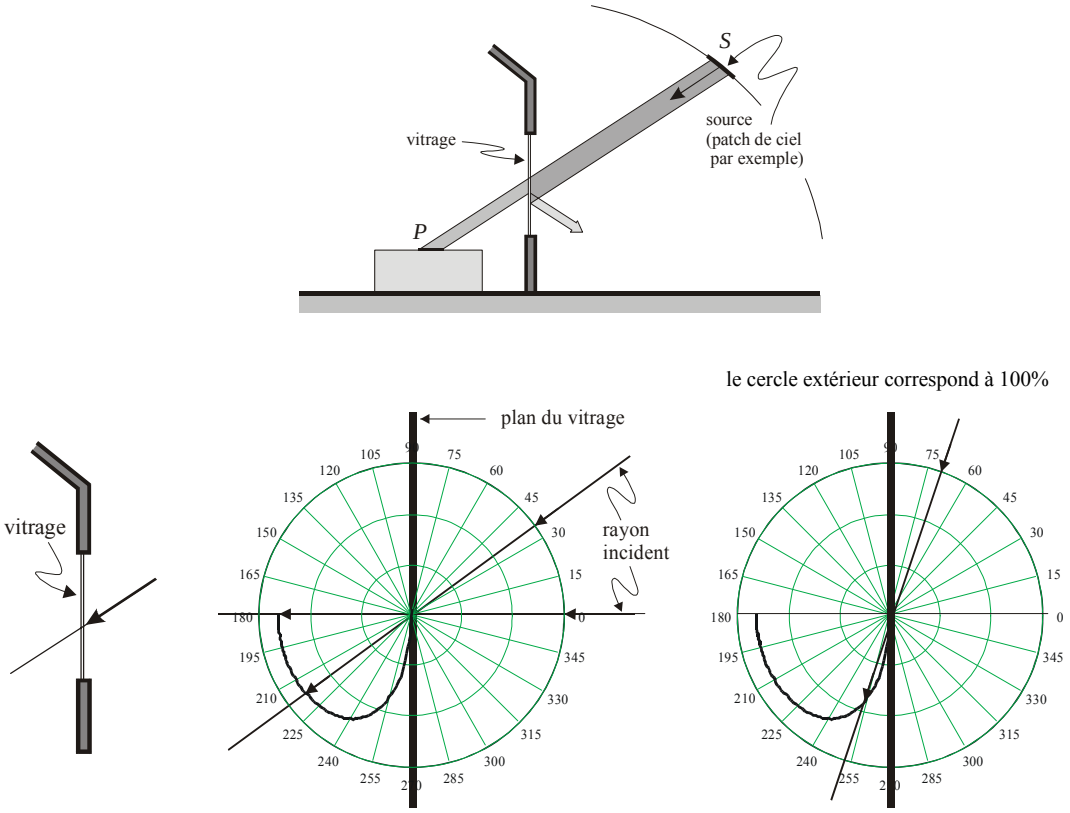


Fig. 213. Variation, pour un verre clair, de l'amortissement du rayon transmis en fonction de son angle d'incidence ; il demeure quasiment constant jusqu'à une incidence voisine de 60°, mais décroît rapidement au-delà de cette valeur.

En fait la difficulté provient des « attributs » géométriques à allouer au vitrage : il doit posséder le statut de « face » dans SOLENE (il ne s'agirait sinon que d'un simple percement), mais l'interrogation demeure quant au sens à attribuer à sa normale. Or la connaissance de cette orientation est essentielle pour la détermination des masques, puisque c'est précisément d'elle que résulte le statut de « face opaque » ou « percement ».

Ainsi pour un élément de ciel par exemple, l'opacité des murs des constructions, du sol, etc., résulte de l'orientation des normales de ces éléments vers « l'extérieur » ; en conséquence le vitrage doit avoir sa normale orientée vers l'intérieur du local afin d'y laisser pénétrer le rayonnement (moyennant un coefficient atténuateur pouvant être fonction de l'angle d'incidence). Mais lors du traitement des réflexions multiples, un élément de surface situé à l'intérieur du local est susceptible de réfléchir vers l'extérieur ; les normales des parois étant orientées vers l'intérieur, elles sont bien opaques pour l'élément en question ; en revanche le vitrage doit cette fois avoir sa normale orientée vers l'extérieur pour laisser passer le rayonnement, en contradiction donc avec la situation précédente...

En pratique le problème est contourné en dissociant les caractéristiques de surface des deux faces du vitrage, c'est-à-dire en le modélisant sous la forme de deux plans confondus orientés l'un vers l'extérieur du local, l'autre vers l'intérieur (Fig. 214.) ; à chacun des plans est attribué son propre matériau, assurant de fait une cohérence totale avec la réalité dans la mesure où de nombreux vitrages présentent cette hétérogénéité (par exemple une couche superficielle extérieure semi-réfléchissante). Le rayonnement incident sera finalement affecté par les caractéristiques de l'un ou l'autre des matériaux (transmission, réflexion, absorption) selon le sens de traversée de la paroi vitrée (à déterminer donc à chaque franchissement de la paroi vitrée).

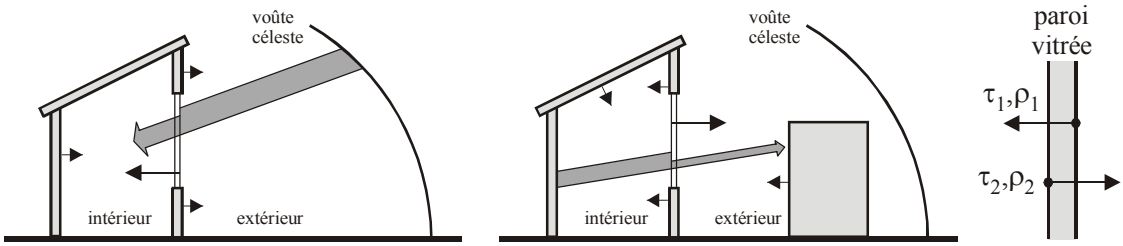


Fig. 214. Les vitrages sont considérés comme des faces « ordinaires » dont la normale varie en fonction du sens de franchissement. Les surfaces opaques (masques) sont affectées du coefficient de transmission 0, les surfaces vitrées amènent une réduction du flux qui correspond au coefficient de transmission du vitrage ; ainsi le flux provenant de la voûte céleste est affecté par le facteur τ_1 lorsqu'il pénètre à l'intérieur du local (à gauche), la partie réfléchie qui ressort l'est par τ_2 (à droite).

Les avantages de ce type de traitement apparaissent immédiatement : les multi-réflexions peuvent ainsi être traitées en considérant sous forme globale l'intérieur et l'extérieur, les parois vitrées ne venant plus séparer les domaines d'étude ; elles ne constituent plus que des faces « ordinaires », à ceci près qu'il est nécessaire de statuer sur le sens de leur franchissement. Le principe même présente l'intérêt supplémentaire de n'imposer aucune condition sur le nombre de parois vitrées dans le local, pas plus que sur leur forme ou leur orientation – il s'agit là également d'un avantage substantiel.

Enfin, comme il vient d'être évoqué, ce mode de traitement permet d'envisager la prise en compte de verres aux propriétés optiques complexes (vitrages sélectifs dont les caractéristiques sont en général fournies par les fabricants – Fig. 215.) ; dans ce cas une différenciation des longueurs d'onde devient indispensable (traitement par bandes).

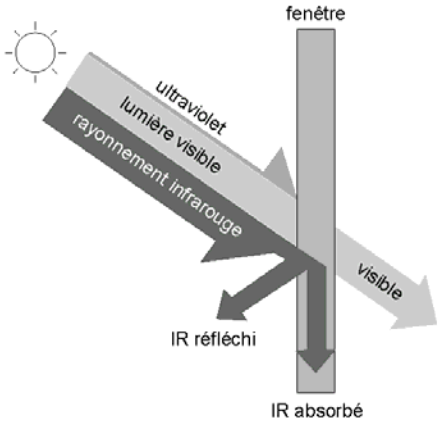


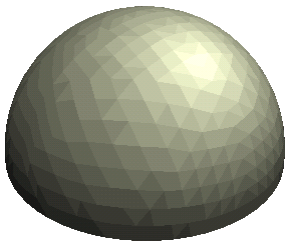
Fig. 215. Un vitrage parfaitement sélectif n'admet que la partie de l'énergie solaire utile pour l'éclairage ; il est transparent pour les longueurs d'onde du visible, opaque pour les autres.

Mais il ouvre également la voie des surfaces « multi-couches », où un matériau « transparent » de très faible épaisseur, possédant certaines propriétés optiques (spéculaire sous certaines incidences par exemple), vient recouvrir un substrat aux propriétés tout à fait différentes (essentiellement diffuses par exemple) ; c'est précisément le cas des vernis déjà évoqués à la fin de la section 7.3. L'intérêt est certes limité si l'on se situe dans l'environnement urbain, mais il devient évident si les simulations concernent des espaces intérieurs, susceptibles de comporter des surfaces (plan de travail, revêtements muraux, etc.) qui présentent ce type de caractéristiques...

8.3.4 Exemple de traitement

La rue d'Orléans étudiée précédemment va servir à nouveau de support d'illustration en ce qui concerne les vitrages ; il s'agit maintenant d'étudier la pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur d'un commerce du rez-de-chaussée au travers d'une arcade entièrement vitrée, avec prise en compte du ciel et des réflexions sur les prospects.

Les conditions d'insolation choisies dans cet exemple correspondent à un ciel couvert clair, c'est-à-dire avec une distribution affichant des luminances plus élevées dans les zones de ciel voisines de la position du soleil (1 et 0,35 pour les valeurs des coefficients ε et δ du modèle de Perez).



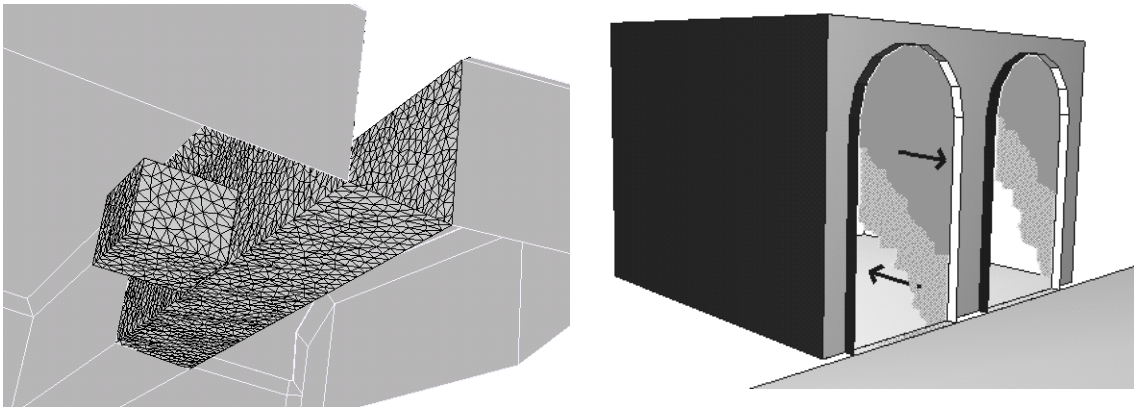


Fig. 216. À gauche le maillage des éléments prenant part à la simulation (vue de dessous) : le local commercial étudié ainsi qu'une partie de la rue d'Orléans (un tronçon d'une vingtaine de mètres de part et d'autre du magasin) ; les masques sont constitués des mêmes éléments, mais évidemment non triangulés. À droite le vitrage du local étudié (la façade sur rue a été supprimée ici), scindé en deux faces, l'une regardant vers l'extérieur, l'autre vers l'intérieur ; les deux faces des vitrages sont maillées également.

8.3.4.1 Éclairement direct

Ici l'éclairement direct provient exclusivement de la voûte céleste puisque le soleil est totalement masqué par la couverture nuageuse ; la majeure partie du magasin recevra un éclairement direct assez faible, et même nul vers le fond (aucun élément de ciel n'est visible depuis cette zone).

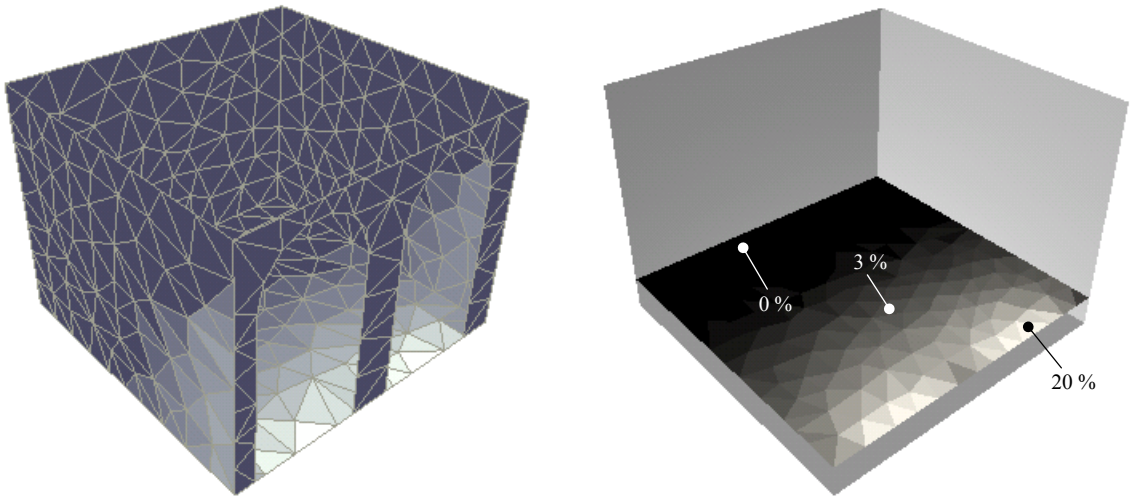


Fig. 217. À gauche la répartition des éclairements directs sur les parois du magasin (à 12 heures solaires) ; à droite la composante directe du facteur de lumière du jour sur un plan horizontal (hauteur 1 m) ; la simulation ne concerne ici que le plan horizontal, mais les masques sont identiques à ceux de la simulation précédente.

Les résultats ci-dessus (Fig. 17.) ont été obtenus à partir d'une version modifiée de la fonction *masques_ciel*, version qui tient compte du facteur de transmission du vitrage (choisi ici égal à 0,85 et identique pour les deux faces). L'essentiel des modifications appliquées à cette fonction réside dans l'attribution d'un coefficient de transmission à la totalité des masques de la scène ; un fichier descripteur des transmissions est donc associé au fichier de la géométrie des masques : les surfaces opaques se voient attribuer logiquement la valeur 0, alors qu'aux éléments de vitrage correspond celle de leur facteur de transmission (avec respect du sens de traversée) ; à noter que dans le cas où la scène ne comporte aucun vitrage (toutes les surfaces sont opaques), l'ensemble des surfaces appartenant aux masques a par défaut la valeur 0, et la fonction *masques_ciel* originale peut alors être employée.

La composante directe (ou composante de ciel) du facteur de lumière du jour dans le local (Fig. 17. droite) est obtenue en déterminant tout d'abord l'éclairement en provenance de la voûte céleste sur un plan horizontal fictif[127] (surface triangulée ayant un statut identique aux parois du local), puis en le rapportant à l'éclairement qu'aurait ce même plan dans un environnement sans masque (à l'aide des opérations qu'il est possible d'effectuer sur les descripteurs constitués).

[127] Fictif signifie que le plan en question ne participe pas aux réflexions multiples entre les éléments de la scène, qu'il « n'agit » donc pas sur la scène.

8.3.4.2 Facteurs de forme

Là encore, il est nécessaire d'utiliser une version modifiée de la fonction de calcul des facteurs de forme ; en effet le calcul du facteur de vue entre deux éléments de la scène peut donner lieu à la traversée d'un vitrage, auquel cas ce facteur de vue (entité géométrique) devra être pondéré par le facteur de transmission du vitrage ; à chaque facteur de forme doit donc être affecté un coefficient de visibilité « totale » (valeur 1), ou bien de visibilité « atténuée » (valeur égale au coefficient de transmission – une constante pour l'instant, qui pourrait être modulée par l'angle d'incidence de la droite joignant les deux éléments de surface avec la normale au vitrage). La fonction génère ainsi une seconde matrice, de taille identique à celle des facteurs de forme, qui sera, comme cette dernière, lue lors du traitement des radiosités.

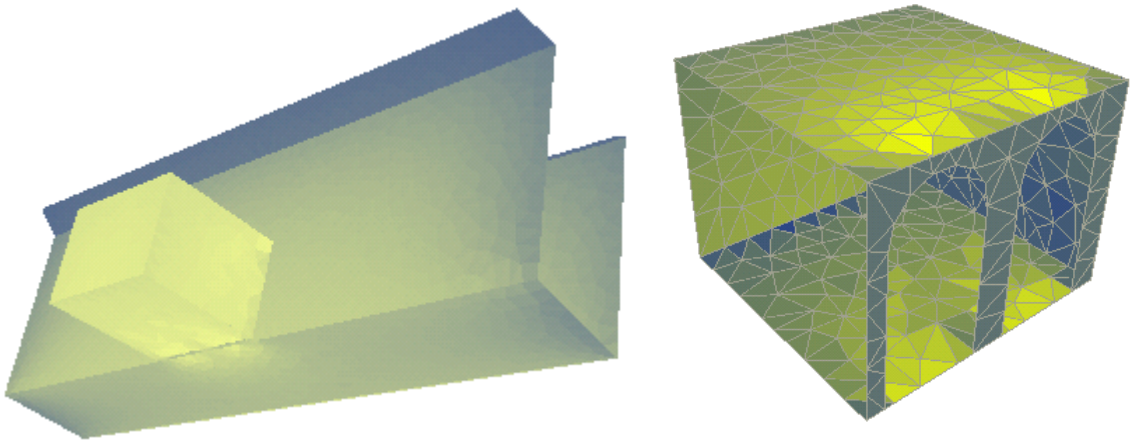


Fig. 218. À gauche une cartographie des facteurs de forme sur l'ensemble des surfaces de la scène ; à droite les mêmes facteurs de vue à l'intérieur du magasin seulement (dans les deux cas le gradient de couleurs s'étend de la borne inférieure à la borne supérieure de l'intervalle de valeurs).

8.3.4.3 Réflexions multiples

Comme on vient de le préciser, la fonction de calcul des radiosités doit, dans sa version modifiée pour la prise en compte des vitrages, lire les coefficients d'une seconde matrice, qui en quelque sorte fournit le « statut » du facteur de forme courant : une valeur unité si les deux éléments sont en vis-à-vis « direct », une valeur égale au coefficient de transmission du vitrage si les deux éléments en vis-à-vis sont séparés par une paroi vitrée, affaiblissant d'autant les échanges entre les deux éléments en question.

8.3.4.4 Plan fictif horizontal et facteur de lumière du jour

Parmi les questionnements relatifs à l'éclairement dans les locaux, l'éclairement disponible sur un plan horizontal fictif et le facteur de lumière du jour font partie des interrogations classiques ; cette information est disponible dans SOLENE à partir du moment où l'utilisateur a construit un plan horizontal fictif triangulé (*fictif* au sens où il ne participe pas aux réflexions avec l'environnement), symbolisant traditionnellement un plan de travail de hauteur 1 mètre : il s'agit alors de déterminer dans un premier temps l'éclairement dû à la voûte céleste, et en second lieu celui provenant des réflexions internes et externes ; l'éclairement sur le plan fictif en question est finalement obtenu par la sommation de ces deux descripteurs.

Le calcul de l'éclairement direct sur un plan horizontal a été effectué précédemment, et par conséquent donne immédiatement accès à la composante directe du facteur de lumière du jour ; quant aux composantes réfléchies par l'environnement (composante externe et composante interne, la première due essentiellement à la façade en vis-à-vis, et la seconde aux réflexions sur les parois du local), elles seront obtenues à partir de l'éclairement réfléchi par les différents éléments de surface de la scène ; or à ce point des simulations nous possédons cette valeur pour chacun des éléments de surface puisqu'il s'agit d'un descripteur généré lors du calcul des radiosités ; la fonction *ecl_plan_fictif_lum* permet ainsi de déterminer l'éclairement du plan fictif résultant des réflexions sur l'ensemble des surfaces de la scène (qu'elles soient externes ou internes, et en tenant compte des vitrages). Il ne reste plus, pour obtenir la somme des composantes réfléchies, qu'à rapporter cette valeur à l'éclairement du plan fictif en site dégagé, comme dans le cas précédent. Finalement le facteur de lumière du jour sera égal à la somme de la composante directe et des composantes réfléchies.

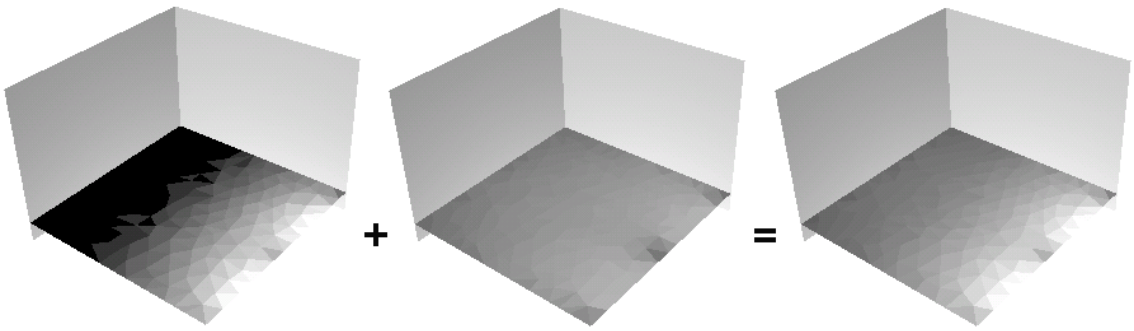


Fig. 219. Éclairement sur un plan horizontal fictif : de gauche à droite son éclairement direct (provenant de la voûte céleste), puis réfléchi par l'environnement (extérieur et intérieur, en tenant compte des vitrages), et enfin la somme de ces deux composantes. Le facteur de lumière du jour est obtenu en rapportant cette valeur à l'éclairement obtenu sur le même plan fictif en site dégagé.

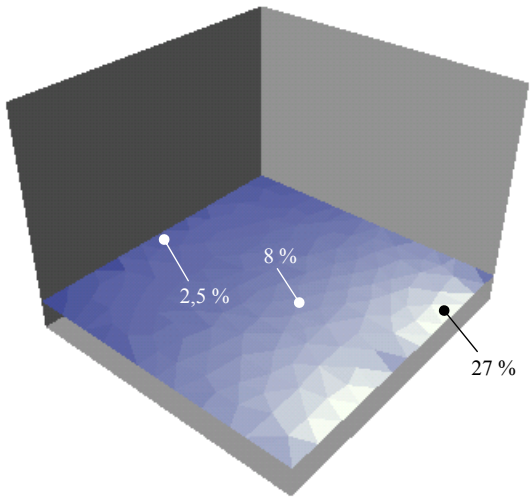


Fig. 220. Le facteur de lumière sur un plan horizontal (calculé ici dans le cas du ciel couvert clair) ; à noter que le gain dû aux réflexions sur l'environnement est loin d'être négligeable, la raison majeure étant les coefficients de réflexion élevés qui ont été choisis pour les différentes surfaces (0,8 pour les façades et les parois intérieures du magasin, 0,5 pour la rue, le sol du magasin et les toitures).

8.4 Autres applications

Outre les applications directes qui viennent d'être décrites, cette l'instrumentation développée peut sans doute aider à la mise en place d'indicateurs ou de descripteurs urbains pertinents, voire intéresser d'autres champs d'investigation ; dans la mesure où les lois physiques qui régissent les phénomènes sont similaires (diffusion sonore urbaine, caractérisation des champs radiatifs dans les espaces intérieurs par exemple), le traitement du phénomène de réflexions multiples restera totalement identique aux principes qui ont été exposées précédemment.

Sont proposés ici deux nouveaux exemples de simulations en site urbain pouvant être réalisées par le logiciel SOLENE (éventuellement hors de l'interface, donc directement en mode commande), et susceptibles d'apporter des éléments quant à la caractérisation d'un site. Le premier concerne son potentiel sur le plan lumineux ; le second s'oriente plutôt vers les notions de confort dans la mesure où il s'agit d'un indicateur de visibilité (portion de ciel visible depuis un point, périodes de passage du soleil dans cette zone), aspects relevant plutôt de la psychologie mais que l'on sait faire partie des éléments).

8.4.1 Cartographie des potentialités d'éclairement d'un site

Parmi les indicateurs possibles relatifs aux paramètres physiques des ambiances urbaines, on peut imaginer une expression représentant le pourcentage de ciel vu depuis un

point de la scène (en fait un élément d'aire infinitésimale *j*) rapportée à l'aire maximale potentiellement visible depuis ce point s'il n'y avait aucune obstruction, c'est-à-dire l'hémisphère entier, soit 2π stéradians (Fig. 221.).

Le pourcentage de ciel vu, pour un élément *j* de la scène, s'exprime alors sous la forme :

$$\%vu_j = \frac{100}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot \omega_i$$

où n est le nombre d'éléments de ciel.

À noter que dans ce cas tous les éléments de ciel ayant le même « statut », ce pourcentage exprime finalement les potentialités d'éclairement de la scène dans le cas d'un ciel uniforme. À remarquer également que l'on ne tient pas compte ici des orientations relatives de la surface d'observation et de l'élément de ciel visé ; ainsi dans le cas d'une cour urbaine fermée (Fig. 221., à gauche), un point proche des angles intérieurs voit la même surface de ciel, qu'il appartienne au sol ou à une façade. Par contre, l'énergie reçue par les faces verticales sera moindre (la moitié environ[128] dans notre exemple), puisque sa normale est toujours assez éloignée de la direction des normales aux éléments de ciel. Au contraire les surfaces horizontales reçoivent une partie importante de l'énergie du ciel sous une incidence proche de la normale (dans le premier cas les valeurs du cosinus entre normale à la surface et direction des rayonnements incidents varient approximativement de 0 à 0,75, dans le second plutôt de 0,65 à 1).

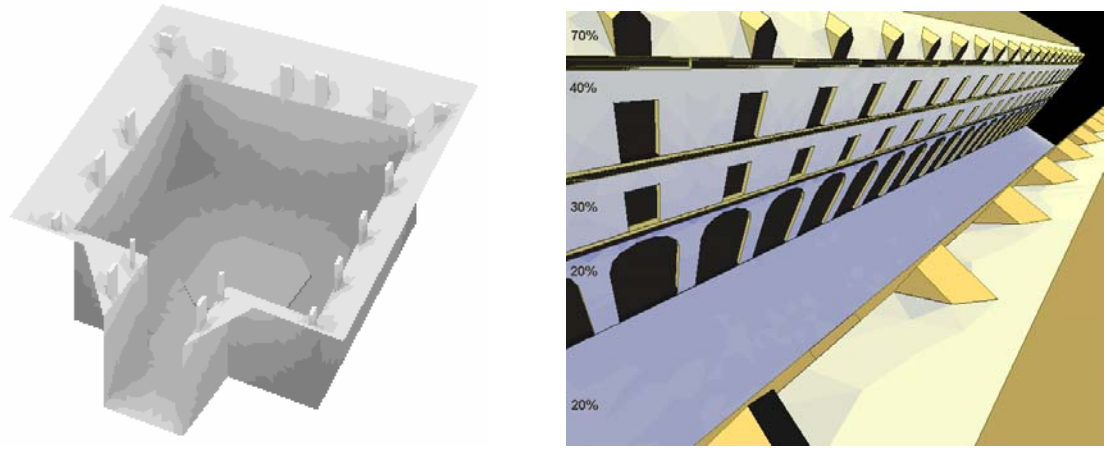


Fig. 221. Potentialités d'éclairement : à gauche d'une cour urbaine, à droite de la rue d'Orléans.

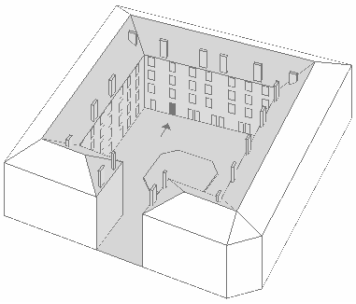
[128] Dans l'hypothèse où il n'y a *aucune obstruction*, l'énergie reçue par une face verticale vaut *exactement* la moitié de celle dont dispose une face horizontale.

8.4.2 Indicateur de visibilité : fragments de ciel visible depuis un point quelconque de l'environnement

Il s'agit ici de représenter sur l'hémisphère céleste les éléments de ciel vus depuis un point particulier de l'environnement. En superposant à cet indicateur la distribution des luminances sur la voûte céleste à un instant donné, il devient possible de cartographier, toujours sur la voûte hémisphérique, la distribution de la partie de ciel vu depuis n'importe quel point de la scène (en tenant évidemment compte des obstructions éventuelles).

Il est également possible de superposer à la portion de ciel visible les trajectoires solaires, par pas de temps, pour des dates données (Fig. 223.). On peut ainsi déterminer facilement, pour un observateur assis dans une pièce par exemple, la portion de ciel qu'il verra depuis son poste de travail, de même que, éventuellement, l'intervalle temporel de visibilité de l'astre solaire pour une ou plusieurs dates. L'exemple ci-dessous propose ainsi une cartographie de cette distribution pour un observateur situé au nu d'une ouverture du rez-de-chaussée, au fond de la cour ; y sont superposées les trajectoires solaires aux équinoxes et aux solstices, donnant ainsi directement les périodes de visibilité de l'astre solaire depuis le point en question.

Ce dernier aspect présente un intérêt évident si l'espace considéré suppose un travail à poste fixe, où l'irradiation solaire peut devenir intolérable soit par échauffement du corps, soit par gêne visuelle ; le problème est peut-être moins sensible dans un logement, où de telles nuisances peuvent être évitées (ou tout au moins limitées) par le seul déplacement des usagers.



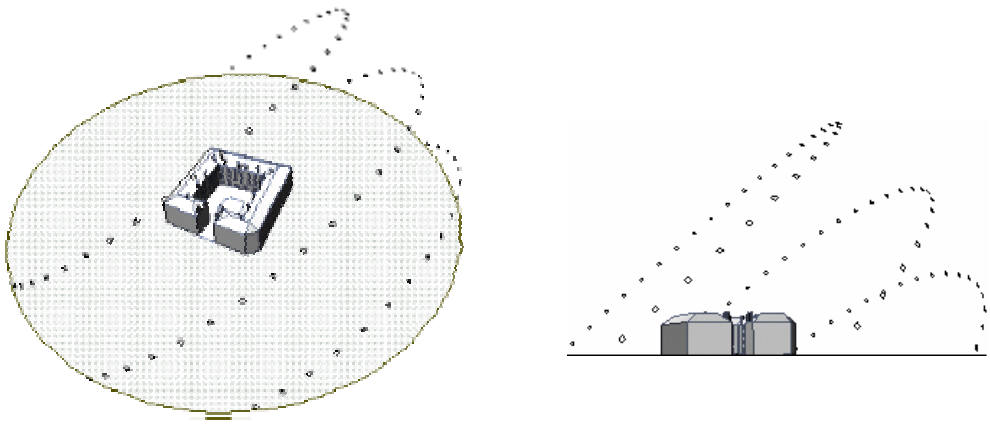


Fig. 222. Trajectoires solaires aux équinoxes et aux solstices pour la cour urbaine.

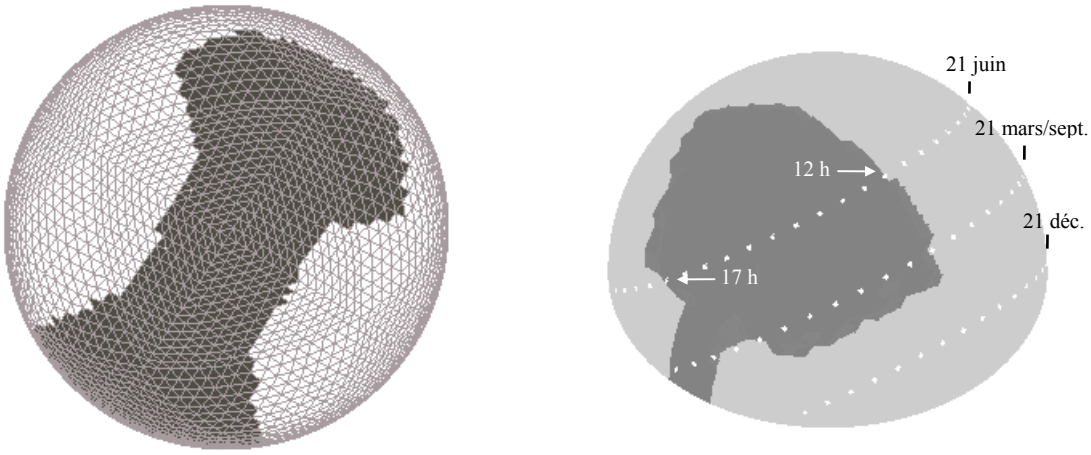


Fig. 223. À gauche les zones de ciel vues depuis le centre de la cour ;
à droite les parties de ciel visible depuis l'une des ouvertures du rez-de-chaussée
d'une cour urbaine (se référer à l'ouverture noircie de la vignette en haut à droite), et
les différentes positions du soleil (par pas de temps de ½ heure) aux équinoxes et aux solstices.
Il est immédiatement lisible qu'à la fin du mois de juin par exemple, l'observateur
aura le soleil dans son champ visuel entre 12 et 17 heures ; en revanche il ne le verra
jamais durant une période qui s'étend approximativement de novembre à février.

8.4.3 Éclairement reçu sur un plan horizontal fictif ; facteur de lumière du jour

Les détails correspondant à leurs principes de calcul ont été donnés dans l'exemple relatif aux vitrages (section 8.3.4). Ils ne sont mentionnés ici qu'à titre de rappel, en tant qu'applications des outils de simulation développés.

8.4.4 Conclusion

Les quelques exemples qui viennent d'être développés montrent que les potentialités de l'ensemble logiciel SOLENE sont importantes, en raison précisément de l' « ouverture » des différentes procédures. À ce titre l'exemple du facteur de lumière du jour paraît significatif : il n'existe pas de fonction permettant de calculer directement ce paramètre, mais il est obtenu à partir de sa définition même, et donc de la « fabrication » des descripteurs intervenant dans son calcul (à noter qu'une automatisation des procédures à mettre en œuvre est tout à fait envisageable, mais il paraît essentiel de ne pas perdre l'accès aux différents éléments constitutifs, ceux-ci pouvant servir de paramètres d'entrée à d'autres simulations).

On peut encore citer, grâce à l'accès aux bases de données produites par les simulations, la mise en œuvre des applications suivantes :

- la détermination de la distance entre éléments de surface de l'urbain, permettant ainsi de cartographier aisément les éléments tridimensionnels situés à une distance particulière d'un point donné ; cet aspect est susceptible d'intéresser des problèmes de visibilité en atmosphère trouble (brouillard, poussières, etc.), ou encore la diffusion de polluants en zone urbaine par exemple...

- la détermination de l'orientation relative de deux éléments de surface, notion indispensable pour la mise en œuvre des fonctions de réflexion bidirectionnelles (voir les BRDF à la section 7.3), puisque le facteur de réflexion d'une surface est précisément fonction de l'angle du rayon incident et de la direction dans laquelle est évalué le flux réfléchi.

- l'orientation relative des éléments de surface et leur éloignement interviennent également dans le traitement des problèmes d'éblouissement...

8.5 Quelques remarques à propos de la validation

Les problèmes de validation n'ont pas été discutés jusqu'alors ; cette phase est pourtant indispensable, quelle que soit la discipline concernée, à la vérification de la pertinence et de l'exactitude du ou des modèles construits. Avant de préciser les modalités de validation que nous avons utilisées, quelques remarques préalables s'imposent, précisant notamment les paramètres intéressés par cette validation.

Deux domaines principaux sont concernés : les modèles de ciel et le modèle radiatif d'échanges :

- les modèles de ciel sont statistiques, extrapolés à partir de mesures effectuées en un site donné ; ces modèles continuent donc à être évalués au regard de conditions d'insolation différentes, ou plus exactement dans des lieux différents (en effet les conditions d'insolation définies par les modèles statistiques en fait sont valables universellement, seule leur fréquence d'occurrence peut varier considérablement avec le lieu) ; c'est évidemment le cas du modèle de Perez, pour lequel paraissent régulièrement[129] des comparaisons entre le modèle et les données effectivement recueillies en un lieu donné ; les dernières dont nous ayons connaissance concernent le Japon et Singapour...

[129] Essentiellement in *Lighting Research and Technology*.

- le modèle radiatif d'échange entre éléments de surface n'est pas discutable en tant que tel ; plutôt que le modèle physique en lui-même, ce sont davantage des problèmes de précision dans les calculs numériques itératifs et surtout dans le calcul des facteurs de forme qui sont à considérer. Une autre source d'incertitude concerne le choix des coefficients de réflexion des surfaces, considérées dans cette recherche comme lambertiennes ; à ce propos on a montré qu'une amélioration sensible de la précision est attendue avec les modèles de réflexion bidirectionnelle décrits à la fin du chapitre 7.

Traiter de la validation de ces aspects est hors de notre propos (mise en œuvre d'un matériel et d'un temps considérables pour le premier point, travaux déjà effectués pour le second). En revanche il est possible de vérifier la cohérence des résultats fournis par les simulations, et notamment que le modèle radiatif est effectivement pertinent dans l'environnement urbain. C'est à cette première phase de validation que nous avons procédé, qu'il sera sans doute nécessaire de prolonger par des investigations plus complètes.

Aussi avons-nous recherché, plutôt qu'une correspondance en termes de valeurs d'éclairement absolues, à comparer simulations et mesures *in situ* pour plusieurs configurations : les différences d'éclairement mesurées, pour deux points distincts de l'espace et pour un ciel donné, correspondent-elles aux différences calculées ? La cohérence est est-elle assurée pour des conditions d'insolation éloignées (ciel serein, avec présence du soleil donc, et ciel couvert) ?

Les tableaux ci-dessous résument les données résultant des simulations et celles fournies par les mesures *in situ*, à partir de l'exemple urbain étudié précédemment (la rue d'Orléans), et pour des conditions d'insolation qui sont précisées dans les légendes des tableaux.

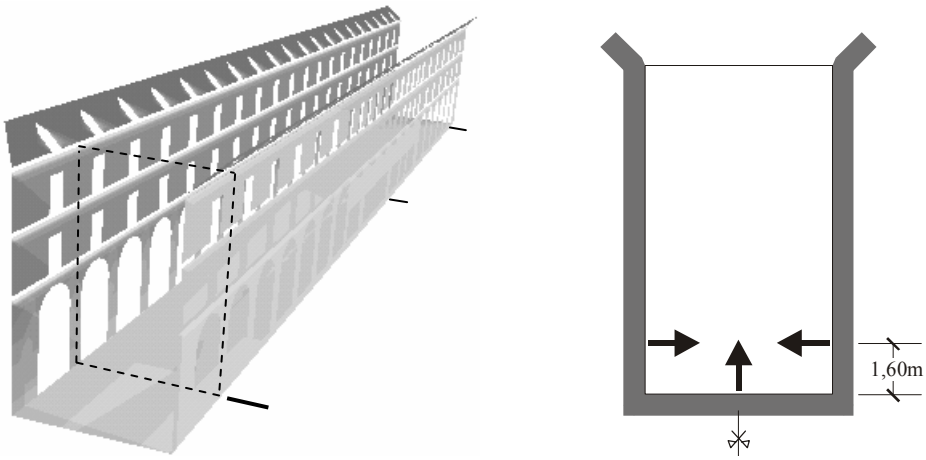


Fig. 224. Les mesures ont été effectuées dans trois plans perpendiculaires à la rue, au centre et aux extrémités de celle-ci (entre la première et la seconde arcade) ; trois mesures ont été relevées dans chacun de ces plans : une au milieu de la rue vers le zénith, normalement à chacune des façades à une hauteur de 1,60m environ.

Façade nord, mesure effectuée à une hauteur de 1,60m	4000	3500	5200
	5000	5200	6500
Milieu de la rue, mesure effectuée au niveau du sol	12300	11500	14800
	13500	13000	15500
Façade sud, mesure effectuée à une hauteur de 1,60m	3900	3600	5200
	5200	4800	6500

Fig. 225. Cas d'un ciel couvert clair, à 15h30 heure solaire (valeurs en lux) ; en haut les valeurs mesurées sur le site, en bas les valeurs calculées par SOLENE – à noter que la valeur du descripteur courant est, pour un élément de surface donné, obtenue par sélection de celui-ci dans la fenêtre de visualisation interactive OpenGL.

Façade nord, mesure effectuée à une hauteur de 1,60m	30500	28000	32000
	38000	35000	40000
Milieu de la rue, mesure effectuée au niveau du sol	19000	15000	21000
	23000	19000	25000
Façade sud, mesure effectuée à une hauteur de 1,60m	7000	5200	8300
	10000	9000	11000

Fig. 226. Cas d'un ciel serein pour la simulation, plutôt intermédiaire sur le site, à 10h30 heure solaire (valeurs en lux) ; en haut les valeurs mesurées sur le site, en bas les valeurs calculées par SOLENE.

Il paraît évident que ces premiers résultats ne peuvent constituer une validation suffisante, et qu'il faille procéder à des comparaisons plus nombreuses et plus élaborées ; ils montrent toutefois que les distributions calculées affichent des variations similaires aux mesures effectuées sur le site.

Enfin une autre forme de « validation », ou plus exactement de confrontation aux objectifs concerne – tout à fait en dehors du domaine scientifique cette fois –, la capacité de l'outil à être utilisé par l'architecte... Il faut bien reconnaître que cet aspect, annoncé comme l'un de nos objectifs en introduction, est resté nettement en deçà de nos espérances ; SOLENE reste certainement assez délicat à utiliser pour le non-initié, mais malgré la multiplicité et la complexité des problèmes traités, il l'est sans aucun doute beaucoup moins que ne le sont les produits « grand public » de la CAO-DAO ou de l'imagerie de synthèse, largement plébiscités par les étudiants architectes ou les agences ; il possède simplement les défauts – et les qualités ! – inhérents à la plupart des produits issus directement de la recherche...

► Instrumentation ; traitement des vitrages : notre contribution

Sans prétendre à l'exhaustivité, les aspects instrumentaux et plus particulièrement le traitement des vitrages viennent, au travers des applications proposées, d'être décrits en mettant notamment l'accent sur l'enchaînement des différents procédures de simulation. Notre contribution est de deux ordres principalement, l'un ayant trait au mode de résolution du problème des vitrages proprement dits, l'autre à la constitution d'indicateurs simples mais néanmoins significatifs :

- De par son potentiel, notre proposition quant à la résolution du problème de l'interface des vitrages vient combler une lacune importante du logiciel SOLENE, sans imposer de limitations particulières quant à leurs propriétés géométriques ou optiques ; de par son originalité, le mode de résolution proposé ouvre la perspective du traitement de matériaux complexes, et plus particulièrement de nombreux produits verriers actuels, dont les caractéristiques sont fondamentalement différentes selon le sens de traversée des rayons lumineux ou visuels, leur objet étant précisément de corriger une ou plusieurs propriétés liées à l'énergie et au confort (par exemple rendre réfléchissant un vitrage dans un but de protection solaire).

- Les indicateurs complémentaires développés, qui ne sont pas à proprement parler des fonctions du logiciel puisqu'ils ne sont pas immédiatement accessibles depuis l'interface (ils fonctionnent en mode commande) constituent plus exactement des propositions ou des exemples des informations qu'il est possible d'extraire des fichiers résultats créés lors des simulations. La mise en comparaison de tels indices dans des tissus urbains différents est susceptible de dégager, par exemple, des similitudes dans leur organisation spatiale ; à l'inverse, il pourrait être intéressant d'analyser si une valeur particulière de ces indices est caractéristique d'une typologie particulière.

▼ Les exemples traités dans les pages qui précèdent referment, en ce qui concerne le présent rapport, l'exposé des développements réalisés tout au long de cette recherche ; mais comme on l'a déjà précisé plus haut, ceux-ci ont permis d'ouvrir de nouvelles voies d'exploration, et sont par conséquent loin d'être clos ; on en donne quelques perspectives dans le chapitre de conclusion qui suit.

9 Conclusions et perspectives

9.1 Éléments de conclusion

> *« La simulation est une solution valable pour la connaissance du patrimoine historique et une aide à la prise de décision dans les processus de réhabilitation. Il est nécessaire de dépasser les méthodes basiques qui ne prennent en considération que les aspects solaires ou, en ce qui concerne la lumière diffuse, le ciel couvert uniquement*[130]*».*

Nous reprendrons à notre compte cette phrase, en observant que le domaine restreint dans lequel elle semble se situer correspond aux champs d'intervention privilégiés de son auteur ; nous préciserons donc que la simulation numérique ne se limite certainement pas à ce seul champ d'application, mais qu'elle embrasse tout autant les constructions actuelles, le secteur de l'expérimentation, etc., certes avec des problèmes et des contraintes différents. L'intérêt de cette citation provient essentiellement du fait qu'elle émane d'un praticien confronté quotidiennement à la problématique complexe de la disponibilité en lumière naturelle dans les tissus urbains anciens, réputés assez pauvres dans ce domaine.

À entendre d'autres propos similaires, il paraît manifeste qu'il émane, de la part d'un certain nombre de maîtres d'œuvre, un besoin d'outils performants susceptibles de traiter des conditions complexes, à la fois sur le plan de la géométrie et sur celui des conditions d'insolation ; en effet, il existe à l'heure actuelle un assez grand nombre d'outils logiciels dans le domaine de l'éclairagisme, mais qui pour la plupart traitent avant tout de l'éclairage artificiel ; en revanche il en existe très peu dans le domaine de l'éclairage naturel, et ceux-ci restent surtout implantés dans le monde de la recherche, principalement en raison des préoccupations relativement récentes portées à l'utilisation de la lumière du jour.

C'est pourquoi, à partir de différents axes d'investigation (la physique du rayonnement, la modélisation des conditions d'insolation, l'informatique graphique, etc.), nous avons présenté dans ce rapport les différents éléments théoriques nécessaires à la constitution de la partie instrumentale d'un nouvel outil logiciel ; celui-ci a pour objet d'analyse des configurations urbaines et des espaces intérieurs au regard des énergies diffuses, en provenance de la voûte céleste d'une part, des autres surfaces de l'environnement d'autre part. Les travaux relatifs aux paramètres physiques des ambiances architecturales et urbaines nécessitent finalement les compétences conjointes de plusieurs champs disciplinaires. Ils tentent d'en articuler les différents savoirs de manière à constituer des

---

[130] In *Simulation of Baroque Religious Buildings (The Church of Saint Louis of the Frenchmen, Sevilla)*, J. M. CABEZA, J. M. ALMODOVAR, G. PULIDO, Proceedings of PLEA'98, Lisbon.

connaissances nouvelles dans le domaine des relations entre forme construite et environnement physique – et notamment à mettre en évidence l'existence éventuelle d'interactions entre forme urbaine et aspects micro-climatiques.

Ces relations ont été traitées ici sous l'angle particulier du rayonnement lumineux, mais il est évident que la problématique est beaucoup plus vaste et englobe bien d'autres disciplines (de l'acoustique urbaine aux sciences sociales...).

La base instrumentale ainsi développée, prenant en compte les aspects diffus au sein de l'environnement urbain, paraît donc constituer une avancée significative dans le champ de l'instrumentation numérique dédiée à l'architecture, venant compléter ceux de la représentation, de l'imagerie ou de la physique constructive ; elle est de plus susceptible de dégager certaines typologies des tissus urbains, et d'autre part, malgré « l'aridité » de la simulation informatique, affiche une préoccupation évidente vis-à-vis de l'individu dans la mesure où elle concourt à mettre en évidence certains déterminants physiques menant à son inconfort, au regard des paramètres lumineux toujours.

Il faut en outre remarquer que l'instrumentation développée intéresse d'autres champs d'investigation : on peut citer par exemple la diffusion sonore urbaine, ou encore les échanges radiatifs dans les espaces intérieurs et extérieurs, etc., pour lesquels les lois physiques qui régissent les phénomènes sont similaires à celles mises en oeuvre dans l'éclairement. L'adaptation des codes de calcul à ces domaines particuliers paraît possible sans difficultés majeures.

9.2 Perspectives

Comme déjà précisé en fin d'introduction, les développements opérés sur SOLENE ont finalement dépassé les objectifs que nous nous étions fixés à l'origine, en grande partie en raison d'une conception très ouverte du logiciel. Chaque procédure étant pratiquement accessible de manière autonome, il est relativement aisé d'en adjoindre de nouvelles, sans modification aucune de l'existant ; ainsi les codes utilisés pour le traitement des réflexions multiples, dans la mesure où ils sont basés sur les principes des échanges thermiques, ont pu être facilement adaptés et ont d'ores et déjà permis d'engager, par des chercheurs du CERMA, des travaux à propos du rayonnement thermique dans l'environnement urbain [2] (réutilisation des facteurs de forme et du modèle de radiosité notamment, pour des problèmes de micro-climatologie urbaine).

D'autres développements, concernant toujours les interactions avec des phénomènes liés à la physique du bâtiment, sont envisagés à court terme : parmi eux notamment le contrôle des pertes thermiques et des gains solaires au travers de l'enveloppe.

Nous citerons pour terminer trois directions d'investigation déjà engagées, susceptibles d'améliorer encore le potentiel de l'outil logiciel. La première d'entre elles est sans

doute la plus importante car elle permet de se soustraire à l'hypothèse initiale de surfaces parfaitement diffuses, hypothèse pourtant plausible dans la mesure où la plupart des matériaux de construction répondent à ce critère ; mais l'utilisation de plus en plus importante d'éléments métalliques, de produits verriers aux caractéristiques complexes, etc. modifie sensiblement la part de matériaux auxquels il est possible d'attribuer une réflexion de type diffus exclusivement. Il devient donc nécessaire de traiter les autres modes de réflexion, de manière à prendre notamment en compte les réflexions spéculaires, et plus particulièrement les phénomènes d'éblouissement qui en résultent ; ces questions de l'ordre du confort des usagers constituent le second aspect des investigations projetées à court terme.

- ***Autres modes de réflexion : du diffus au spéculaire***

Les travaux en cours sont relatifs à la mise en place du traitement des réflexions autres que diffuses (depuis le parfaitement diffus jusqu'au spéculaire idéal), en intégrant les fonctions directionnelles de réflexion des matériaux. Les développements théoriques afférents ont été proposés au chapitre 3., mais restent à expliciter sur le plan algorithmique, ainsi qu'à intégrer de manière opérationnelle dans le logiciel SOLENE. Finalement le problème majeur ne réside pas tant dans la « fabrication » du modèle numérique censé décrire les conditions de réflexion (même si ces fonctions sont complexes, il en existe maintenant plusieurs qui semblent donner satisfaction), mais plutôt dans la constitution de la « base de matériaux », et plus précisément au niveau de la correspondance précise entre les coefficients fournis au modèle mathématique et le matériau réel. L'infographie a souvent procédé de manière inverse, à savoir qu'elle adaptait les différents coefficients du modèle en fonction du résultat visuel désiré.

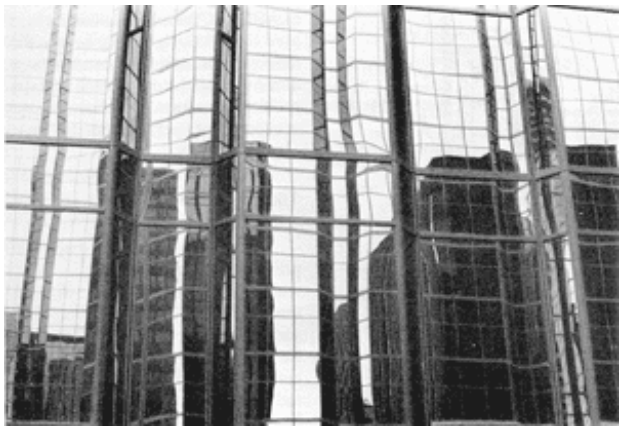


Fig. 227. Réflexion de l'environnement dans un mur rideau en verre.

Plusieurs modèles analytiques de fonctions de réflexion ont été développés depuis une dizaine d'années (certains d'entre eux totalement empiriques – le très connu modèle de Phong par exemple –, d'autres effectivement basés sur les lois de la physique, comme exposé au chapitre 3.). Mais il semble que la communauté infographique s'oriente à l'heure actuelle, pour accroître encore le réalisme de ses images, vers des bases de données constituées par la mesure du facteur de réflexion de matériaux réels. Cet aspect nous intéresse évidemment au plus haut point puisqu'il permettrait d'effectuer les simulations avec les « véritables » matériaux de la construction, l'objectif étant notamment le traitement des aspects relevant du confort visuel. A noter si que l'idée n'est pas nouvelle, elle n'est rendue envisageable aujourd'hui qu'en raison des progrès de la technologie informatique.

- *Éblouissement et confort visuel*

La mise en place des réflexions spéculaires permettrait également de traiter convenablement les aspects relatifs à l'éblouissement, qui, même s'il reste soumis à des facteurs d'appréciation personnel, est une notion qui a été définie très précisément (par la CIE notamment) : sont distinguées assez précisément les notions d'éblouissement *inconfortable*, d'éblouissement *perturbateur*, et ils ont même été quantifiés.

L'éblouissement peut avoir des causes diverses, mais elles sont bien identifiées : La présence, dans le champ visuel, d'une ou plusieurs sources de luminances particulièrement élevées, qui saturent les capacités de perception de la rétine (vision directe des sources lumineuses ou réflexion sur les surfaces qu'elles éclairent, d'où la nécessité du traitement spéculaire), ou encore la présence, dans le champ visuel, de contrastes lumineux trop importants. D'autre part son risque d'occurrence est principalement lié à l'orientation de la source par rapport à la « normale » à l'œil, c'est-à-dire la direction du regard à l'infini. En conséquence les formulations qui permettent de quantifier l'éblouissement sont en général fonction de la luminance de la source, de l'angle solide sous lequel cette source est vue depuis l'œil, et de la luminance des éléments situés en arrière de la source (le « fond » sur lequel la source lumineuse se détache).

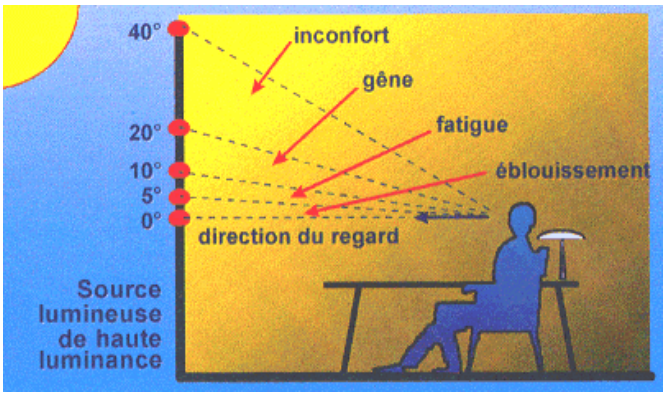


Fig. 228. Confort visuel (source : *Guide de l'Architecture bioclimatique*).

Pratiquement il s'agira donc de déterminer, pour l'ensemble des surfaces vues depuis un point donné de l'espace (l'œil), les niveaux de luminances les plus élevées et de les comparer aux éléments de surface voisins, tout en restant dans un cône de vision relativement étroit (quelques degrés – Fig. 228.) ; *a priori* une projection sur un plan perpendiculaire à la direction du regard avec, dans un angle solide limité, comparaison des luminances des éléments adjacents devrait permettre de progresser vers la solution...

- ***Végétation***

Nos préoccupation vis-à-vis de la lumière diffuse en milieu urbain ne peuvent éviter le traitement des masques dus à la végétation (arbres principalement), occultations variables de manière périodique (saisonnière), mais également sur des durées beaucoup plus importantes (phénomène de croissance). Quelques pistes ont d'ores et déjà été envisagées à partir des travaux de Wilkinson[131](à l'exclusion d'une véritable modélisation tridimensionnelle du feuillage[132], extrêmement lourde à gérer au sein d'un environnement urbain, lui-même très conséquent).

Le feuillage des arbres masquant partiellement le ciel, leur luminance lumineuse est fonction de l'éclairement lumineux reçu par le feuillage, de son facteur de réflexion, de la « quantité de ciel » visible à travers l'enveloppe de ce feuillage, et finalement de la luminance de la voûte céleste (Fig. 229.).

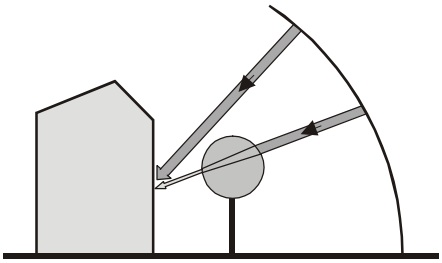
Si en première approximation les arbres sont modélisés comme des surface de révolution d'axe vertical (sphère, cône, cylindre + cônes, etc.), il est possible d'adopter, pour chaque rayon traversant cette sphère, un coefficient réducteur correspondant à la fraction de ciel couverte par l'arbre en question ; Wilkinson donne quelques valeurs typiques de cette fraction pour des feuillages de diverses essences d'arbres adultes (Fig. 229.).

Il est bien évident cependant que ces aspects restent à affiner, notamment en ce qui concerne la réflexion de l'ensemble du feuillage sur l'environnement proche. Là encore, l'utilisation des fonctions de réflexion bidirectionnelles paraît plus que prometteur.

---

[131] Wilkinson D. M., *Modelling light attenuation by urban trees*, PhD thesis, Manchester Metropolitan University, 1992.

[132] Comme le ferait par exemple le logiciel Amap Genesis du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) ; http://www.cirad.fr/



essence	$\%_{ciel}$ (été)	$\%_{ciel}$ (hiver)
chêne	0,17	0,50
érable	0,18	0,54
bouleau	0,24	0,54
peuplier	0,13	0,50
hêtre	0,19	0,47
aubépine	0,22	0,44
aulne	0,24	0,49
pin écossais	0,27	0,30
frêne	0,22	0,53
marronnier	0,19	0,52

Fig. 229. À gauche traitement des obstructions dues à la végétation ; à droite les coefficients réducteurs proposés par Wilkinson.

9.3 Prospective

Le développement de tels outils par des architectes, dans un laboratoire de recherche situé au sein d'une école d'architecture, donne quelques garanties quant aux préoccupations animant ses concepteurs – à savoir tenter de réaliser un outil destiné aux architectes. S'il est évident que, dans sa version actuelle, l'outil doit encore gagner en ergonomie, il est tout aussi clair que ses potentialités d'analyse le destinent effectivement aux acteurs de la production architecturale et urbaine, dans le cadre opérationnel bien évidemment, mais également durant le cursus de formation.

Nous sommes en effet en terrain favorable pour sensibiliser les étudiants architectes aux applications possibles de l'informatique dans des domaines autres que le simple « rendu d'ambiance » ; le dispositif d'analyse développé constitue également un outil pédagogique susceptible d'apporter des réponses objectives à certains questionnements à propos de la physique des ambiances ; et au-delà de l'outil lui-même, il s'agit peut-être davantage de faciliter ce transfert toujours difficile des notions à caractère scientifique dans le bagage conceptuel de l'architecte, en démontrant clairement qu'elles ont des conséquences majeures sur notre perception sensible de l'espace...

Enfin, comme on a pu le mentionner plus haut, la présente recherche et les développements concrets effectués sur SOLENE s'inscrivent très clairement dans une dynamique de laboratoire, les avancées effectuées sur une instrumentation existante au CERMA ayant déjà motivé certains chercheurs à engager des travaux dans des domaines voisins, tel que celui de la micro-climatologie urbaine par exemple.

****

Annexe 1 : Les grandeurs physiques utilisées : définitions et unités

Sont définies dans cette annexe les nombreuses grandeurs géométriques et physiques utilisées dans les domaines des rayonnements et des échanges lumineux et thermique ; Les premières ont trait au repérage spatial (domaine de la trigonométrie sphérique), les secondes concernent les champs de la radiométrie et de la photométrie ; en raison de leur nombre et leur aspect parfois abstrait, elles méritent un rappel de leur définitions précises ; de plus l'emploi simultané des terminologies française et anglo-saxonne ne fait qu'ajouter à la confusion...

A1.1 Grandeurs géométriques

A1.1.1 Coordonnées sphériques

Le repérage du soleil ou d'un point du ciel dans l'espace à trois dimensions se fera toujours à l'aide des coordonnées sphériques, qui comprennent, dans un repère convenablement choisi, le rayon r, l'angle polaire θ et l'angle azimutal φ.

Ce repère est constitué d'un axe zénithal Oz orthogonal au plan « horizontal » qui contient l'axe Ox. Localement – c'est-à-dire en un point O de la surface terrestre –, le plan en question est le plan tangent à la sphère terrestre en O, l'axe zénithal Oz est la verticale du lieu (qui passe donc par le centre de la terre), et l'axe Ox la direction du sud pour un point O situé dans l'hémisphère nord.

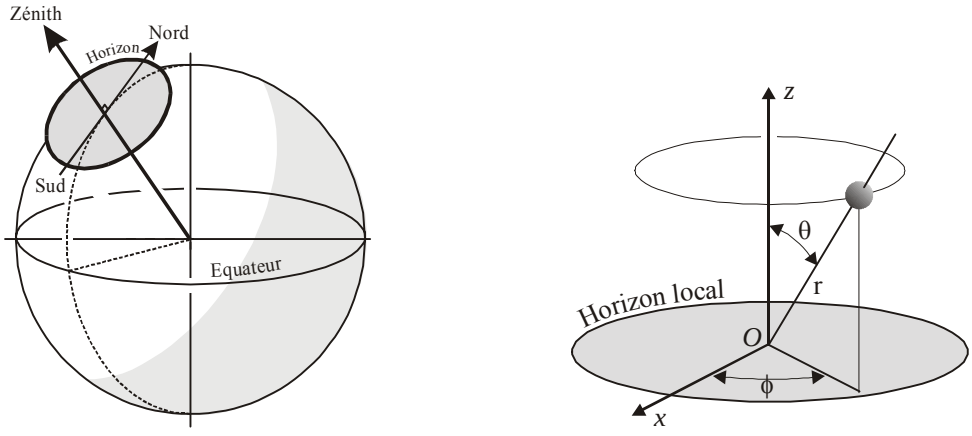


Fig. 230. Le plan horizontal local et les coordonnées sphériques.

A1.1.2 Angle solide

Les grandeurs physiques telles que la luminance ou l'intensité sont des quantités qui utilisent dans leur définition la notion d'angle solide élémentaire. Or cet angle solide infinitésimal peut être considéré un comme un vecteur unité $d\vec{\omega}$ dont la direction est celle du point sur la sphère unité et sa longueur est la mesure de l'angle solide élémentaire dans cette direction. L'unité d'angle solide dans le système international (SI) est le stéradian (sr), défini comme l'angle solide dont le sommet est au centre d'une sphère et qui intercepte une portion de surface de cette sphère égale au carré de son rayon[133] ; ainsi l'angle solide qui embrasse la totalité de l'espace a pour valeur 4π stéradians et celui correspondant à l'hémisphère 2π sr.

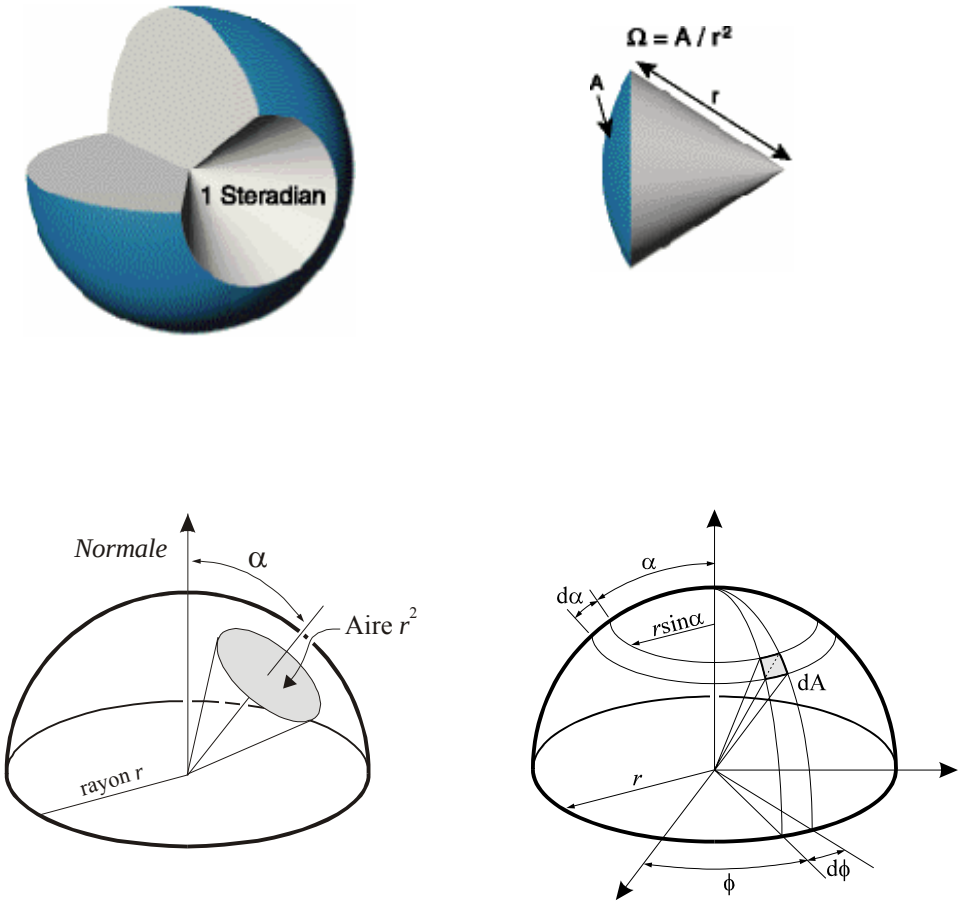


Fig. 231. Définition du stéradian et notations relatives à la mesure de l'angle solide.

[133] Définition similaire, pour l'espace, à celle du radian dans le plan, qui est défini comme l'angle interceptant un arc de cercle de longueur égale à celle du rayon de ce même cercle.

Si l'on revient aux quantités infinitésimales et à une sphère de rayon unité, l'aire d'une surface élémentaire sur cette sphère s'écrit, avec les notations de la Fig. 231. :

$$dA = (r \cdot d\alpha) \cdot (r \cdot \sin\alpha \cdot d\phi) = r^2 \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha \cdot d\phi$$

La mesure de l'angle solide élémentaire $d\omega$ vaut alors, en stéradians :

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\alpha \cdot d\alpha \cdot d\phi \quad [\text{sr}]$$

Si l'on intègre sur l'hémisphère, soit $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\alpha \cdot d\alpha \int_0^{2\pi} d\phi$, on retrouve bien la valeur de 2π sr évoquée plus haut.

On notera enfin que l'intégration de la quantité $\cos\alpha \cdot d\omega$ sur l'hémisphère de rayon unité en donne sa projection sur le plan diamétral ; le calcul donne :

$$\int \cos\alpha \cdot d\omega = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha \int_0^{2\pi} d\phi = \pi$$

Cette remarque est à la base de la relation extrêmement simple qui relie éclairement et luminance dans l'hypothèse où cette dernière est constante (voir la section relative aux *Luminances*).

A1.2 Grandeurs énergétiques et lumineuses

On appelle radiométrie la mesure des grandeurs physiques associées à l'énergie radiative, et photométrie la mesure des quantités associées à la lumière, c'est-à-dire à l'évaluation visuelle de l'énergie radiative. La lumière constitue finalement la partie de l'énergie radiative que perçoit l'observateur par stimulation de sa rétine (radiations de longueurs d'ondes comprises entre 380 et 780 nm). La lumière n'est donc ni purement physique, ni purement psychologique mais plutôt de nature psychophysique puisque ces radiations provoquent des sensations colorées auxquelles l'œil présente une sensibilité variable ; la définition d'une unité spécialisée dans le domaine lumineux (le lumen) suppose donc celle d'un observateur de référence.

À l'exception des grandeurs fondamentales que sont les flux énergétiques et lumineux (décrits ci-dessous), les quantités listées dans la suite (éclairements, intensités et luminances, qu'ils soient énergétiques ou lumineux) correspondent à des densités de flux par unité d'aire ou d'angle solide ; il s'agit donc manifestement de concepts d'ordre géométrique.

A1.2.1. Flux énergétique ; flux lumineux

Le flux énergétique Φ_e ou le flux lumineux Φ_v d'un rayonnement traversant une surface quelconque est défini comme une énergie par unité de temps, exprimé en watts (flux énergétique) ou en lumen (flux lumineux) ; le flux lumineux Φ_v est en fait la « partie visible » du flux énergétique, et il est calculé à partir de ce flux en utilisant la notion d'efficacité lumineuse spectrale :

$\Phi_e = dQ_e / dt$ [W], Q_e étant l'énergie (en joules) transportée sous la forme d'ondes électromagnétiques ;

$\Phi_v = dQ_v / dt$ [lm]

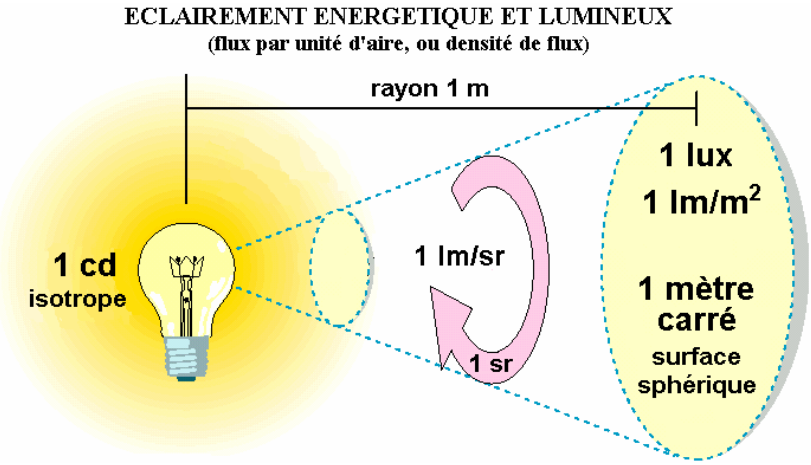
A1.2.2 Éclairement énergétique ; éclairement lumineux

Ces grandeurs sont désignées respectivement par *irradiance* et *illuminance* dans la terminologie anglo-saxonne.

L'éclairement E en un point d'une surface réceptrice dA est la valeur locale du rapport entre le flux reçu de toutes les directions et l'aire de la surface réceptrice élémentaire qui entoure le point considéré, que la surface soit réelle ou fictive ; il correspond précisément à une densité de flux (flux par unité d'aire) :

$E_e = d\Phi_e / dA$ [W·m^{-2}]

$E_v = d\Phi_v / dA$ [lx] ou [lm·m^{-2}]



Il résulte de cette définition que l'éclairement est un phénomène additif, c'est-à-dire qu'il sera possible de déterminer indépendamment les effets sur une même surface de

deux sources et en additionner leurs résultats ; de même une source étendue mais d'aire complexe pourra toujours être décomposée en aires élémentaires simples, positives ou négatives.

L'éclairement lumineux correspond à l'éclairement énergétique pondéré par la courbe de réponse de l'œil humain. On peut en donner quelques valeurs typiques :

1 lx	pleine lune
10 lx	éclairage urbain
de 100 à 1000 lx	éclairage d'un plan de travail
10000 lx	éclairage chirurgical
100000 lx	plein soleil

A1.2.3 Exitance énergétique ; exitance lumineuse

L'exitance M en un point d'une surface émettrice dA est la valeur locale du rapport entre le flux $d\Phi$ rayonné (émis) dans toutes les directions et l'aire de la surface émettrice élémentaire qui entoure le point :

$$M_e = d\Phi_e / dA \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2}}]$$

$$M_v = d\Phi_v / dA \quad [\mathrm{lm \cdot m^{-2}}]$$

Éclairement et exitance sont finalement des grandeurs identiques, mais la première concerne le flux *reçu* par la surface alors que la seconde s'intéresse au flux *émis* par cette même surface (Fig. 232.), quelle que soit d'ailleurs l'origine de l'émission (génération, réflexion, transmission) ; on en déduit que dans le cas d'une source secondaire (surface qui ne fait que réfléchir l'énergie qu'elle reçoit), l'exitance est au plus égale à son éclairement, puisqu'une surface non émissive ne renvoie qu'une fraction du flux reçu. Enfin la surface peut être réelle ou fictive, c'est-à-dire que la densité de flux est susceptible d'être mesurée sur une surface physique bien sûr, mais aussi entre les surfaces (dans l'air ou dans le vide), ou encore dans des milieux transparents comme l'eau ou le verre. À noter que l'exitance est également appelée *radiosité*.

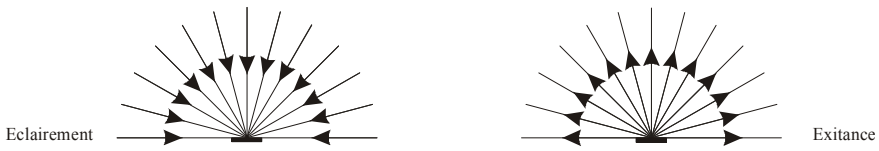


Fig. 232. Schématisation de la différence entre éclairement et exitance.

A1.2.4 Intensité

L'intensité I d'une source ponctuelle est le flux émis dans une direction par unité d'angle solide dans la direction donnée (un cône élémentaire) :

$$I = d\Phi / d\omega \quad [\text{cd}] \text{ ou } [\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}]$$

où $d\omega$ est l'angle solide élémentaire contenant la direction donnée.

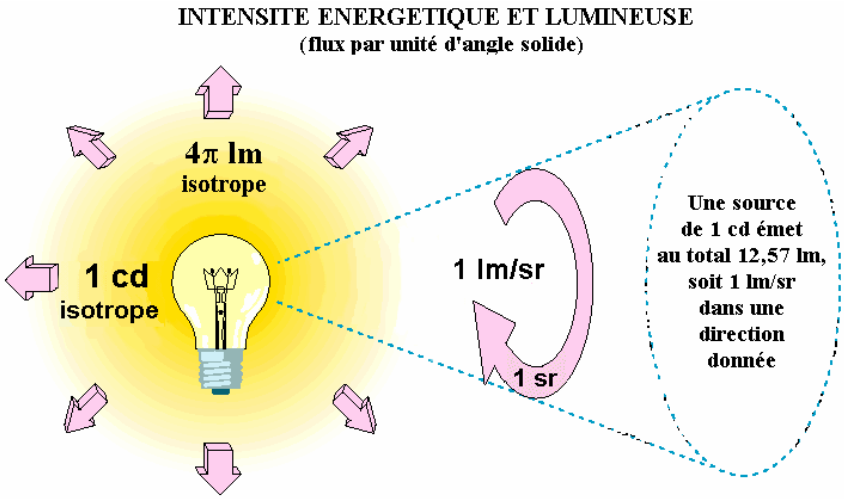


Fig. 233. L'intensité lumineuse d'une source ponctuelle correspond au rapport entre la portion de flux lumineux dans un angle solide et la mesure de cet angle solide.

La notion d'intensité décrit une distribution directionnelle de flux, sans notion de distance entre source et observateur. On peut en donner quelques valeurs caractéristiques, qui dépendront fortement de la direction d'observation dans le cas de luminaires comportant un réflecteur :

0,8 cd	omnidirectionnel	chandelle
35 cd	omnidirectionnel	Lampe à incandescence 40W / 220V
400 cd	omnidirectionnel	Lampe à incandescence 300W / 220V
1500 cd	axe du faisceau	Lampe à incandescence 300W / 220V avec réflecteur
3000 cd	axe du faisceau	Lampe halogène 28W / 220V avec réflecteur
$2{,}84\cdot10^{27}$ cd	axe	Soleil

A partir de la définition de l'angle solide élémentaire $d\omega = dA/r^2$ (fonction de l'aire dA d'une surface élémentaire et de son éloignement r par rapport à la source), on peut écrire, si E représente l'éclairement énergétique de cette surface :

$$I = \frac{d\Phi}{dA/r^2}\text{, soit encore } I = \frac{E}{r^2}\text{, et finalement } E = \frac{I}{r^2}$$

Plus généralement encore, si le flux énergétique en provenance d'une source ponctuelle intercepte une surface dA en faisant un angle α avec sa normale, l'éclairement de cette surface variera en fonction de leur orientation relative (selon la loi du cosinus de Lambert, où $I_\alpha = I_{normal} \cdot \cos\alpha$), et en raison inverse du carré de leur distance :

$$E = \frac{I\cos\alpha}{d^2}$$

où I est l'intensité de la source ponctuelle dans une direction donnée,
et d la distance de la source à l'élément de surface dA.

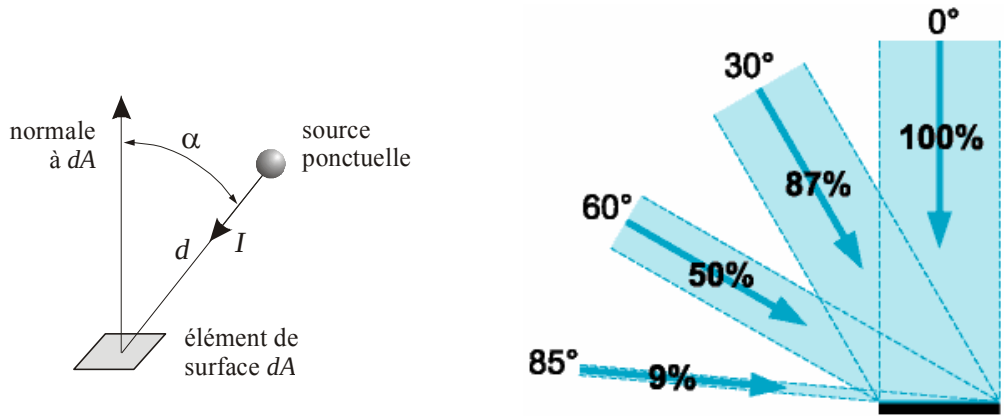


Fig. 234. « Loi du cosinus » de Lambert.

A1.2.5 Luminance énergétique ; luminance lumineuse

Ces grandeurs sont désignées respectivement par *radiance* et *luminance* dans la terminologie anglo-saxonne.

La luminance L s'exprime indifféremment pour un point d'un élément de surface réel dA ou pour un élément de surface immatériel traversé par un faisceau d'énergie. Elle caractérise un flux émis par unité de surface et par unité d'angle solide projeté (on s'intéresse donc ici une source non ponctuelle). Sa définition ne statue pas sur le « sens » du flux : il peut quitter, passer à travers ou arriver sur la surface (Fig. 235.). En-

fin la luminance n'a de sens que pour une direction donnée (contrairement à l'exitance, qui ne tient pas compte de la répartition en direction), définie par l'angle α que fait la direction moyenne du faisceau avec la normale à l'élément de surface réel ou imaginaire :

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA \cdot d\omega \cdot \cos\alpha} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}]$$

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA \cdot d\omega \cdot \cos\alpha} \quad [\mathrm{cd \cdot m^{-2}}] \text{ ou } [\mathrm{lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}]^{134}$$

où dA est l'élément de surface qui contient le point donné,
$d\omega$ l'angle solide élémentaire qui contient la direction donnée,
et α l'angle entre la normale à la surface et la direction donnée.

L'expression $dA \cdot \cos\alpha$ peut être interprétée comme la projection orthogonale de l'élément dA sur un plan perpendiculaire à la direction donnée. Or l'intensité dI de la source infinitésimale dA dans une direction donnée étant $dI = d\Phi / d\omega$, la luminance L d'une surface émettrice peut s'exprimer en termes d'intensité lumineuse sous la forme :

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\alpha}$$

Fig. 235. Schématisation de la luminance arrivant sur une surface d'aire élémentaire dA (à gauche), ou la quittant (à droite) ; à relier aux schémas de l'éclairement et de l'exitance de la Fig. 232.

[134] La candela par mètre carré est parfois appelé *nit* ; le nit est donc la luminance d'une source de 1 m^2 (surface émissive) émettant un rayonnement dont l'intensité lumineuse est de 1 candela. A noter que la candela par mètre carré est une unité très faible, surtout utilisée pour exprimer la luminance des surfaces éclairées ; on trouve parfois le *stilb* [sb], ou candela par centimètre carré, notamment pour les luminances des sources (1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2 = 10^4 nits). Les luminances peuvent encore être exprimées en *lambert*, défini comme suit : 1 *lambert* = $\frac{10^4}{\pi}$ cd/m^2 ≈ 3183 nits.

De la même manière, la luminance d'une surface réceptrice peut s'exprimer en termes d'éclairement lumineux sous la forme ci-dessous, qui constitue une formulation intéressante lorsque l'aire infinitésimale entourant le point n'a pas de surface (ciel par exemple) ou est assimilée à une source ponctuelle :

$$L = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}\omega \cdot \cos\alpha}$$

L'éclairement lumineux peut alors s'écrire :

$$E = \int_{\omega} L \cos\alpha \cdot \mathrm{d}\omega ,$$

l'intégration étant réalisée sur tous les angles solides élémentaires $\mathrm{d}\omega$ interceptant un hémisphère fictif positionné au centre de cette surface.

La quantité $\cos\alpha \cdot \mathrm{d}\omega$ est souvent considérée comme un « angle solide projeté », c'est-à-dire comme une aire élémentaire sur l'hémisphère qui est ensuite projetée sur la base de cet hémisphère (Fig. 237.).

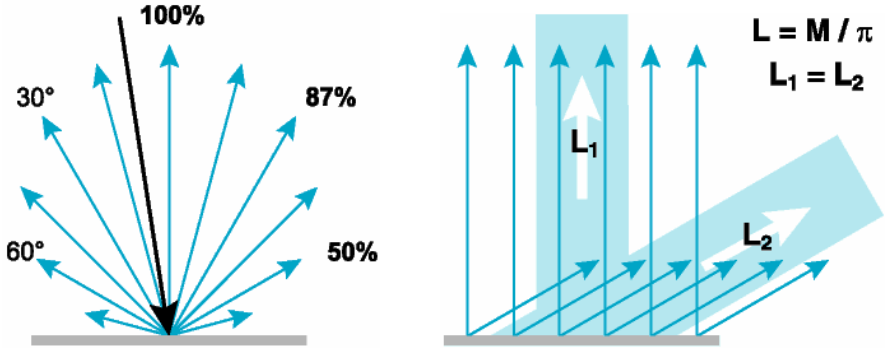
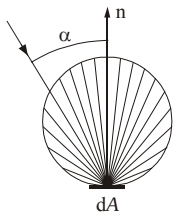


Fig. 236. Surface idéalement diffuse – ou lambertienne ; elle obéit à la loi du cosinus puisque la quantité réfléchie l'est proportionnellement au cosinus de la direction de réflexion. Une surface lambertienne dont la luminance est de 1 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}sr^{-1}}$ émettra une énergie de $\pi \cdot A$ watts dans un hémisphère de 2π stéradians, A représentant l'aire de la surface en question ; son exitance sera donc de $\pi\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$; autrement dit, un éclairement énergétique de $\pi\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ sur une surface conduira à mesurer sur celle-ci une luminance de 1 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}sr^{-1}}$ – à condition qu'elle soit parfaitement réfléchissante – (illustrations du bas d'après *Light Measurement Handbook*, A. Ryer, International Light, http://www.intl-light.com/).

Or on a vu précédemment (dans le paragraphe *Angle solide*) que l'intégration de $\int_{\omega} \cos\alpha \cdot \mathrm{d}\omega$ sur l'ensemble de l'hémisphère est égale à la valeur π, ce que montre clairement la construction géométrique de la Fig. 237. (en effet cette intégrale est égale à

l'aire de la base de l'hémisphère de rayon unité). Donc dans le cas où la luminance L est constante (indépendante de la direction), l'éclairement vaut $E = \pi \cdot L$; plus précisément, la distinction entre éclairement et exitance (respectivement flux reçu et flux émis par une surface) conduit à écrire, si la surface est parfaitement diffusante (ou lambertienne – c'est-à-dire qu'elle présente la même luminance dans toutes les directions) :



$$E \cdot \rho = \pi \cdot L \quad \text{et} \quad M = \pi \cdot L$$

où ρ est le facteur de réflexion de la surface.

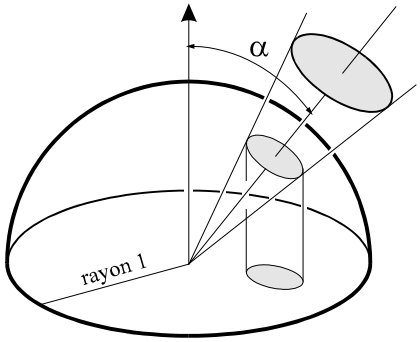
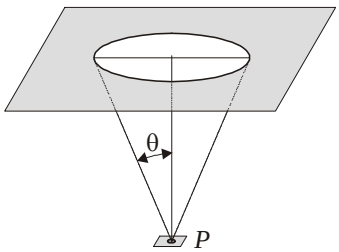


Fig. 237. Projection d'une aire élémentaire de l'hémisphère sur sa base.

Par contre éclairement et exitance sont égaux dans le cas d'une émission orthotrope. Si l'on considère par exemple comme source un disque plan de luminance uniforme (cas simplifié d'un oculus), l'éclairement en un point P ne dépend que de l'angle au sommet θ du cône sous lequel est vue la surface depuis ce point :



$$E = \pi \cdot L \cdot \sin^2 \theta/2$$

Dans le cas où le point P appartient à la surface elle-même, $\theta = \pi$ et par conséquent $E = \pi \cdot L$.

Enfin si tous les rayons sont parallèles (cas d'une source ponctuelle situé à distance suffisamment importante, comme le soleil par exemple), l'éclairement se réduit à :

$$E = E_0 \cdot \cos\alpha$$

où E_0 est l'énergie par unité d'aire perpendiculaire en provenance de la source.

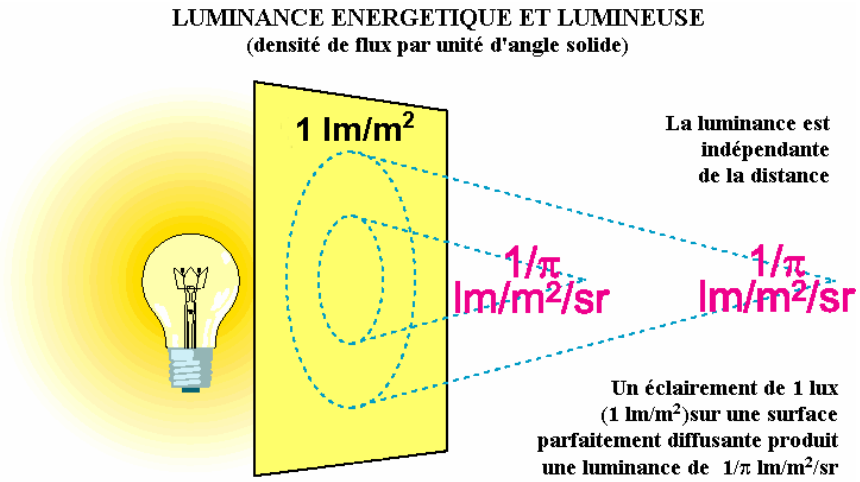


Fig. 238. La luminance correspond à l'éclairement par unité d'angle solide de la source.

Luminance éclairage naturel[135] | éclairage artificiel[136]	cd·m^{-2}
Soleil au zénith	10^9
Lampe à vapeur de mercure 150 W	$11 \cdot 10^6$
Soleil à l'horizon	10^6
Lampe à vapeur de sodium 140 W	$6 \cdot 10^4$
Ciel clair, près du soleil	10^4
Flamme d'une bougie	$5 \cdot 10^3$
Lampes fluorescentes	$3 \cdot 10^3$ à $6 \cdot 10^3$
Lune ; surface de la pleine lune	10^3 ; $3{,}7 \cdot 10^3$
Ciel clair, région opposée au soleil	10^3
Ciel couvert	10^3
Feuille de papier blanc dont l'éclairement est de 300 lux	100
Ciel nocturne	10^{-4}
Valeur minimale susceptible d'impressionner l'œil	10^{-5}

Fig. 239. Ordres de grandeur des luminances dues à un éclairage naturel ou artificiel (en cd/m^2).

[135] Source M. Déribéré, P. Chauvel, *L'éclairage naturel dans le bâtiment*, Eyrolles.

[136] Source Encyclopédie des sciences industrielles Quillet, Paris.

A1.3 Résumé des grandeurs physiques utilisées

En raison du nombre et de la relative complexité des quantités physiques définies précédemment, sont rassemblées dans la présente section la totalité des grandeurs utilisées dans ce rapport, à la fois dans les registres énergétiques et lumineux. Elles sont accompagnées des schémas et diagrammes nécessaires à la compréhension des relations qui existent entre elles.

A1.3.1 Relations entre les grandeurs physiques

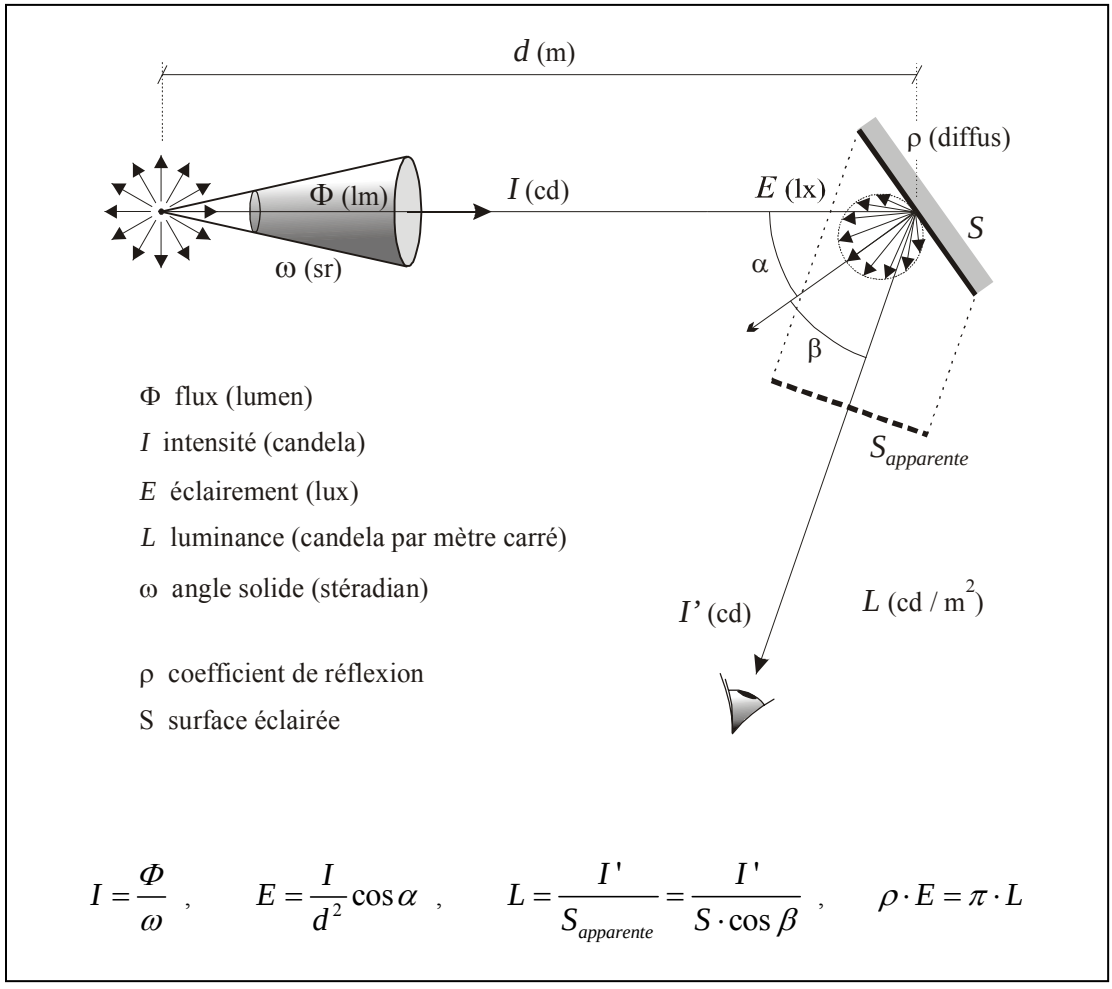


Fig. 240. Les quatre grandeurs lumineuses fondamentales (flux, intensité, éclairement, luminance) et leurs unités ; en bas les principales relations existant entre ces différentes grandeurs.

A1.3.2 Tableaux synoptiques

On rappelle dans les tableaux qui suivent les principales grandeurs et unités radiométriques et photométriques exprimées dans le Système International ; la terminologie anglaise ajoute encore à cette complexité puisqu'un même terme n'a pas nécessairement la même signification dans les deux langues... Dans la suite, toute la terminologie utilisée dans ce domaine sera exclusivement française - à moins d'indication particulière.

Les unités radiométriques appartiennent à un système physique d'unités, de type énergétique, dont l'unité de quantité de lumière est le *joule* [J] ; au contraire, les unités photométriques relèvent quant à elles d'un système psychophysique de grandeurs lumineuses, utilisable dans le seul domaine visible, dont l'unité fondamentale est le *candela*.

Grandeurs	**Unités**		**Terminologie anglo-saxonne**	
	Énergétiques indice *e*	lumineuses indice *v*	*e* (énergétique)	*v* (visuel)
Flux Φ (transporté par un faisceau)	watt [**W**] = $J \cdot s^{-1}$	lumen [**lm**]	Radiant power	Luminous power
Luminance *L* (dans un pinceau de rayonnement) ≡ flux par unité d'étendue géométrique	watt par mètre carré et par stéradian $\mathbf{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}$	candela par mètre carré $\mathbf{cd \cdot m^{-2}}$ [= *nit*] $= lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Radiance	Luminance
Éclairement *E* (d'une surface réceptrice) ≡ flux reçu par unité de surface	watt par mètre carré $\mathbf{W \cdot m^{-2}}$	lux ou lumen par mètre carré **lx** = $lm \cdot m^{-2}$	Irradiance	Illuminance
Émittance et **Exitance** *M* (d'une surface émettrice) ≡ flux quittant un élément de surface, par unité d'aire	**Émittance** watt par mètre carré $\mathbf{W \cdot m^{-2}}$	**Exitance** lux ou lumen par mètre carré $\mathbf{lm \cdot m^{-2}}$	Radiant exitance (*radiosity*)	Luminosity
Intensité *I* (d'une source) ≡ flux émis par unité d'angle solide	watt par stéradian $\mathbf{W \cdot sr^{-1}}$	candela [**cd**] $= lm \cdot sr^{-1}$	Radiant intensity	Luminous intensity

Fig. 241. Les différentes grandeurs physiques utilisées ; leurs unités radiométriques et photométriques ainsi que les équivalents anglo-saxons.

Grandeurs	**Densité spatiale**		
	Densité surfacique Quantité par unité d'aire en un point donné de la surface	**Intensité** Quantité par unité d'angle solide dans une direction donnée	**Intensité spécifique** Quantité par unité d'angle solide dans une direction donnée, et par unité d'aire projetée en un point donné
Flux énergétique Φ_e **W**	**Exitance** énergétique M_e (surface émettrice) **Éclairement** énergétique E_e (surface réceptrice) **W·m^{-2}**	**Intensité** énergétique I_e **W·sr^{-1}**	**Luminance** énergétique L_e **W·m^{-2}·sr^{-1}**
Flux lumineux Φ_v **lm**	**Exitance** lumineuse M_v (surface émettrice) **Éclairement** lumineux E_v (surface réceptrice) **lx** (lm·m^{-2})	**Intensité** lumineuse I_v **cd** (lm·sr^{-1})	**Luminance** lumineuse L_v **cd·m^{-2}** (lm·m^{-2}·sr^{-1})

Fig. 242. Grandeurs identiques à celles du tableau précédent, mais ordonnées cette fois en fonction de leurs relations avec les grandeurs spatiales (aire et angle solide).

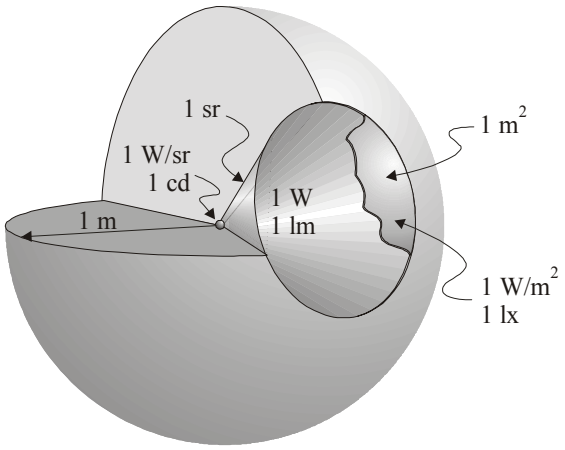


Fig. 243. Relations géométriques entre les grandeurs énergétiques (lumineuses) : éclairement de 1 W·m^{-2} (1 lx) produit par une source d'intensité 1 W·sr^{-1} (1 cd) ; l'angle solide a pour mesure 1 sr et le flux contenu est donc de 1 W (1 lm).

A1.4 Définitions des unités

Sont rappelées ici les définitions correspondant aux trois unités fondamentales spécifiques du domaine lumineux, dans le Système International d'unités SI.

Lumen *[lm]*

Unité SI du flux lumineux Φ, qui correspond au flux émis dans un angle solide unitaire (1 stéradian) par une source ponctuelle uniforme placée au sommet de l'angle solide et dont l'intensité lumineuse est de 1 candela (9ème conférence des Poids et Mesures, 1948).

Candela *[cd]*

Unité SI de l'intensité lumineuse I, dans une direction donnée, d'une source qui émet une radiation monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz dont l'intensité énergétique, dans cette direction, est de 1/683 watt par stéradian (16ème conférence des Poids et Mesures, 1979).

$$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm}\cdot\text{sr}^{-1}$$

Lux [lx]

Unité SI de l'éclairement lumineux E, correspondant à l'éclairement produit sur une surface d'aire 1 m^2 par un flux lumineux de 1 lm réparti uniformément sur cette surface.

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}\cdot\text{m}^{-2}$$

On trouve parfois encore dans la littérature américaine des *footcandle* [fc] ou lumen par pied carré ($1 \text{ fc} = 1 \text{ lm}\cdot\text{ft}^{-2} = 10{,}764$ lx avec 1 ft = 0,3048 m), ou encore le phot [ph], qui lui correspond à un éclairement lumineux de $1 \text{ lm}\cdot\text{cm}^{-2}$; autrement dit, $1 \text{ ph} = 10^4$ lux.

Efficacité lumineuse d'un rayonnement *[K]*

Quotient du flux lumineux Φ_v par le flux énergétique Φ_e.

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e}$$

Lorsqu'elle est appliquée à un rayonnement monochromatique, la valeur maximum de $K(\lambda)$ est notée K_m.

$K_m = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ pour une longueur d'onde voisine de 555 nm en vision photopique.

Annexe 2 : Codes implémentés au logiciel SOLENE

Ces différents programmes, écrits en code ANSI C, utilisent évidemment des formats d'entrée et de sortie ASCII identiques à ceux de SOLENE, et sont donc totalement compatibles avec les programmes précédemment développés pour cet ensemble logiciel – ils font notamment appel à diverses procédures déjà écrites, tel le traitement des vues cachées par projection perspective, la gestion des fichiers de données et des fichiers résultats, ainsi qu'à toutes les bibliothèques de calcul.

Le passage sous Windows n'a pas fondamentalement modifié la structuration générale de cet ensemble de programmes puisque, à l'exception des fonctions d'affichage, l'interface ne fait que renvoyer aux différents exécutables qui fonctionnent toujours en mode console.

L'ordre d'apparition d'un programme dans la liste ci-dessous correspond très approximativement à la chronologie de son utilisation dans le processus « basique » de simulation d'un local intérieur ou d'un site urbain au regard de l'éclairement naturel (soleil + multi-réflexions), c'est-à-dire sans questionnement particulier quant à la nature des éléments simulés, ni aux résultats escomptés d'une telle simulation.

A l'exception de quelques uns d'entre eux seulement – et notamment ceux permettant le traitement des vitrages –, la grande majorité de ces programmes est désormais accessible directement *via* l'interface de SOLENE.

A2.1 Codes relatifs à la modélisation des luminaires

[geode_ciel]

Triangulation géodésique de l'hémisphère en 4^n éléments.

[angl_solid]

Calcul, pour chaque élément de la triangulation géodésique, de l'angle solide sous lequel il est vu depuis le centre de l'hémisphère.

[course_soleil]

Permet, pour une date et un lieu donnés, de représenter la trajectoire du soleil sur l'hémisphère par pas de temps.

[luminance_ciel]
Détermine la luminance de chacun des éléments du ciel géodésique, calculée en son centre de gravité, selon le modèle de Perez (paramétré par les deux coefficients ε et Δ).

[luminance_ciel_cie_couvert]
Similaire à *[luminance_ciel]*, mais utilise le modèle de distribution normalisé par la CIE pour les ciels couverts.

[luminance_ciel_cie_serein]
Similaire à *[luminance_ciel]*, mais utilise le modèle de distribution normalisé par la CIE pour les ciels clairs.

[luminance_3d]
Similaire à *[luminance_ciel]*, propose deux modes de visualisation 3D de la distribution des luminances sur la voûte céleste de manière à faciliter le paramétrage des coefficients du modèle (l'un directement dans la fenêtre de visualisation de SOLENE, l'autre après interfaçage avec *Mathematica*™ ; cette dernière méthode permet en outre une visualisation dynamique dans les navigateurs Web).

[luminance_soleil]
Détermination de la radiance ou de la luminance du soleil à partir du modèle de distribution Perez et *al.* Représente également la position du soleil sur l'hémisphère et calcule l'angle solide sous lequel est il vu depuis la terre.

A2.2 Codes relatifs à la relation géométrique scène/ciel

[fraction_ciel]
Détermination de la fraction de ciel vu (potentialité d'éclairement) depuis chacun des contours de la scène, avec prise en compte des masques éventuels.

[ciel_vu_du_contour]
Permet de cartographier sur l'hémisphère céleste la portion de ciel vu depuis un point quelconque de la scène (éventuellement depuis un point d'un espace intérieur).

[masques_ciel] et **[masques_ciel_lum]**
Détermination de l'énergie, en provenance de la voûte céleste, reçue par chacun des contours de la scène, en tenant compte des masques éventuels, et sa version modifiée pour le traitement des vitrages.

A2.3 Codes relatifs au traitement des inter-réflexions

[facform] et **[facform_lum]**

Détermination des facteurs de forme entre les différents éléments de surface de la scène par la méthode d'intégration sur un contour point vers polygone (génère une matrice n x n sous la forme d'un fichier binaire n^2 valeurs). Sa version modifiée pour la prise en compte des vitrages génère une seconde matrice n x n qui contient le « statut » de chacun de ces facteurs (valeur unité pour deux éléments en vis-à-vis direct, valeur égale au coefficient de transmission du vitrage pour deux éléments en vis-à-vis séparés par une paroi vitrée).

[somme_facform]

Cartographie, pour chaque élément de la scène étudiée, la somme des facteurs de forme de cet élément vers tous les autres. Une somme égale à 1 signifie que cet élément est en relation avec tous les autres élément de la scène.

[facform_du_contour]

Pour un contour i donné, cartographie la valeur des facteurs de forme F_{ji} depuis tous les autres éléments et en donne la somme.

[radiosite] et **[radiosite_lum]**

Détermination des échanges radiatifs de contour a contour, par la méthode itérative à « raffinement progressif ». Sa version modifiée pour le traitement des vitrages lit la seconde matrice constitué par *facform_lum*, qui vient pondérer les échanges entre deux éléments de surfaces séparés par un vitrage.

[ecl_plan_fictif_lum]

Donne l'éclairement sur un plan fictif horizontal à partir des réflexions en provenance des autres surfaces de la scène. L'intérêt de cette fonction est de fournir la somme des composantes réfléchies externe et interne du facteur de lumière du jour, grâce aux opérations entre descripteurs (quotient avec l'éclairement reçu par ce plan horizontal en dehors de tout masque de l'environnement). La composante directe du facteur de lumière du jour est obtenue d'une manière similaire, à partir de l'éclairement direct sur ce même plan fictif, fourni cette fois par la fonction *masques_ciel_lum*. Finalement le facteur de lumière du jour est obtenu par sommation des deux termes précédents

[brdf_torrance] et **[brdf_oren-nayar]**

Visualisation dans la fenêtre OpenGL de SOLENE des fonctions de réflexion bidirectionnelles de Torrance-Cook-Sparrow et Oren-Nayar respectivement.

A2.4 Autres utilitaires développés

[attrib_val_inclin]

Attribution de valeurs, fonction de l'orientation des surfaces (affectation des coefficients de réflexion aux différentes surfaces de la scène par exemple).

[stat_val]

Fournit diverses informations concernant les valeurs contenues dans un fichier (valeur minimale, valeur maximale, moyenne, nombre d'éléments de surface).

[tl_tsv] et **[tsv_tl]**

Transformation de l'heure légale en heure solaire en fonction de la position géographique, et inversement (autres informations disponibles dans les deux cas : altitude solaire, heures de lever et coucher du soleil, etc.).

Annexe 3 : Modèle, modélisation et simulation numériques

Les méthodes numériques de simulation en général sont toujours bâties à partir de la notion de « modèle », et il en va évidemment de même pour ce qui concerne la simulation de l'ensoleillement et de l'éclairement naturel : il s'agira par exemple du modèle géométrique de ciel, de son modèle de luminance, du modèle physique d'interaction lumière/matière, ou encore du modèle physique utilisé pour la simulation sur héliodon (la « maquette »), dans le sens modèle concret cette fois.....

Mais parallèlement à la construction de ces modèles, nombre de domaines de recherche ou de méthodes de calcul applicables à différents champs d'investigation (la méthode aux éléments finis par exemple) n'ont pu bénéficier d'avancées significatives qu'en raison du bond prodigieux de la vitesse de traitement des machines. On peut inclure parmi ces domaines l'étude des conditions d'éclairement naturelles sur l'environnement bâti qui nécessite une puissance de calcul et des capacités de stockage très importantes ; d'ailleurs nombre d'aspects relatifs à l'éclairement diffus sont connus depuis fort longtemps, mais les calculs nécessaires rendaient ces méthodes totalement inutilisables à l'époque de leur découverte ; c'est notamment le cas des chercheurs Moon et Spencer qui, dès 1946, avaient mis en évidence les interactions lumineuses diffuses en réalisant « à la main » et dans des configurations extrêmement simples l'importante quantité de calculs nécessités par la détermination des facteurs de forme.

A3.1 La notion de modèle

Le sens même du terme « modèle » tendant à varier de manière importante selon le domaine d'investigation qui se l'est approprié, il convient de préciser quelque peu la notion de *modèle physique* utilisée dans les simulations scientifiques.

Alors que dans le domaine artistique le modèle, qu'il s'agisse d'un être humain, d'un paysage ou d'une nature morte, constitue l'entité originale parfaite que l'artiste va tenter de copier ou d'interpréter, le monde scientifique au contraire tente de créer des modèles qui soient susceptibles d'imiter au mieux les phénomènes réels. Ces modèles peuvent revêtir des formes diverses : formulation mathématique mettant en jeu une ou plusieurs grandeurs physiques, ou bien un modèle réduit (pour l'étude des écoulements aérodynamiques, des aspects lumineux, etc.), ou encore le modèle informatique, dont le propos n'est en général que l'automatisation de calculs particulièrement fastidieux, le plus souvent en raison d'une discrétisation du temps ou de l'espace (une intégrale remplacée par une somme discrète), ou d'un mécanisme itératif (fractales, processus de croissance...).

R. Levins, l'un des précurseurs de la modélisation numérique dans les années 70, dégage trois caractéristiques principales dans le modèle, quel que soit son champ d'application d'ailleurs : ce sont sa généralité, sa précision, et sa proximité avec le réel. Il situe ces caractéristiques aux sommets d'un triangle, et de ce graphe en déduit leurs inter-relations : s'il est précis et réel (*1*), le modèle perd en généralité ; s'il cherche à être général et précis (*2*), il s'éloigne du réel ; au contraire s'il est général et réel (*3*), il perd toute précision (Fig. 244.).

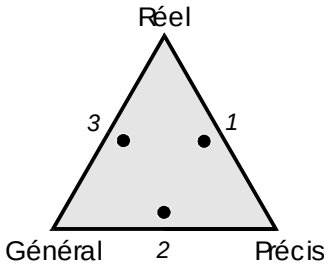


Fig. 244. Caractéristiques des modèles – numériques en particulier –, d'après R. Levins.

Même si l'objectif du modèle n'est pas de rendre compte exactement de la réalité, il n'en est jamais complètement déconnecté ; un va-et-vient perpétuel s'opère entre le monde réel et le modèle, ne serait-ce que pour le valider…

Dans la pratique scientifique, un « modèle » est considéré avant tout comme une « représentation simplifiée » d'un phénomène ou d'un objet de la réalité... S'il s'agit d'un phénomène d'ordre biologique, mécanique, en un mot *physique*, son but est de remplacer un grand nombre d'observations par un nombre, le plus faible possible, de paramètres. En conséquence le modèle a toujours un effet réducteur, et il s'agit donc de s'assurer, pour l'étude d'un phénomène donné, que les paramètres ignorés ou négligés n'ont effectivement aucune incidence sur le phénomène en question.

Daniel Schneider[137] note également ces fonctions de représentation et de réduction du modèle ; il y adjoint également une fonction « subjectivisante », précisant que le modèle ne possède jamais une relation « naturelle » avec l'original. « Il [le modèle] modélise quelque chose pour quelque chose, c'est-à-dire qu'il sera instrumental pour certains actes ou pensées à un moment donné. En d'autre termes, l'interprétation d'un modèle doit se faire par rapport à son but et à son usage ».

Même si les propos de cet auteur se situent dans un champ disciplinaire très éloigné de nos préoccupations (les sciences politiques !), il est manifeste que ces notions de « but »

[137] Daniel Schneider, Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle, Thèse de doctorat, Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation, Université de Genève, 1997.

et « d'usage » restent d'actualité dans notre domaine ; « lancer une simulation » suppose(rait) en effet de la part de l'utilisateur une connaissance des attendus d'une telle opération, non pas en termes de résultats numériques ou graphiques évidemment – puisque ces résultats physiques font précisément l'objet de la simulation en question –, mais à un niveau beaucoup plus général au contraire, où il s'agit de s'interroger sur la nature précise du phénomène simulé (que simule-t-on et pourquoi), sur le type d'information que cet utilisateur cherche à recueillir (des données globales où seules importent la mise en rapport et la confrontation des différents résultats, ou à l'inverse des conclusion précises quant à l'efficacité d'un dispositif architectural particulier, etc.). Autrement dit l'utilisation d'un modèle devrait toujours s'accompagner d'un principe de « parcimonie » qui consiste à ne produire que les informations réellement significatives dans un contexte donné, et prendre garde à ne pas en laisser sous-entendre d'autres.

A3.2 Les aléas du modèle

C'est sans doute à ce niveau que se situe parfois le malentendu vis à vis de la simulation numérique à caractère scientifique où, comme on l'a évoqué plus haut, ce caractère même de « scientifique » vient parfois servir de caution uniquement et conduit, de la part des utilisateurs, à des attentes qui dépassent largement le cadre toujours restreint fixé par les conditions initiales (les données fournies au modèle), ou alors mènent à une interprétation généralisante des résultats obtenus (alors que la donnée même des paramètres d'entrée restreint le champ des résultats potentiels...). Parmi les domaines d'investigation du CERMA, ces aspects deviennent particulièrement sensibles dans le cadre de la simulation aéraulique, où les conditions aux limites revêtent une importance fondamentale dans le processus de simulation ; de même dans le champ des simulations relatives à l'éclairage naturel, où les modèles mathématiques qui traduisent les distributions statistiques des luminances de ciel par exemple paraissent détenir une précision (contenue dans leur formulation même) qui dépasse largement celle des mesures qui ont permis de procéder à leur construction.

Si l'objet du modèle à caractère scientifique est effectivement de réussir à quantifier les phénomènes (certains de leurs paramètres tout au moins), sa fonction première réside avant tout dans le fait qu'il amène à une meilleure connaissance de systèmes complexes en permettant l'analyse de leur fonctionnement de la manière la plus simple possible. C'est ainsi que tous les chercheurs s'accordent à admettre que bâtir un modèle erroné – c'est-à-dire un modèle qui ne rend pas compte de l'évolution d'un phénomène tel qu'il se produit dans la réalité, ou qui s'en écarte à un moment donné –, n'a finalement que peu d'importance dans la mesure où il permet d'identifier le(s) paramètre(s) qui contribue(nt) à le faire diverger du phénomène réel.

A3.3 Simulation numérique et architecture

On ne peut clôturer ces remarques relatives à la modélisation et à la simulation numériques des paramètres physiques sans évoquer rapidement leur statut dans le domaine architectural... En effet l'outil informatique suscite (encore) de nombreux doutes et interrogations quant à son intérêt (sa nécessité ?) dans ce domaine, à la fois dans la pratique quotidienne de l'architecte mais également – et surtout peut-être – dans son enseignement... Mais il ne s'agit pas d'entrer ici dans l'interminable polémique qui « oppose » architectes et ingénieurs, puisque ses origines remontent quasiment à la création de l'école polytechnique par Gaspard Monge en 1794 (!) ; et si l'on ne peut effectivement pas parler d'opposition au sens strict, il est manifeste, pour les différents acteurs, que leur terrain d'entente est quelque peu mouvant... Aussi nous bornerons-nous à citer en guise de conclusion, parmi bien d'autres avis similaires sur le sujet, ces quelques propos de Jean Michel Coget[138], enseignant à l'école d'architecture de Paris La Villette :

> *« D'aucuns voudront voir dans l'ordinateur un instrument du renforcement du pouvoir des « ingénieurs » au détriment de l'architecte. Cela peut se discuter. Ce qui ne se discute pas, c'est que l'architecte qui sait utiliser, lui-même, l'ordinateur non seulement pour dessiner, mais aussi pour évaluer son projet au regard du confort et de la sécurité des usagers, renforce non seulement sa maîtrise du projet, mais aussi son autorité sur le maître d'ouvrage et sur les entreprises (...).*
>
> *En effet, aujourd'hui, il n'est pas d'évaluation du projet qui ne puissent être ramenée, par la puissance des ordinateurs, à une représentation graphique (...), et notamment les niveaux de contraintes en calcul de structure, de déperditions thermiques, de pressions acoustiques et hauteurs sonores, et pratiquement, toutes les données physiques du projet, pourraient être visualisées, in situ, dans le projet, grâce aux pseudo-couleurs (...).*
>
> *Autrement dit, s'agissant de projets « non extraordinaires », mettant en œuvre des technologies constructives connues, il est possible d'imaginer des outils d'enseignement et de pratique du projet permettant à l'étudiant en architecture – et au professionnel qu'il deviendra – d'évaluer lui-même son projet.*
>
> *(...) Nous vivons dans une société qui dépense infiniment plus d'argent pour mettre au point les ordinateurs qui représentent des décors et des personnages virtuels au cinéma ou pour les jeux électroniques qu'elle n'en consacre aux outils qui lui permettrait de mieux étudier les conditions d'existence quotidienne de sa population, dans son habitat, au travail... ».*

---

[138] Dans un ouvrage à paraître aux Éditions la Villette (courant 2000), *Les systèmes d'information du projet architectural*.

Bibliographie

Ouvrages ou articles classés par nom d'auteur

[1] ALEXANDROFF G. et J.-M., *Architectures et climat : soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Berger-Levrault, Paris, 1982.

[2] ANTOINE M.-J., GROLEAU D., *Assessing Solar Energy and Environmental Variables in Urban Outdoor Spaces : A Simulation Tool*, Eurosolar, 5th European Conference on Solar Energy in Architecture and Urban Plan, Bonn, 1998.

[3] ASHDOWN I., *Radiosity, A Programmer's Perspective*, John Wiley & Sons, 1994.

[4] BAUM D. R., RUSHMEIER H. E. et WINGET J. M., *Improving Radiosity Solutions through the Use of Analytically Determined Form Factors*, Computer Graphics 23(3) pp. 325-334, ACM SIGGRAPH 89 proc.

[5] BERNARD R., MENGUY G. et SCHWARTZ M., *Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications*, Technique et documentation, 1979.

[6] BOUATOUCH K. et TELLIER P., *A Two-Pass Physical-Based Global Lighting Model*, Graphics Interface, pp 319-328, 1992.

[7] BRUNGER A. P. et HOOPER F. C., *Measured shortwave sky radiance in an urban atmosphere*, Solar Energy 47, pp. 137-142, 1991.

[8] BRUNGER A. P. et HOOPER F. C., *Anisotropic skie radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance*, Solar Energy 51(1), pp. 53-64, 1993.

[9] CHAUVEL P., DOURGNON J., FLEURY D., DOGNIAUX R. et LEROY J., *Abaques pour la détermination de la composante directe du facteur de lumière du jour par ciel uniforme, ciel Moon et Spencer, ciel serein*, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris, 1963.

[10] COHEN M. F. et WALLACE J. R., *Radiosity and Realistic Image Synthesis*, Academic Press, 1993.

[11] COMPAGNON R., *Simulations numériques de systèmes d'éclairage naturel à pénétration latérale*, Thèse n° 1193, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1993.

[12] COOK R. L. et TORRANCE K. E., *A Reflectance Model for Computer Graphics*, ACM transactions on graphics, pp. 7-24, 1982.

[13] DANA K. J., NAYAR S. K., GINNEKEN B. et KOENDERINK J. J., *Reflectance and Texture of Real-World Surfaces*, Columbia University Technical Report, CUCS-048-96, décembre 1996.

[14] DE YOUNG J., LALONDE P. et FOURNIER A., *Acquiring and Using Realistic Reflectance Data in Computer Graphics Images*, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

[15] DELAUNAY J.-J., *Contribution à la modélisation de la lumière naturelle en vue de son application à la simulation de l'éclairage de locaux*, Thèse de doctorat, Strasbourg, 1995.

[16] DÉRIBÉRÉ M. et CHAUVEL P., *L'éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment*, Eyrolles, Paris, 1968.

[17] DILAURA D. L. et FRANCK P., *On Setting Up and Solving Large Radiative Transfer Systems*, Journal of the Illuminating Engineering Society 22(2), pp 3-7, 1993.

[18] DOGNIAUX R., *Représentation Analytique des Composantes du Rayonnement Lumineux Solaire*, Série A, n° 83, L'Institut Royal Météorologique de Belgique, 1976.

[19] FONTOYNONT M., BARRAL P. et PEREZ R., *Indoor daylighting frequencies computed as a function of outdoor solar radiation data*, Actes de la 22ème Conférence de la CIE, Melbourne, Australie, Div. 3, pp. 100-105, 1991.

[20] GILLETTE G. et TREADO S., *The issue of sky conditions. Exploring the issue of sky conditions as applied to current daylight practice*, Ligthing Design and Application, Mars, pp 23-27, 1985.

[21] GIVONI B., *L'homme, l'architecture et le climat*, Ed. du Moniteur, Paris, 1978.

[22] GROLEAU D., MARENNE C., *Instrumentation solaire du projet :Principes de la simulation solaire dans le logiciel SOLENE*, Centre de recherches méthodologiques d'architecture, Nantes, 1994.

[23] HARRISON A. W., *Directional sky luminance versus cloud cover and solar position*, Solar Energy 46(1), pp. 13-20, 1991.

[24] HARRISON A. W. et COOMBES C. A., *An opaque cloud cover model of sky shortwave radiance*, Solar Energy 41(4), pp. 387-392, 1988.

[25] HE X., TORRANCE K., SILLION F., GREENBERG D., *A Comprehensive Physical Model for Light Reflection*, SIGGRAPH 91, Computer Graphics, vol 25, n°4, pp 187-196, 1991.

[26] HE X., HEYNEN P., PHILLIPS R., TORRANCE K., SALESIN D., GREENBERG D., *A Fast and Accurate Light Reflection Model*, Program of Computer Graphics, Ithaca, New-York, 1992.

[27] HOOPER F. C. et BRUNGER A. P., *A model for the angular distribution of sky radiance*, J. of Solar Energy Eng. 102, pp. 196-202, 1980.

[28] HOOPER F. C., BRUNGER A. P. et CHAN C. S., *A clear sky model of diffuse sky radiance*, J. of Solar Energy Eng. 109, pp. 9-14, 1987.

[29] INCROPERA FRANK P. et DE WITT D., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 1990.

[30] KASTEN F., *Discussion on the relative optical air mass*, Ligthing Research and Technology, (3), pp. 129-130, 1993.

[31] KITTLER R., *Relative scattering indicatrix : Derivation from regular radiance / luminance distribution sky scans*, Lighting Research and Technology 25(3), pp. 125-127, 1993.

[32] KITTLER R., *The need for standard skies and models for energy conservation measures*, Lighting Research and Technology, 26(4), pp. 171-180, 1994.

[33] KITTLER R. et VALKO P., *Radiance distribution on densely overcast skies : Comparison with CIE luminance standard*, Solar Energy 51(5), pp. 349-355, 1993.

[34] KITTLER R., HAYMAN S., RUCK N. et JULIAN W., *Daylight measurement data : Methods of evaluation and representation*, Lighting Res. Technol., 24(4), pp. 173-187, 1992.

[35] KWOK B., *Analysis of Radiosity Techniques in Computer Graphics*, Master's Thesis, York University, Toronto, Ontario, Canada, 1992.

[36] LAMBERT J. H., *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, Augsburg, Klett*, 1760.

[37] LANGUÉNOU E. et TELLIER P., *Including Physical Light Sources and Daylight in Global Illumination*, 3rd Eurographics Workshop on Rendering, pp.217-225, Bristol, 1992.

[38] LE STRAT G., *Modélisation du champ radiatif ; application à la simulation des ambiances lumineuses naturelles intérieures sur écran graphique couleur*, thèse de doctorat, université de Nantes, 1990.

[39] LITTLEFAIR P. J., *The luminance distribution of an average sky*, Lighting Research and Technnology, vol 13, n°4, pp 192-198, 1981.

[40] LITTLEFAIR P. J., *Measurement of daylight factor under real overcast skies*, Proc. Light Measurement '84 Conf., Guildford, 1984.

[41] LITTLEFAIR P. J., *The luminous efficacy of daylight : a review*, Lighting Research and Technology, vol 17, n°4, pp 162-178, 1985.

[42] LITTLEFAIR P. J., *The luminance distributions of clear and quasi-clear skies*, Actes de la CIBSE Natural Lighting Conference, Cambridge, pp 267-283, 1994.

[43] LITTLEFAIR P. J., *A comparison of sky luminance models with measured data from Garston*, United Kingdom, Solar Energy 53(4), pp. 315-322, 1994.

[44] MALCOLM PARRY C., *Lighting in the Architecture of Sir John Soane*, Lighting Research and Technology, vol 29, n°3, pp 95-104, 1997.

[45] MATSUURA K., *Luminance distributions of various reference skies*, CIE Technical Report, 1988.

[46] von MEISS P., *De la forme au lieu : une introduction à l'étude de l'architecture*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1986.

[47] MICHALSKY J., PEREZ R. et SEALS R., *Evaluation of algorithms for sky luminance distribution; prospects for performance improvements*, In : M. E. Arden, S. M. A. Burley and M. Coleman (eds.), 1991 World Solar Congress, Vol. 1, Part II, Denver, CO, pp. 1049-1054, 1991.

[48] MIGUET F., GROLEAU D., *SOLENE et la simulation des éclairements directs et diffus des projets architecturaux et urbains*, IBPSA France 1998, Améliorer les performances des bâtiments grâce à la simulation : une réponse aux besoins des professionnels, Sophia Antipolis, 1998.

[49] MIGUET F., GROLEAU D. & MARENNE .C, *A Combined Sunlight and Skylight Tool for Microclimatic analysis in urban architectures*, Solar Energy in Architecture and Urban Planning, 4th European Conference, Berlin, 1996.

[50] MOON P. et SPENCER D. E., *Illumination from a non-uniform sky*, Illum. Eng. 37(10), pp. 707-726, 1942.

[51] MORRIS C. W. et LAWRENCE J. H., *The anisotropy of clear sky diffuse solar radiation*, ASHRAE Transactions, Part 11, pp. 136-141, 1971.

[52] MUNEER T. et ANGUS R. C., *Daylight factors based on real sky distributions*, Actes de la CIBSE Nat. Lighting Conference, Cambridge, 1994.

[53] NAKAMURA H., OKI M., et al., *Preliminary study on zenith luminance* (en japonais). Summaries of technical papers of annual meeting AIJ, 1985.

[54] NAKAMURA H., OKI M., HAYASHI Y., IWATA T. (1986), *The mean sky composed depending on the absolute luminance values of the sky elements and its application to the daylight prediction*, International Daylighting Conference, Long Beach (CA-USA), pp. 61-66, 1986.

[55] NISHITA T. et NAKAMAE E., *Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light*, ACM transaction on graphics, pp. 125-132, 1986.

[56] OREN M. et NAYAR S., *Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision*, Columbia University, New-York, 1992-1996.

[57] PEREZ R., *An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces*, Solar Energy 36(6), pp. 481-497, 1986.

[58] PEREZ R., INEICHEN P., SEALS R., MICHALSKY J. et STEWART R., *Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*, Solar Energy 44, pp. 271-289, 1990.

[59] PEREZ R., INEICHEN P., MAXWELL E., SEALS R. et ZELENKA A., *Dynamic global-to-direct irradiance conversion models*, Actes du ISES World Congress, Denver (CO-USA), 1991.

[60] PEREZ R., MICHALSKY J. et SEALS R., *Modeling sky luminance angular distribution from real sky conditions*, J. Illum. Eng. Soc. 21(2), pp. 84-92, 1992.

[61] PEREZ R., SEALS R. et MICHALSKY J., *An all-weather model for sky luminance distribution – Preliminary configuration and validation*, Solar Energy 50(3), pp. 235-245, 1993.

[62] PEREZ R., STEWART R. et SCOTT J. T., *A two-parameter description of the sky hemisphere*, Actes de la AMS Fifth Conference on Atmospheric Radiation, Baltimore (USA), pp. 322-325, 1993.

[63] PEREZ R., STEWART R., ARBOGAST C., Seals R. et Scott J. T., *An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces : Description, performance validation, site dependency evaluation*, Solar Energy 36, pp. 481-497, 1986.

[64] PERRAUDEAU M., *Luminance models*, Actes de la CIBSE Nat. Lighting Conf., Cambridge, pp. 291-292, 1988.

[65] PERRAUDEAU M. et CHAUVEL P., *One year's measurements of luminous climate in Nantes*, International Daylighting Conference, Long Beach (CA-USA), pp. 83·88, 1986.

[66] PERRIN DE BRICHAMBAUT C., *Météorologie et énergie : I'évaluation du gisement solaire*, La Météorologie, VI série, n° 5, pp. 129-158, 1976.

[67] PIRSEL L., *New formulae for relative optical air mass determination in sky models*, Ligthing Research and Technology 23(1), pp. 85-88, 1991.

[68] RUSINKIEWICZ S., *New Change of Variables for Efficient BRDF Representation*, Eurographics Workshop on Rendering, 1998.

[69] SCHLICK C., *A Survey of Shading and Reflectance Models*, LaBRI (Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique, université de Bordeaux I).

[70] SCHLICK C., *An inexpensive BRDF model for physically-based rendering*, LaBRI.

[71] SILLION F., *Prise en compte de fonctions de réflectance quelconques dans la méthode de radiosité*, CNRS URA 1327, École Normale Supérieure, 1992.

[72] SILLION F. X. et PUECH C., *Radiosity and Global Illumination*, Morgan Kaufman, San Mateo (CA-USA), 1994.

[73] SIRET D., *Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural* ; application à l'ensoleillement, Thèse de doctorat, 1997.

[74] STEVEN M. D., *Angular distribution and interception of diffuse solar radiation*, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 1977.

[75] STEVEN M. D. et UNSWORTH M. H., *The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies*, Quart. J. R. Met. Soc. 106, pp. 57-61, 1980.

[76] TREGENZA P. R., *Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements sky*, Ligthing Research and Technology 19, pp. 13-14, 1987.

[77] TREGENZA P. R., *A simple mathematical model of illumination of a cloudy sky*, Ligthing Research and Technology, vol 12., n° 3, pp. 121-128, 1980.

[78] TREGENZA P. R., MICHALSKY J. J., PEREZ R. et SEALS R. in Kendrick J. D. (ed.), *Guide to recommanded practice of daylight measurement*, Report of CIE Technical Committee 3.07, Eighth Draft, Departement of Architecture, University of Adélaïde, 1991.

[79] TWAROWSKY M., *Soleil et architecture*, Arkady, Varsovie, 1962, traduction française Dunod, Paris, 1967.

[80] VALKO P., *Angular distribution of sky radiance and diffuse irradiance on inclined surfaces*. In : Physical climatology for solar and wind energy, pp. 148-195, World Scientific Publishing Co., Singapour, 1988.

[81] WALSH J. W. T., *The science of daylight*, London, Macdonald, 1962.

[82] WARD G. J., *The Radiance Lighting Simulation and Rendering System*, ACM Siggraph 94 annual conference Proceedings, p. 459-472 ; http://radsite.lbl.gov/radiance/

[83] WARREN S. G., HAHN C. J., LOUDON J., CHERVIN R. M. et JENNE R. L., *Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land*, NCAR Techn. Note 273, 1986.

[84] WATT A. et WATT M., Advanced Animation and Rendering Techniques, Addison-Wesley, 1992.

[85] WEISS T. A. et LÖF G. O. G., The estimation of daily, clear sky, solar radiation intercepted by a tilted surface, Solar Energy 24, 287-294, 1980.

[86] WILLAND J. H. et STEEVES J., *Sky-cover correlation within a sky dome*, J. Applied Meteorol. 30(7), pp. 1037-1039, 1991.

[87] WILLMOTT A. J. et HECKBERT P. S., *An Empirical Comparison of Radiosity Algorithms*, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pen, 1997.

[88] WINKELMAN F.C. et SELKOWITZ S., *Daylight simulation in the DOE-2 building energy analysis program*, Energy and Building, vol. 8, pp 271-286, 1985.

Ouvrages collectifs

[89] *Architecture : Comfort and Energy*, Gallo, Sala, Sayigh éditeurs, Pergamon, 1998.

[90] International Energy Agency Solar Heating and Cooling Program, Task 9-B: *Validation of solar irradiance simulation models*, IEA Report, Paris, 1987.

[91] Commission Internationale de l'Éclairage, *Natural daylight, Official Recommendation*, Compte-rendu CIE 13 Session 2, part 3.2 2-4, Paris, 1955.

[92] C.I.E., *ISO/CIE Standard overcast sky and clear sky*, 3rd Draft, K. Matssura (ed.), Div. 3, 1990.

[93] Commission Internationale de l'Éclairage, *Standardization of luminance distribution on clear skies*, Publication CIE n° 22, Bureau Central CIE, Paris, 1973.

[94] Commission Internationale de l'Éclairage, The International Daylighting Measurement Program-IDMP (1991-1995), Vienne, Autriche, 1991.

[95] Commission Internationale de l'Éclairage, Spatial distribution of daylight – Overcast sky and clear Sky CIE Draft Standard DS 003, Vienne, Autriche, 1994.

[96] *Daylight in Architecture, A European Reference Book*, N. BAKER, A. FANCHIOTTI, K. STEEMERS éditeurs, James & James, 1996.

[97] *Daylight Performance of buildings*, M. FONTOYNONT éditeur, ENTPE, Lyon, James & James, 1999.

[98] Traité de Physique du bâtiment, Tome1, CSTB, 1995.

Sites internet

[99] IEA Solar Heating and Cooling Program.
http://eande.lbl.gov/Task21/dlalgorithms.html

[100] Laboratoire d'Études Méthodologiques Architecturales LEMA, Université de Liège.
http://www.lema.ulg.ac.be/

[101] RUSINKIEWICZ S., *bv – a BRDF browser*.
http://graphics.stanford.edu/~smr/brdf/bv/

[102] SHEA G., *Radiosity Rendering with Specular Shading*, University of Colorado, 1993.
http://www.xmission.com/~shea/th1/thesis.html

[103] SUPERLITE 2.0
http://eande.lbl.gov/BTP/WDG/SUPERLITE/superlite2.html

[104] ZIMMONS P., *Exploring BRDF Mapping*, CS236 Project.
http://www.cs.unc.edu/~zimmons/cs236/BRDFmap.html

****

Table des matières

RESUME ***1***

ABSTRACT ***2***

SOMMAIRE ***3***

1 INTRODUCTION ; CONTEXTE DE LA RECHERCHE ***5***

1.1 Contexte 5

1.2 Objet de la recherche 8

1.3 Objectifs 11

1.4 Méthodologie 11

1.5 Structuration du document 13

2 SOLENE : ÉTAT DE L'EXISTANT ; PROPOSITIONS DE DÉVELOPPEMENT ***17***

2.1 Introduction 17

2.2 Historique d'un logiciel : *SOLENE* 19

2.2.1 Généralités 19

2.2.2 Historique du développement 20

2.3 Principes généraux 22

2.3.1 Généralités 23

2.3.2 Les objets SOLENE 23

2.3.2.1 Les géométries 24

2.3.2.2 Les descripteurs 24

2.3.2.3 Les fonctions 25

2.3.3 Exploitation des résultats 26

2.3.4 Représentation et visualisation 26

2.4 Les simulations 27

2.4.1 Simulation solaire 28

2.4.1.1 La technique « héliodon » 28

2.4.1.2 La technique « masque » 31

2.4.1.3 Analyse des résultats 32

2.4.2 Simulation des éclairements énergétique et lumineux diffus 33

2.4.3 Accessibilité visuelle 34

2.5 Conclusion 35

3 ASPECTS PHYSIQUES *41*

3.1 Énergie dispensée par l'astre solaire 41

3.1.1 Radiations directes et diffuses 42

3.1.2 « Effets » du rayonnement solaire 48

3.2 Les grandeurs physiques utilisées 49

3.2.1 Définitions et unités 49

3.2.2 Luminance et vision 50

3.3 Comportement des corps face au rayonnement 52

3.3.1 Généralités 52

3.3.2 Facteurs optiques 53

3.4 Conclusion 54

4 LUMIERE ET ARCHITECTURE : QUELQUES REPERES HISTORIQUES *55*

4.1 Urbanisme et ensoleillement 55

4.2 Prise en considération de la lumière diffuse 59

4.3 Conclusion 68

5 ÉVALUATION DE L'ENERGIE LUMINEUSE DANS LE PROJET ARCHITECTURAL ET URBAIN : ETAT DE L'ART *71*

5.1 Introduction 71

5.2 Des approches diverses 72

5.3 Aspects théoriques 75

5.3.1 Généralités 75

5.3.2 Les différentes projections géométriques 76

5.3.3 Le facteur de lumière du jour 79

5.3.3.1 Définition 80

5.3.3.2 Méthode en trois composantes 82

5.4 Méthodes et instrumentation 85

5.4.1 Techniques graphiques 85

5.4.1.1 Étude de l'ensoleillement 86

5.4.1.2 Étude de l'éclairement 97

5.4.2 Méthodes expérimentales 112

5.4.2.1 Ensoleillement 113

5.4.2.2 Éclairement diffus 115

5.4.2.3 Etudes *in situ* 118

5.4.3 Méthodes numériques 120

5.4.3.1 Tracés automatiques 120

5.4.3.2 Méthodes numériques proprement dites 123

5.4.3.3 Les outils de l'ingénieur 140

5.5 Conclusion 141

6 LE MODELE D'ECLAIREMENT DEVELOPPE POUR SOLENE *143*

6.1 Introduction 143

6.2 Cosmogonie 144

6.3 Géométrie céleste (cosmographie) 146

6.3.1 Généralités 146

6.3.2 Le mouvement apparent de la terre autour du soleil 150

6.3.2.1 L'angle horaire ω 151

6.3.2.2 L'équation du temps *ET* 152

6.3.2.3 La déclinaison δ 154

6.3.2.4 L'altitude *h* 156

6.3.2.5 L'azimut α 156

6.3.2.6 L'angle solide ϖ 159

6.4 Énergie solaire 160

6.4.1 Du soleil à la surface terrestre 160

6.4.1.1 La constante solaire extraterrestre E_0 ; l'excentricité α' 162

6.4.1.2 La masse d'air optique *m* (ou masse atmosphérique) 163

6.4.1.3 La hauteur d'eau précipitable *w* ; le trouble atmosphérique *T* 166

6.4.1.4 Le coefficient d'extinction atmosphérique *a* 167

6.4.2 L'éclairement solaire direct : les différents modèles 168

6.4.2.1 Formules de Perrin de Brichambaut 168

6.4.2.2 Expression de Dogniaux 170

6.4.2.3 Formule de Perraudeau 170

6.4.2.4 Le logiciel Radiance 170

6.4.2.5 Modèle Perez et al. 171

6.4.3 Comparaison des modèles 172

6.4.4 Conclusion 173

6.5 Modèle géométrique de ciel 173

6.5.1 Introduction 173

6.5.2 Différents modes de discrétisation de la voûte céleste 174

6.5.2.1 Discrétisation en éléments trapézoïdaux (type CIE et Le Strat) 175

6.5.2.2 Discrétisation en éléments « circulaires » 177

6.5.2.3 Discrétisation en secteurs sphériques 178

6.5.3 Méthode développée dans SOLENE : la triangulation géodésique 179

6.6 Distribution des luminances sur la voûte céleste 183

6.6.1 Généralités 183

6.6.2 Modèles de ciels couverts sans aucune prise en compte de la position du soleil 188

6.6.2.1 La luminance zénithale L_z 189

6.6.2.2 Les modèles de ciel couvert 190

6.6.2.3 Comparaison des modèles 192

6.6.3 Modèles de ciels couverts (avec prise en compte de la position du soleil) 193

6.6.4 Modèles de ciels sereins 195

6.6.4.1 La luminance zénithale L_z 195

6.6.4.2 Le ciel serein CIE 196

6.6.5 Modèles de ciels « intermédiaires » 198

6.6.6 Modèles « tous temps » 204

6.6.7 Autres modèles 208

6.6.8 Conclusion 208

6.7 Modes de représentation et de visualisation 209

6.7.1 Méthodes classiques 210

6.7.2 Méthodes développées pour SOLENE 212

6.8 Efficacité lumineuse du rayonnement 215

6.8.1 Généralités 215
6.8.2 La compilation de Paul J. Littlefair 215
6.8.3 Le modèle d'efficacité lumineuse de Perez 219
6.9 Conclusions 222
6.9.1 À propos des modèles de ciel 222
6.9.2 Quelques précisions concernant la terminologie utilisée 223

7 MISE EN PLACE D'UN MODELE DE REFLEXION 227
7.1 Énergie reçue par la scène 227
7.1.1 Aspects géométriques 228
7.1.2 Détermination de la visibilité 230
7.1.3 Échantillonnage de la scène 231
7.1.3.1 Généralités 231
7.1.3.2 Contraintes et type de maillage utilisé 232
7.2 Réflexions multiples 234
7.2.1 Hypothèses simplificatrices 235
7.2.2 Traitement du processus de réflexions multiples 236
7.2.2.1 Principes généraux 236
7.2.2.2 Mise en équation 239
7.2.2.3 Détermination des facteurs de forme 241
7.2.2.4 Solution du système d'équations linéaires des radiosités 254
7.2.3 Remarques complémentaires 260
7.2.3.1 Vitesse de convergence 260
7.2.3.2 Aspects technologiques 261
7.2.4 Conclusion 262
7.3 Réflexion et facteurs optiques des matériaux 263
7.3.1 Principes 264
7.3.2 Les modèles de réflexion 268
7.3.3 Modèle en phase d'implémentation dans SOLENE 275
7.3.3.1 Choix des modèles 276
7.3.3.2 Visualisation 278
7.3.4 Conclusion 279
7.4 Conclusion 280

8 INSTRUMENTATION ET TRAITEMENT DES VITRAGES 283
8.1 Le processus de simulation : synoptique 283
8.2 Le processus de simulation : exemple de traitement 284
8.2.1 Modélisation, simulations et exploitation des résultats 284
8.2.1.1 Ensoleillement 286
8.2.1.2 Éclairement dû à la voûte céleste seule 287
8.2.1.3 Éclairement total 288
8.2.1.4 Facteurs de forme 288
8.2.1.5 Traitement des réflexions multiples 289
8.2.1.6 Autres modes d'exploitation de la base de données 290
8.2.2 Conclusion 292
8.3 Traitement des vitrages 292
8.3.1 Généralités 292

8.3.1.1 Le vitrage comme source diffuse 293
8.3.1.2 Le vitrage comme élément de transmission extérieur/intérieur 294
8.3.2 Éléments caractéristiques d'un vitrage 294
8.3.2.1 Le facteur d'ensoleillement 295
8.3.2.2 Le facteur solaire 295
8.3.2.3 Le coefficient de transmission 296
8.3.3 Mode de résolution proposé dans SOLENE 300
8.3.4 Exemple de traitement 303
8.3.4.1 Éclairement direct 303
8.3.4.2 Facteurs de forme 305
8.3.4.3 Réflexions multiples 305
8.3.4.4 Plan fictif horizontal et facteur de lumière du jour 306
8.4 Autres applications 307
8.4.1 Cartographie des potentialités d'éclairement d'un site 307
8.4.2 Indicateur de visibilité : ciel visible depuis un point quelconque de l'environnement 309
8.4.3 Éclairement reçu sur un plan horizontal fictif ; facteur de lumière du jour 310
8.4.4 Conclusion 310
8.5 Quelques remarques à propos de la validation 311

9 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES *315*
9.1 Éléments de conclusion 315
9.2 Perspectives 316
9.3 Prospective 320

ANNEXE 1 : LES GRANDEURS PHYSIQUES UTILISEES : DEFINITIONS ET UNITES *323*
A1.1 Grandeurs géométriques 323
A1.1.1 Coordonnées sphériques 323
A1.1.2 Angle solide 324
A1.2 Grandeurs énergétiques et lumineuses 325
A1.2.1. Flux énergétique ; flux lumineux 326
A1.2.2 Éclairement énergétique ; éclairement lumineux 326
A1.2.3 Exitance énergétique ; exitance lumineuse 327
A1.2.4 Intensité 328
A1.2.5 Luminance énergétique ; luminance lumineuse 329
A1.3 Résumé des grandeurs physiques utilisées 334
A1.3.1 Relations entre les grandeurs physiques 334
A1.3.2 Tableaux synoptiques 335
A1.4 Définitions des unités 337

ANNEXE 2 : CODES IMPLEMENTES AU LOGICIEL SOLENE ***339***

A2.1 Codes relatifs à la modélisation des luminaires 339

A2.2 Codes relatifs à la relation géométrique scène/ciel 340

A2.3 Codes relatifs au traitement des inter-réflexions 341

A2.4 Autres utilitaires développés 342

ANNEXE 3 : MODELE, MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUES ***343***

A3.1 La notion de modèle 343

A3.2 Les aléas du modèle 345

A3.3 Simulation numérique et architecture 346

BIBLIOGRAPHIE ***347***

Ouvrages ou articles classés par nom d'auteur 347

Sites internet 353

TABLE DES MATIERES ***355***

****