

Année 2007

Thèse de DOCTORAT

Discipline : *Sciences pour l'ingénieur*

Spécialité : *Architecture*

Présentée et soutenue publiquement par

Vincent TOURRE

le 18 octobre 2007

à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural

JURY

Rapporteurs	M. MARC DANIEL	<i>Professeur, Université de la Méditerranée</i>
	M. FRANÇOIS GUÉNA	<i>Professeur, ENSA Paris La Villette</i>
Examineurs	M. JEAN-PIERRE GUÉDON	<i>Professeur, Université de Nantes</i>
	M. GILLES HALIN	<i>Maître de conférence, ENSA Nancy</i>
	M. GÉRARD HÉGRON	<i>Professeur, ENSA Nantes</i>
	M. XAVIER PUEYO	<i>Professeur, Université de Gérone</i>
Invité	M. JEAN-YVES MARTIN	<i>Maître de conférence, École Centrale de Nantes</i>

Directeur de thèse : G. HÉGRON

Laboratoire / Composante : CERMA / École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

Co-encadrant : J.-Y. MARTIN

Laboratoire / Composante : CERMA / École Centrale de Nantes

CERMA UMR CNRS/MCC 1563

N°ED : 0367-296

**Simulation inverse de l'éclairage naturel
pour le projet architectural**

Vincent Turre

Remerciements

À l'issue de ce projet, qui est tout autant un cheminement personnel qu'une construction collaborative, je tiens particulièrement à remercier mon directeur de thèse Gérard Hégron ainsi que Jean-Yves Martin, pour leurs enseignements sur le métier de chercheur ; les membres du jury Marc Daniel, Gilles Halin, François Guéna, Xavier Pueyo et Jean-Pierre Guédon qui participent à la finalisation de ce travail ; l'équipe pédagogique de centrale Nantes, entre autres Guillaume Moreau et Jean-Sébastien Lebrizaut ; les initiateurs du projet de recherche : Daniel Siret et Francis Miguet ; les membres du CERMA, avec une mention spéciale pour Martine pour ses conseils si avisés et l'école nationale supérieure d'architecture de Nantes qui m'a offert ce cadre de travail si idyllique ;

mais aussi, les doctorants du laboratoire et d'ailleurs pour leur soutien moral (et festif) ; les adeptes de go, de taï-chi et de science fiction pour toutes ces heures de relaxation dynamique ; les cobayes architectes pour leurs interminables discussions conceptuelles : Julien, Thomas, Yann et Caroline (qui a le courage de me supporter au quotidien) ; Alex pour la découverte de la Bretagne ; le cercle des voisins disparus : Myriam, Karla, Erell, Fred, Benoît et Laurent ; Michel pour ses encouragements à poursuivre la (dure) voie de la recherche ; mes amis montpelliérains qu'il serait trop long de tous citer ici ; ma famille, Pierre, Micheline et les autres, qu'ils soient ou non ; ma mère que j'aime tant et mon père sans qui je ne serais jamais arrivé au bout.

Résumé

Ce travail de recherche concerne un modèle de simulation inverse de l'éclairage permettant la prise en compte de la lumière naturelle dans le projet architectural. Notre objectif est de développer une méthode numérique d'aide à la « conception par l'intention d'ambiance » qui s'apparente à la conception paramétrique. Cette recherche est focalisée sur la lumière incidente provenant de la voûte céleste et de l'environnement urbain.

Nous proposons une méthode qui concrétise les intentions d'ambiance lumineuse, par la production des propriétés géométriques et photométriques des ouvertures. Cette méthode s'attache tout d'abord à matérialiser les intentions d'ambiance lumineuse dans une scène 3d, par un rendu photométrique et des descripteurs graphiques. L'action sur ces descripteurs permet au concepteur d'exprimer ses intentions d'ambiance lumineuse à travers les paramètres physiques de l'éclairage.

Un modèle de simulation inverse de l'éclairage utilise ensuite ces paramètres physiques pour calculer les ouvertures. Le problème de la simulation inverse est posé comme une recherche d'émittance de sources. Une comparaison d'images entre l'apport des sources lumineuses et l'éclairage souhaité, permet d'évaluer les propriétés des éléments d'ouverture, et par conséquent, de définir les ouvertures du bâtiment. Le modèle est validé par des tests de reconstruction d'ouverture. La confrontation à une situation réelle montre les possibilités d'intégration de cette méthode dans la conception architecturale.

Abstract

This research project deals with an inverse lighting model taking into account daylighting in architectural project. Our goal is to propose a digital method to assist “design by ambience intention” which is close from parametric design. Our work focuses on incident light coming from sky vault and urban surroundings into the designed space.

We propose a method which concretizes lighting ambience intentions, by producing geometrical properties of openings. In first place, our method materializes lighting ambience intentions in a digital scene, with a photometric rendering and graphic descriptors. By using these descriptors, the designer is allowed to express his lighting ambience intentions through physical lighting parameters.

An inverse lighting model uses these physical parameters to compute opening shape and size. Inverse lighting problem is seen as a source emittance research problem. An image comparison between source lighting and intended lighting allows to evaluate sources properties, and therefore to define building openings. This model is checked through opening reconstruction in test cases. Confrontation to real situations shows integration possibilities of our model in architectural design.

ABSTRACT

Sommaire

Introduction	1
I Présentation du problème de simulation inverse de l'éclairage naturel	7
1 Contexte de la CAAO	9
2 Problématique	41
3 État de l'art	67
II Une méthode d'éclairage inverse pour la conception architecturale	97
4 Positionnement	99
5 Réalisation	123
6 Résultats	167
Conclusion	199
III Annexes	205
A Perception Visuelle	207
B Unités de la lumière	219
Bibliographie	221

Introduction

« It seeks to show that good daylight design is not a restriction of architectural expression – on the contrary, it is more likely to act as an inspiration and foundation for good architecture. »

Marc FONTOYNONT [Baker et Steemers, 2001]

L'APPARITION de la Conception Architecturale Assistée par Ordinateur (CAAO) au début des années 80 [Quintrand *et al.*, 1985], si elle a facilité certains aspects de la conception architecturale, n'a pas modifié fondamentalement le rôle de l'outil de conception. L'informatique est la science du traitement de l'information, et c'est ce traitement qui est optimisé dans les outils numériques. Les informations données par le concepteur sont donc mieux traitées, mais celui-ci n'en reste pas moins l'initiateur. Par rapport à l'utilisation actuelle de la CAAO, deux catégories de problème se dégagent :

- la conception d'une idée en vue de sa représentation : l'aide à la conception
- le dessin d'une idée conçue en vue de sa réalisation : l'aide au dessin

La représentation d'une intention architecturale est un lien entre la conception et le dessin. L'assistance à la conception peut donc se définir comme une aide à la production d'une représentation, afin de faciliter l'expression des intentions du concepteur. Nous sommes en particulier intéressés par les « intentions

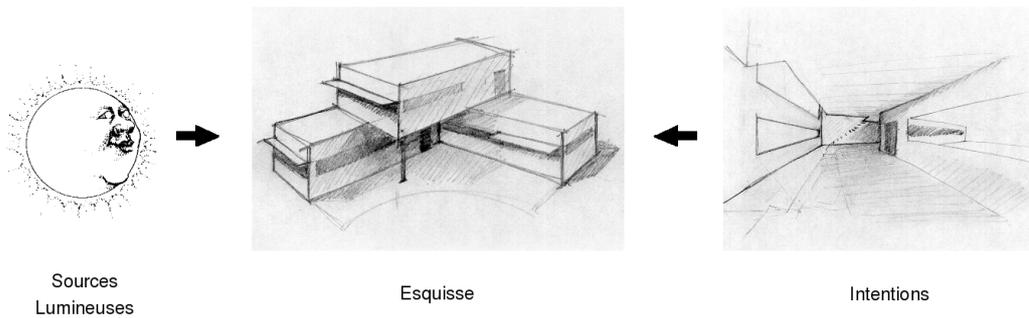


FIG. 1 – L'intention d'ambiance dans l'esquisse.

d'ambiance » que nous comprenons comme la volonté de reproduction d'une ambiance, vécue ou imaginée (fig. 1).

Ambiances architecturales et urbaines

Les ambiances architecturales et urbaines rassemblent sous un même terme la perception du milieu et l'influence de l'environnement construit, au niveau physique et social. Selon cette définition, l'ambiance d'un lieu est le trait d'union entre l'homme et l'architecture. L'éclairage, support physique de l'ambiance lumineuse, est un équilibre entre l'espace et la lumière : la lumière révèle l'espace, et l'espace transforme la lumière.

Le bâtiment peut être considéré comme un filtre de la lumière naturelle par son interaction avec les phénomènes physiques. Au cours de la conception, l'architecte est donc en possession d'un formidable outil, le bâtiment, qui lui permet de maîtriser les phénomènes physiques, et ainsi modeler l'éclairage intérieur.

Simulation inverse de l'éclairage

La conception architecturale est généralement assistée par des simulations, graphiques ou numériques, qui valident une configuration élaborée à l'aide de

l'intuition et de l'expérience. Les résultats des simulations mettent en évidence la relation entre l'ambiance et le bâtiment. Le concepteur peut alors constater les différences vis-à-vis de ses attentes, et faire une nouvelle proposition. Dans cette optique, la simulation de phénomènes physiques constitue une aide à la conception.

La simulation de l'éclairage permet d'anticiper la distribution lumineuse à partir de la définition d'un volume, et de la comparer à l'intention d'ambiance. Grâce à une succession de simulations lumineuses, le concepteur peut travailler sur les volumes ou les matériaux, et apprécier leur impact sur l'éclairage. Ces éléments, qui sont les leviers permettant de maîtriser l'éclairage, n'en restent pas moins des intermédiaires entre le concepteur et l'ambiance lumineuse.

La préoccupation de la simulation inverse est de rechercher les causes d'un phénomène à partir de ses effets. La simulation inverse de l'éclairage propose d'agir directement sur le bâtiment à partir de la description des intentions d'ambiance lumineuse. Les intentions d'ambiance exprimées par le concepteur sous forme d'éclairage sont directement traitées par le modèle de simulation inverse. Ce modèle donne des indices sur la configuration spatiale nécessaire pour réaliser les intentions.

Aide à la conception architecturale

Ce problème particulier de simulation inverse de l'éclairage prend place au sein de la conception architecturale. L'architecture, qui est l'organisation de l'espace, des vides et des pleins, est un art pluridisciplinaire par excellence, car il concerne aussi bien la poésie et l'esthétique, que le fonctionnel et la technique. Le développement du projet architectural conjugue la volonté propre du concepteur avec des contraintes diverses, qu'elles soient fonctionnelles ou normatives.

Cette place impose au modèle de simulation inverse des contraintes relatives

à l'éclairage naturel et à l'expression des intentions de l'architecte. La problématique concerne aussi bien le type des informations à traiter, les intentions d'ambiance lumineuse, que l'intégration des sources naturelles de l'éclairage, le ciel et l'environnement. Par ailleurs, la question sur la nature de l'aide à la conception ne peut être ignorée, tant le modèle est impliqué dans l'acte de création.

Motivation et objectif

Ce travail s'inscrit dans la continuité de la recherche sur la simulation inverse de l'ensoleillement et de l'accessibilité visuelle du laboratoire CERMA [Siret, 1997, Nivet, 1999, Houpert, 2003]. Nous souhaitons étendre ces travaux pour prendre en compte l'éclairage naturel, qui comprend l'ensoleillement et l'éclairage diffus, ainsi que les masques proches, les bâtiments et la végétation. Cet aspect de l'éclairage dépend aussi bien de la transparence de la façade que de la localisation géographique du bâtiment et du climat. Le traitement de l'éclairage naturel participe au confort des usagers par le biais de la perception visuelle. De plus, il détermine la quantité de l'apport énergétique solaire, et influe sur la consommation énergétique du bâtiment. Une concertation avec des professionnels (architectes et bureaux d'études), nous permet d'appréhender les difficultés de conception rencontrées dans la pratique, en particulier dans la mise en place de la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE). Démarche dans laquelle la maîtrise de la qualité de l'éclairage naturel est majeure, et influence très fortement la conception du bâtiment.

Notre objectif est d'offrir une aide à la conception architecturale à l'étape de l'esquisse architecturale, lorsque les choix des grandes lignes du projet ne sont pas encore arrêtés. Le modèle doit faire prendre conscience au concepteur de l'impact sur la géométrie et les matériaux de ces choix d'ambiances par rapport

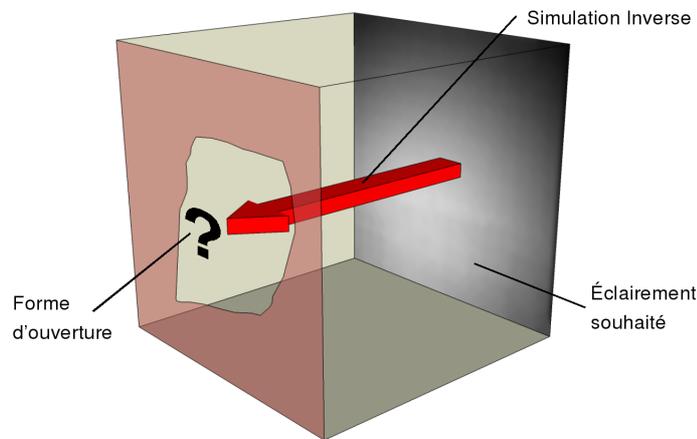


FIG. 2 – La conception des ouvertures par l'éclairage.

à l'éclairage naturel. Ceci implique que le concepteur se considère plus créateur d'ambiance lumineuse que bâtisseur, autrement dit un créateur du contenu plutôt que du contenant.

Simulation inverse de l'éclairage naturel

Pour aborder cette problématique, un état de l'art des méthodes de simulation inverse de l'éclairage permet d'explorer les possibilités des modèles actuels. Suite à l'analyse de ces derniers, nous sommes en mesure de proposer un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel adapté à la conception architecturale.

Nous prenons position sur un problème particulier : l'aide à la définition des ouvertures à partir de la lumière incidente (fig. 2). Notre première hypothèse concerne l'expression des intentions d'ambiance lumineuse relatives à la lumière incidente. Une interface de description, basée sur une représentation photométrique de l'éclairage, est proposée pour exprimer les intentions d'ambiance lumineuse. La deuxième hypothèse concerne un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel basé sur un modèle sténopé et une comparaison d'image. Nous considérons la relation entre le bâtiment et l'environnement, autrement

dit, l'éclairage naturel créé par les interactions entre la lumière naturelle et l'architecture. Ce modèle déduit les propriétés des ouvertures à partir de la répartition souhaitée de l'éclairage naturel. Notre principale contribution est constituée par la définition, la mise en œuvre et l'évaluation de ce modèle dans un environnement de travail de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

Présentation du mémoire

La première partie est consacrée à la présentation du problème de la simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural. L'exploration du contexte de ce projet de recherche, l'architecture, permet de prendre conscience de la place de l'ambiance lumineuse dans la conception architecturale. Le deuxième chapitre vient ensuite juxtaposer les éléments du contexte pour construire la problématique. Une veille des travaux précédents sur la simulation inverse de l'éclairage en architecture nous renseigne sur l'état actuel de ce domaine de recherche.

La deuxième partie présente un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel dédié à la conception architecturale. Plus précisément, nous abordons le problème de l'aide à la conception des ouvertures. Nos hypothèses, formulées pour répondre à ce problème, sont relatives à l'expression des intentions d'ambiance et la simulation inverse de l'éclairage dû à la lumière incidente. Le cinquième chapitre présente un environnement de travail contenant une interface d'expression des intentions d'ambiance lumineuse, et un modèle de simulation inverse basé sur la chambre noire et une comparaison d'images. Les résultats obtenus, avec le prototype implémenté, montrent la faisabilité et les limites de la démarche.

Première partie

Présentation du problème de simulation inverse de l'éclairage naturel

Chapitre 1

Contexte de la CAAO

Sommaire

1.1	Architecture et ambiance	11
1.1.1	Objet architectural	12
1.1.2	Éclairage naturel	15
1.1.3	Ambiance lumineuse	18
1.2	Conception architecturale	26
1.2.1	Le projet architectural	26
1.2.2	Outils de la conception architecturale	29
1.2.3	Ambiance et conception	38

LE CONTEXTE de cette recherche concerne le rôle de l'ambiance lumineuse dans le projet architectural. Les mécanismes de la perception visuelle influencent, au niveau physiologique et psychologique, notre appréhension de l'environnement dans lequel nous évoluons et, en particulier, de l'éclairage dans les espaces construits (annexe A). La compréhension de cette perception est nécessaire pour introduire la notion d'ambiance architecturale et urbaine. L'ambiance est une reconstruction de l'environnement par l'esprit, liée aux phénomènes physiques et à la culture de l'observateur. L'ambiance lumineuse intervient dès les premières phases de la conception architecturale, lors de l'expression des intentions d'ambiance lumineuse. La conception architecturale est présentée comme un processus de création qui exprime un parti architectural à travers la concrétisation des intentions.

1.1 Objet architectural et ambiance

La lumière est un élément architectural intangible, c'est une composante de l'objet architectural au même titre que l'enveloppe ou l'espace. « *La lumière est un élément constitutif de l'espace qui l'organise, le délimite par son immatérialité et le rythme par son mouvement.* » [Chelkoff et Thibaud, 1992]. La lumière ne peut être ôtée du bâtiment, de son concept, de sa structure, de sa construction ou de l'environnement de travail en résultant [Millet, 1996]. Cette partie présente la nature de l'objet architectural et sa relation à la lumière à travers l'éclairage, qui décrit le phénomène physique d'interaction entre le bâtiment et la lumière, puis à travers la notion d'ambiance lumineuse, qui implique la perception de l'éclairage et l'usage du bâtiment (fig. 1.1).

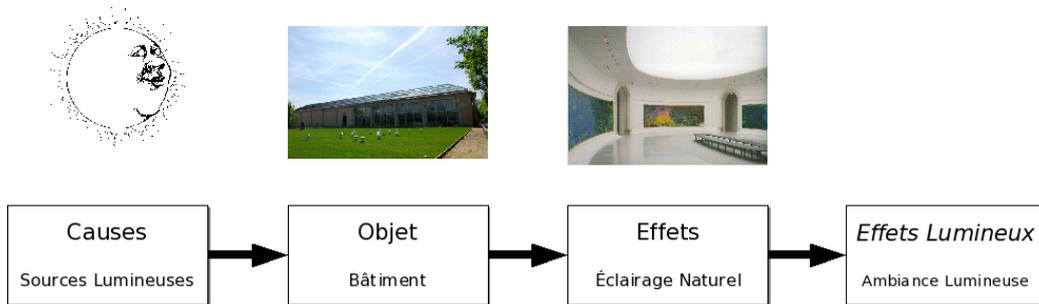


FIG. 1.1 – Le phénomène physique d'éclairage naturel.

1.1.1 Objet architectural

L'objet architectural est constitué d'une enveloppe, qui en souligne la frontière, et d'un espace construit, qui est l'espace contenu dans cette enveloppe. Cet objet entretient une relation avec l'homme, usager de l'espace, et avec son environnement naturel et urbain.

L'habiter

L'habiter peut être exprimé très différemment selon les cultures. En Orient, l'étymologie de « habiter » vient de calme et pureté : l'intérieur est serein et l'extérieur est chaotique. En Occident, le verbe habiter vient de être et avoir, l'intérieur est l'habitation que l'on possède et l'endroit où l'on vit, et l'extérieur n'appartient à personne, il est « inapproprié ». Par extension, l'habiter est rattaché à toutes les pratiques du bâtiment, et pas seulement au logement. L'appropriation, condition *sine qua non* de l'habiter, se fait par l'usage ou la construction du bâtiment [Heidegger, 1980]. Le terme usage est compris comme le fait d'utiliser le bâtiment.

L'espace construit

La notion d'objet architectural comprend non seulement le bâtiment, qui en est la représentation concrète, mais aussi l'espace délimité ou suggéré par ce bâtiment. Un bâtiment vu de l'extérieur est un objet au sein d'un milieu. Vu de l'intérieur, ce même bâtiment est un contenant qui enveloppe des objets, des lieux ou des individus. Ces individus, usagers du bâtiment, habitent le lieu défini par l'espace construit. La relation entre le bâtiment et l'espace construit est une des qualités de l'objet architectural. Bien que notre recherche soit focalisée sur l'objet architectural, nous ne perdons pas de vue l'aspect urbain induit par l'espace construit.

Enveloppe

La fonction primordiale du bâtiment est de fournir un abri au sein de l'environnement. Cet abri est un lieu de regroupement et permet la naissance d'un sentiment de protection. Le changement perceptif provoqué par cet abri amène à la définition d'un « dedans » par rapport à un « dehors ». D'après Robert Venturi, la limite entre intérieur et extérieur, symbolisée par le mur, est une représentation de l'architecture.

Relation au milieu

« Lieu, du latin locus, est, au sens littéral, une portion déterminée de l'espace, [...] c'est un endroit situé sur une carte et qui entretient des relations avec d'autres lieux. » [Bonhomme, 2005]

Cette définition du lieu peut s'appliquer à tout espace construit, aussi bien l'architecture que l'urbanisme. L'objet architectural étant situé dans un certain contexte, l'espace construit qu'il contient entretient une relation avec son milieu.



FIG. 1.2 – *Glass house* (1949) par Philip Johnson à New Canaan, États-Unis (Connecticut).

Les phénomènes physiques, tel l'éclairage naturel, sont des éléments du milieu qui participent à cette relation. Celle-ci, que l'on peut qualifier comme une interaction intérieur/extérieur, peut avoir un aspect continu ou contrasté, dynamique ou statique.

Ouvertures

L'enveloppe de l'objet architectural peut être vue comme un filtre des éléments qui vont pénétrer l'espace construit. Ce filtre est défini par sa forme et ses matériaux. Les ouvertures font partie des éléments de l'enveloppe qui permettent la relation entre l'espace construit et son environnement. Une ouverture est constituée non seulement d'un percement dans l'enveloppe, mais aussi de tous les dispositifs de filtrage de l'éclairage. La *Glass House* de Philip Johnson est un exemple d'enveloppe très ouverte (fig. 1.2).



FIG. 1.3 – *London City Hall* (1998) par Norman Foster à Londres, Royaume-Uni.

1.1.2 Éclairage naturel

L'éclairage naturel est généré par la répartition de la lumière naturelle pénétrant l'espace construit. C'est le résultat de la propagation de la lumière à travers l'enveloppe, et de la réflexion de cette lumière par les matériaux constituant le bâtiment. Les unités mesurant la lumière sont rappelées dans l'annexe B.

Sources de l'éclairage naturel

Le soleil est la source primordiale de l'éclairage naturel. La voûte céleste est un intermédiaire qui est considéré comme une source de lumière naturelle.

Tous les éléments qui peuvent réfléchir la lumière provenant de ces deux sources sont considérés comme autant de sources secondaires de lumière naturelle. Un cas typique de source secondaire est celui d'un immeuble de verre qui sera une source de lumière naturelle pour son environnement (fig. 1.3). La réflexion d'une tache solaire peut aussi être vue comme une source de lumière naturelle.

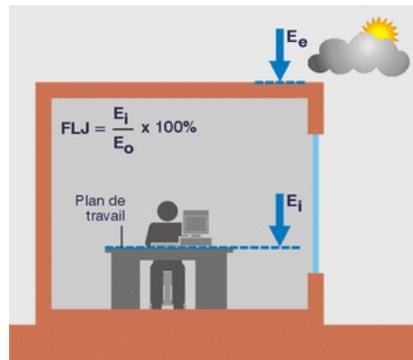


FIG. 1.4 – Facteur de lumière du jour (Wikipedia).

Mesure de l'éclairage

L'indication globale de la quantité d'éclairage naturel disponible dans un local est fournie par le facteur de lumière du jour [Fontoynt, 1998] (Équation 1.1).

$$FLJ_{moy} = \frac{S_v \cdot TL \cdot \alpha}{S_t \cdot (1 - R^2)} \quad (1.1)$$

avec S_v la surface nette de vitrage, TL le facteur de transmission lumineuse du vitrage, α l'angle du ciel visible depuis la fenêtre, S_t la surface totale de toutes les parois du local, R le facteur de réflexion moyen des parois du local (0,5 par défaut).

Ce facteur est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale, en site parfaitement dégagé, par ciel couvert CIE [Com, 2007] (fig. 1.4).

Une évaluation plus détaillée de l'éclairage demande une campagne de mesure *in situ* avec un luminance-mètre. La simulation numérique, quant à elle, permet d'avoir une prévision détaillée de l'éclairage, à condition de disposer d'un modèle réaliste de l'éclairage naturel [Miguet, 2000].

Le bâtiment : générateur de l'éclairage

L'éclairage naturel est un des phénomènes physiques qui participent à la relation intérieur/extérieur. L'éclairage naturel est le résultat de l'interaction entre le bâtiment et la lumière. Cette interaction peut être vue comme la transformation de la lumière naturelle par l'enveloppe pour créer l'éclairage de l'espace intérieur. Cette transformation, créée par les différents éléments de l'enveloppe, lie si étroitement la lumière à l'objet architectural qu'elle en devient un élément propre.

Les ouvertures conditionnent l'apport de lumière provenant de l'extérieur par leurs formes et leurs matériaux. Elles transforment la lumière selon les différentes longueurs d'ondes qu'elles absorbent, transmettent ou réfléchissent. Ces ouvertures sont généralement associées à d'autres phénomènes physiques : aéraulique, thermique, visibilité. Par exemple, le volet italien mobile, ou volet à portisol, est une réponse de filtre adaptatif au climat, et permet une régulation lumineuse et thermique .

Rôle de l'éclairage

L'éclairage a un rôle de liaison depuis les sources de lumière naturelle jusqu'à la sensation de l'observateur à travers l'environnement urbain et l'objet architectural. L'éclairage est destiné à notre corps, il est non seulement lié à la sensation visuelle mais il a aussi une influence physiologique.

Les effets physiologiques, tels que la stimulation hormonale et l'influence sur les rythmes biologiques diurnes, ont mis en évidence la relation entre l'activité professionnelle et l'éclairage naturel. Le lien entre l'éclairage et la visibilité est très fort, et l'éclairage naturel est souvent lié à la communication visuelle entre l'intérieur et l'extérieur [Enrech-Xena, 1999].

Éclairer L'éclairage met en lumière et lie le bâtiment à la perception visuelle. Il permet l'expérience du lieu [Millet, 1996] à travers la révélation de l'espace. De ce fait, l'éclairage a un rôle fonctionnel [Chelkoff et Thibaud, 1992] : être supérieur au seuil minimal de perception. L'éclairage participe donc à l'aspect fonctionnel de l'architecture, et il peut se traduire par des normes d'éclairage qui permettent l'usage du bâtiment ou de l'espace urbain. Le respect des normes d'éclairage pour le travail ou autre activité (AFNOR), demande une certaine quantité de lumière. La directionnalité est aussi prise en compte pour définir l'éclairage nécessaire à certaines tâches spécifiques sur des objets réfléchissants. La protection des œuvres dans les musées considère avec soin l'intensité sur une longue durée pour éviter les effets destructeurs de la lumière sur les œuvres fragiles.

1.1.3 Ambiance lumineuse

L'ambiance lumineuse est une des composantes des ambiances architecturales et urbaines, au même titre que l'ambiance sonore ou olfactive. Elle résulte de notre perception de l'éclairage et de l'espace construit, lors de l'usage de cet espace construit. On peut décrire cette ambiance à travers les effets lumineux qui la composent. Le rôle de l'ambiance lumineuse dépend du sens qu'elle donne à l'espace.

Ambiances architecturales et urbaines

Les ambiances architecturales et urbaines expriment de manière structurée la relation de l'homme à son milieu. C'est une notion qui représente la globalité de notre perception de l'environnement. Elles sont décomposées en ambiances sensorielles pour permettre une étude pratique.

L'homme et le milieu La relation de l'homme au milieu est un élément fondamental de la notion d'ambiance architecturale et urbaine. La définition de la réalité sensible (*chôra*), propriété ontologique, se distingue du lieu physique (*topos*) et de l'idée sous-tendue par ce lieu (*eidós*) [Nussaume, 2000]. Cette réalité sensible, « l'écoumène »¹, est la relation entre l'homme et son environnement dont il est à la fois organisateur et usager. On retrouve cette notion chez Platon avec l'association *topos/chôra* qui considère le lieu sensible, contrairement à Aristote ou Descartes qui ne voient que le *topos*. Cette relation dépend du lieu physique, du sens donné à ce lieu et des impressions qu'il nous procure. Cette réalité sensible ne se réduit pas à une simple réalité physique, ni purement subjective puisque justement ce sont les deux composantes qui en définissent l'idée. Si l'on essaye de considérer alternativement les deux notions pour les étudier, on est justement privé de la relation entre les deux.

Notion d'ambiances architecturales et urbaines [Augoyard, 1998] Les ambiances architecturales et urbaines rassemblent sous un même terme la perception du milieu et l'influence de l'environnement au niveau physique et social. Cette notion peut être appréhendée comme une formalisation de la réalité sensible (l'écoumène). C'est un ensemble de phénomènes répondant aux conditions suivantes (fig. 1.5) :

- Les signaux physiques sont repérables et décomposables.
- Ces signaux interagissent avec la perception et l'action des sujets, et les représentations sociales et culturelles.
- Ces phénomènes composent une organisation spatiale construite.
- Le complexe [signaux/percepts/représentations] est exprimable.

¹ Selon Augustin Berque dans la Préface de [Nussaume, 2000]

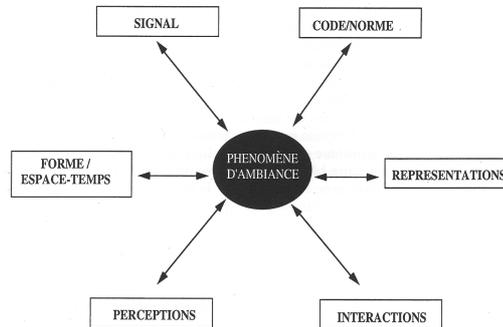


FIG. 1.5 – Modalités d'un phénomène d'ambiance *in situ* [Augoyard, 1998]

Ambiances sensorielles L'ambiance d'un lieu est appréhendée par des canaux sensoriels distincts. Ces canaux décomposent l'ambiance en ambiances sensorielles qui sont facilement identifiables (visuelle, sonore, tactile, etc.). Elle est ensuite recomposée par l'esprit qui nous permet de l'apprécier dans son ensemble. C'est bien la réunion et l'imbrication de ces ambiances sensorielles qui créent l'ambiance globale. Une étude des ambiances sensorielles distinctes permet de caractériser l'ambiance précisément selon des indices de confort [Mudri, 1996]. D'autres approches permettent de qualifier les ambiances sensorielles par des enquêtes sociologiques ou des observations anthropologiques.

Usage du bâtiment : génération de l'ambiance lumineuse

L'usage du bâtiment implique la perception de l'objet architectural par un observateur. La perception visuelle de l'objet architectural se fait à travers la perception du bâtiment et de l'éclairage généré par celui-ci (Éclairage 1.1.2). La perception de l'éclairage établit une des relations entre l'homme et l'objet architectural, et fournit les conditions d'émergence de l'ambiance lumineuse. C'est donc au cours de l'usage qu'il y a génération de l'ambiance lumineuse par le biais de la perception visuelle. C'est en ce sens que l'éclairage est un révélateur



FIG. 1.6 – *Church of light* (1989) par Tadao Ando à Osaka, Japon.

d'expérience du lieu [Millet, 1996]. L'expérience vécue d'un lieu remplace toutes les descriptions, et c'est la confrontation d'expériences qui permet de dégager une analyse objective du lieu [Chelkoff et Thibaud, 1992]. L'ambiance est notre appréhension de l'expérience du lieu.

Mouvement de l'utilisateur Le mouvement de l'utilisateur participe à la génération de l'ambiance lumineuse [Tahrani, 2006, Sarradin, 2004]. Par exemple, dans la *Church of light*, Tadao Ando nous livre sa vision spectaculaire de la religion (fig. 1.6). Après un cheminement qui met en état d'attente et de recueillement, une perspective impressionnante incite à focaliser le regard sur la croix de lumière naturelle tout en proposant une ouverture sur l'extérieur, sur le monde, et fait participer la nature comme composante de l'église [Nussaume, 2000].

Description de l'ambiance lumineuse : effets lumineux

La description des qualités de l'ambiance lumineuse dépend de l'aspect, fonctionnel ou esthétique, que l'on souhaite évaluer. Les qualités fonctionnelles sont mesurées par l'intensité et la direction de la lumière reçue à l'aide d'instruments de mesure (Éclairage 1.1.2). Les qualités esthétiques sont évaluées de manière subjective par rapport à l'impression ressentie à travers la perception d'une ambiance lumineuse. La perception humaine est difficilement descriptible par un appareil de mesure. Un outil qualitatif, l'effet, permet de décrire l'espace perçu à travers la caractérisation de la lumière. Cet outil utilise l'expérience directe du lieu afin de montrer les sensations provoquées, les observations suscitées et la compréhension des intentions des concepteurs.

Notion d'effet ambiance [Augoyard et Torgue, 1995] Un ensemble d'effets d'ambiance est la représentation formelle de l'ambiance architecturale. L'effet d'ambiance est lié à une cause circonstancielle qui décrit la relation entre la source d'un phénomène physique et l'interprétation de l'observateur. Cet effet d'ambiance est un outil conceptuel qui permet l'analyse des ambiances architecturales et urbaines. Il permet de qualifier le lien entre la perception et le milieu, suivant les attitudes neurophysiologiques, la culture, l'état d'esprit de l'observateur.

Effets lumineux Un effet lumineux est la relation entre un espace éclairé et la perception visuelle de l'observateur. Les effets lumineux peuvent être présentés selon l'élément qui en est la source. Les effets solaires sont sans conteste les plus évidents et les plus marqués. Tahrani [Tahrani, 2006] propose une classification de ces effets selon qu'ils sont liés à la forme délimitée par la lumière, à la psychologie de l'observateur, au déplacement de l'observateur ou aux

mouvements de la lumière. Le travail des détails, par exemple sur les cannelures des colonnes grecques, permet de traduire le mouvement du soleil en effets de rythmes lumineux par le jeu des rayons rasants. Les effets lumineux dûs aux autres sources de lumière naturelle (le ciel et l'environnement urbain), sont peut-être plus difficiles à déceler car ils baignent notre quotidien de leurs subtiles nuances. Quant aux effets lumineux dus aux sources artificielles, ils sont les plus spectaculaires, et sont utilisés principalement la nuit pour perpétuer l'animation lumineuse de la scène urbaine [Chelkoff et Thibaud, 1992].

Rôle de l'ambiance lumineuse

La lumière comprend un grand nombre d'informations, qui donne du sens et de la mesure à l'espace architectural. L'ambiance lumineuse est donc un révélateur de l'architecture, au sens matériel et symbolique [Millet, 1996]. On distingue les notions de lumière par le latin *lux*, la lumière spirituelle qui s'approche de l'illumination, de la clairvoyance ou de l'émotion, et *lumen* la lumière physique qui est parfaitement rationnelle [Fontoynt, 1998].

Mise en forme La lumière procède à une réelle mise en forme de l'espace par la révélation des structures et des matières. Millet [Millet, 1996] évoque même l'idée d'un volume de lumière qui vient construire l'espace. C'est la cohérence entre la morphologie du bâtiment et la lumière qui détermine les propriétés structurantes de la lumière. L'église de Ronchamp est un contre-exemple de cohérence entre la structure et la lumière. La lumière filtrée par les vitraux n'est volontairement pas en accord avec la structure lourde et massive, pour créer une impression de contraste et donc de légèreté (fig. 1.7). La lumière peut aussi dématérialiser la structure comme dans l'église Myyrmaki de Juha Leiviska (fig. 1.7), où le jeu d'ombres et de lumière fait en quelque sorte « disparaître » la structure.

Symbolique Les temples égyptiens et grecs seraient les premières constructions où le rôle de l'éclairage n'est plus seulement fonctionnel. La lumière est utilisée pour la création d'une atmosphère propice à l'adoration des dieux. Cette mise en lumière ajoute une dimension esthétique, voire divine, à l'aspect fonctionnel de l'éclairage. La dimension esthétique est supportée par des effets d'ambiance, qui sont des composantes perceptibles de l'expression architecturale. Si ces effets sont faciles à mettre en place avec un éclairage artificiel, ils sont beaucoup plus difficiles à réaliser avec la lumière naturelle. C'est le résultat d'une grande cohérence entre les éléments architecturaux : forme, matière, orientation. Le couvent de la Tourette par Le Corbusier (fig. 1.8) est un exemple de mise en œuvre de cet effet.



FIG. 1.7 – (*gauche*) Chapelle Notre-Dame du Haut (1950) par Le Corbusier à Ronchamp, France. (*droite*) Église Myyrmäki (1980) par Juha Leiviska à Vantaa, Finlande.



FIG. 1.8 – Couvent de la Tourette (1958) par Le Corbusier à Évieux, France.

1.2 Conception architecturale

L'architecture se distingue de l'art de bâtir, c'est l'art de concevoir l'espace construit et l'organisation du lieu en vue de son occupation [Norberg-Schulz, 1997]. L'architecte romain Vitruve nous offre l'une des plus anciennes traces écrites relatives à l'architecture dans son traité « De Architectura » [Vitruve, 1995]. Son idée maîtresse est d'allier la pratique et l'objet (la chose représentée), avec la théorie et l'image (la chose qui représente). Il suggère la compréhension des lois de la nature par la philosophie². Pour Vitruve l'homme est la mesure de l'architecte : l'architecture a pour but l'organisation des lieux pour le bien-être des hommes. Il élabore l'éclairage naturel des bâtiments au moyen de l'optique géométrique et des conditions d'ensoleillement. Ces idées sont poursuivies par de nombreux courants d'architecture : l'hygiénisme, le modernisme, le bioclimatique ou la haute qualité environnementale.

1.2.1 Le projet architectural

Le projet architectural est un processus complexe faisant appel à des professionnels différents, selon le stade d'avancement du projet. L'objectif de ce processus est la concrétisation d'un projet en passant par les étapes de programmation, de conception, de réalisation et d'usage. L'étape de conception est la traduction du programme architectural en une représentation d'un bâtiment compréhensible par les acteurs de la réalisation : les constructeurs. Cette étape est assumée par la maîtrise d'œuvre dans laquelle les architectes, responsables de la conception et du choix du parti architectural, travaillent en concertation avec les ingénieurs qui apportent leur savoir-faire dans leurs disciplines respectives.

² *fusiologie* gr. : la nature des choses

Processus de création

La conception architecturale peut être perçue comme un processus de création intégré dans le projet architectural. La solution dépendra essentiellement du point de vue de l'architecte sur le problème : le parti architectural (diagnostic architectural d'après Lebahar [Lebahar, 1983]). C'est à la fois l'expression d'une intention architecturale et la synthèse de nombreux paramètres.

Intention À partir de la définition d'un programme, l'architecte choisit un parti architectural qui est la base du projet. Le parti architectural est l'interprétation du programme par le concepteur et donne une ligne directrice qui aide à faire des choix par rapport aux contraintes. Une intention est l'expression de ce parti architectural. C'est un objectif que se fixe l'architecte, et qui lui sert de repère tout au long du processus de conception. Il est bien entendu que les intentions sont des objets dynamiques qui évoluent avec les possibilités et les contraintes du projet architectural.

L'objectif du processus de conception est d'explorer le potentiel d'un espace à partir des intentions du concepteur. Selon les préférences du concepteur, une intention peut être représentée par une forme géométrique ou une répartition lumineuse dans une projection plane (plan, coupe, axonométrie, façade) ou une projection en perspective (point de vue).

Synthèse de paramètres L'action de concevoir nécessite la synthèse d'un grand nombre de paramètres ainsi que la prise de conscience de la globalité du projet et de l'impact général de chaque prise de décision. Cette activité considère aussi bien un cahier des charges et des contraintes physiques ou économiques, que des notions subtiles et subjectives liées à l'expression d'une intention et à la perception du bâtiment. Un projet architectural est soumis à de nombreuses contraintes

que l'on ne peut nier, et leur prise en compte induit la qualité du projet. Leur considération doit être une préoccupation fondamentale, il faut apprendre à les trier, les classer et les hiérarchiser. Les contraintes physiques sont à différencier des contraintes architecturales.

Succession de choix La conception architecturale peut être vue comme une succession de choix qui traduit le parti architectural. Un choix est le résultat d'une recherche en rapport à une référence ou un raisonnement graphique ou théorique. Cette recherche prend en compte l'état actuel du projet et anticipe son état futur. Chaque élément choisi apporte une précision supplémentaire sur le projet ainsi qu'une contrainte supplémentaire pour les décisions à venir. Ces décisions ne sont pas immuables, elles peuvent être remises en question par des décisions ultérieures, et donc remettre en question des décisions antérieures pour conserver l'équilibre du projet.

Lors de l'évolution du projet, il y a une discussion entre l'architecte et les ingénieurs, sous la forme d'aller-retour. L'architecte initie le cycle en proposant une solution qui est évaluée par les ingénieurs, ceux-ci renvoient le résultat de cette évaluation assortie de conseils de conception. L'architecte prend en compte l'évaluation et les conseils pour trouver une autre solution. Par exemple, dans la réflexion sur le plan masse, la discussion porte sur la distance et la hauteur des bâtiments environnants. De manière sous-jacente, les interlocuteurs ont en tête les effets de masque et d'impact de leur décision, mais ces effets ne sont pas discutés de manière explicite, les acteurs supposent donc que leur vision respective des effets est la même.

L'itération de ce cycle de conception est nécessaire à l'avancement du projet car il permet un rééquilibrage de toutes les contraintes à chaque nouvelle solution. Les observations du bureau d'étude sur une solution particulière permettent à

l'architecte de faire la synthèse des paramètres en tenant compte de contraintes supplémentaires. Les paramètres qui sont explicites, comme le facteur de lumière du jour, facilitent la réalisation de cette synthèse.

Relation intérieur/extérieur La définition de la relation intérieur/extérieur intervient à tous les stades de la conception. D'après Christian Norberg-Schulz [Norberg-Schulz, 1997], le mur est un filtre connecteur caractérisé par ses ouvertures qui matérialisent et véhiculent les intentions. L'objet architectural, en tant que limite entre l'intérieur et l'extérieur, pose un problème de confrontation entre les espaces créés et, simultanément, devient la matérialisation spatiale de la résolution de cette confrontation. On retrouve la dualité de l'objet architectural dans le processus de conception architecturale, qui résout le problème de conception en même temps qu'il le pose.

1.2.2 Outils de la conception architecturale

Les outils de la conception architecturale sont des vecteurs d'expression des intentions du concepteur, que ces intentions soient relatives ou non à l'ambiance lumineuse. Un outil de conception est adapté à une méthode de conception, suivant la forme que l'on souhaite donner aux intentions.

Nous sommes en particulier intéressés par les outils de conception qui intègrent l'ambiance lumineuse ou l'éclairage. La représentation de l'ambiance lumineuse a débuté avec des moyens artistiques, et a donné lieu à la création de techniques de représentation, voire même à des styles picturaux. Cette volonté de représentation de l'ambiance lumineuse se retrouve dans les outils numériques d'aide à la conception qui intègrent la simulation de l'éclairage.

Reproduction artistique de l'ambiance lumineuse

La reproduction de l'ambiance lumineuse demande une grande sensibilité artistique. L'ambiance lumineuse peut être considérée comme un des moyens d'expression de l'art. La peinture, comme le cinéma, se doit de maîtriser la lumière pour exprimer sa position [Fontoynt, 1998].

Dessin/Peinture Le dessin est facilité par l'observation du comportement de la lumière. Pendant cette observation, la lumière révèle la forme, les matériaux en même temps que l'intention du concepteur, la symbolique et la manière de construire le bâtiment. Cette observation permet de décrire la relation lumière/bâtiment.

Le Caravage a mis au point la technique picturale du clair-obscur, qui permet de mettre en lumière les personnages d'une œuvre grâce à un fort contraste entre les zones sombres et claires (fig. 1.9). Ce contraste évoque une lumière fortement orientée dans une direction, qui « choisit » les personnages à éclairer. Cette technique, reprise par des peintres postérieurs (La Tour, Rembrandt, Vélasquez, etc.), est encore largement utilisée de nos jours.

Les maîtres flamands, aussi inspirés par Le Caravage, ont essayé de résoudre la question de la représentation de la lumière dans les intérieurs. À travers leurs œuvres, nous constatons que l'ambiance lumineuse des intérieurs hollandais est créée par un jeu d'ombres et de lumière. Tous ces artistes expriment bien le rôle de l'ombre évoqué par J. Tanizaki [Tanizaki, 1993] : « *Le beau n'est pas une substance en soi mais rien qu'un dessin d'ombres, qu'un jeu de clair-obscur... le beau perd son existence si l'on supprime les effets d'ombre.* »

Les impressionnistes quant à eux essayaient de saisir un instant : impression globale perçue à un certain moment qui est totale et éphémère. Cette instantanéité est due au mouvement du soleil, aux changements des couleurs et de



FIG. 1.9 – Martyr de Saint Mathieu (1599 - 1600) par Le Caravage, Huile sur toile, 323 x 343 cm - Chapelle Contarelli, San Luigi dei Francesi, Rome (*Wikipedia*).

l'environnement. Monet par ses séries de paysages a fait un portrait de la lumière. Cela nous permet de prendre conscience que nous évoluons et que nous grandissons dans un environnement en constante évolution. Ce changement est reflété par la lumière, liaison naturelle au rythme céleste [Millet, 1996].

Photographie/Cinéma Le mot « photographie » se compose de deux racines grecques : le préfixe « photo- » (*gr. photos* lumière), et le suffixe «-graphie» (*gr. graphein* peindre). On peut donc comprendre le terme photographie comme « peindre avec la lumière ». La photographie est une technique permettant de fixer une image sur une surface sensible à l'aide de la lumière et des objets qui la reflètent. Deux phénomènes sont nécessaires à l'obtention d'images photographiques : la formation de l'image et la fixation de cette dernière sur un support. Le principe de la formation de l'image avec une chambre noire (*camera*

obscura) est connu depuis Aristote. La fixation de l'image peut se faire par un procédé chimique, élaboré entre la fin du XVIII^es. et le début du XIX^es., ou des capteurs numériques, introduits à la fin du XX^es.

L'acte photographique part d'un sujet dont on enregistre une image grâce à l'action de la lumière sur une surface sensible. L'image photographique finale est destinée à être vue par un ou plusieurs spectateurs. La photographie, si l'on met de côté la manipulation d'image, montre quelque chose qui a nécessairement existé. Contrairement à la peinture, où l'homme représente le réel tel qu'il le voit, la photographie est une représentation objective. C'est pourquoi les impressionnistes, qui s'intéressent à la lumière, se sont aussi intéressés à la photographie.

Dans le cinéma, la lumière devient un moyen d'exprimer ou de renforcer un sentiment par les jeux d'ombres sur le décor ou les acteurs. Une scène peut être tournée à un certain moment de la journée à un certain endroit pour obtenir l'effet désiré, par la couleur du soleil, l'atmosphère, l'inclinaison des rayons. Plus généralement, les conditions d'éclairage sont récréées en studio pour éviter d'être dépendant de la lumière naturelle. Henry Alekan est un cinéaste célèbre pour son travail sur la lumière et l'ombre. Le rapport intime qui existe entre ces deux éléments est à deux niveaux : le corporel (*lumen*) et spirituel (*lux*). Il arrive à faire passer une émotion par un jeu de lumière pour soutenir ou contraster la scène.

Outils graphiques de conception

Le croquis, le dessin ou le schéma sont des outils graphiques de conception utilisés depuis le 15^e siècle au sein des Arts (Léonard de Vinci, Raphaël), et a fortiori en architecture. Le concepteur peut, selon ses préférences, représenter ses intentions sous la forme d'une axonométrie, d'une perspective ou d'une ambiance lumineuse. Ces outils permettent de poser sur un support ce que l'on voit ou

imagine. Ils permettent donc l'expression du parti architectural au travers des intentions.

Utilisation de l'outil La conception est composée par la représentation du problème qui décrit les différents éléments, leurs incompatibilités et leur importance. Elle contient aussi une base graphique de simulation qui est une organisation préliminaire de ces éléments. Cette base graphique est la spatialisation de la représentation du problème et le point de départ de la recherche graphique. Elle est constituée de schémas, d'organigrammes, de plans, de perspectives et de détails qui sont des aides à l'exploration de l'espace. Les différents types de dessin vont venir cerner le problème, sans le fixer, afin de le laisser évoluer dans l'imaginaire de l'architecte [Lebahar, 1983].

La représentation est une projection de l'idée architecturale : « *La représentation architecturale est donc une mise en forme des idées plutôt que l'illustration de la forme bâtie* » [Latek, 2000]. Cette représentation a une influence sur la conception de l'espace : « *Il est alors important, pour tout travail théorique en architecture, de retenir que le dessin n'est pas une image simple et neutre du bâtiment* » [Latek, 2000].

Le dessin permet la transposition dans un environnement maîtrisable et donc d'asservir la matière à la volonté du concepteur. Il peut faire toutes les modifications possibles « pour voir » avec un effort minime. C'est une manipulation d'entités avec un retour direct qui est l'image de notre réflexion.

Simulation graphique [Lebahar, 1983] Cette réflexion par le dessin peut être vue comme une simulation graphique. À partir d'une base graphique, nous assistons à une réduction des incertitudes suivant l'ordre des contraintes. Le système du calque sert à la fois de guide, de correcteur et d'exploration avec une

intégration des solutions précédentes. L'utilisation du calque permet l'ajout, la suppression et la comparaison des solutions et l'exploration en largeur.

« *L'anticipation des résultats précède celle des processus qui les obtiennent.* »
« *L'image réelle résume l'objet réel ou virtuel.* » [Lebahar, 1983] Connaître l'objet, c'est agir sur lui pour le transformer et découvrir ses propriétés à travers ses transformations. « *Le dessin une fois tracé ne dit pas lui-même pourquoi il a été conçu.* » [Lebahar, 1983]. Une fois celui-ci fixé, il sera momifié, son statut sera défini et ses variations seront impossibles. Cette étape de fixation du problème et de la solution est la recherche de l'objet. Dans le processus décrit par Lebahar, cette recherche se fait par simulation graphique, en dessinant puis en confrontant le résultat à notre appréciation.

Outils numériques d'aide à la conception

La conception architecturale qui utilise l'outil numérique devient une conception architecturale assistée par ordinateur (CAAO). L'apport des outils numériques d'aide à la conception est d'opérer un traitement sur les éléments de l'esquisse. Ces traitements se déroulent aussi bien au niveau de la conception que de l'évaluation du bâtiment. L'ordinateur est considéré comme un outil de conception, qui doit être intégré avec les méthodes traditionnelles au processus de conception [Stannord, 1998]. Les paradigmes des outils graphiques traditionnels sont repris (représentations, calques, couleurs). Néanmoins le rapport à l'outil change, car le concepteur n'est plus le producteur de l'énergie nécessaire à la manipulation de l'outil. Il existe un intermédiaire supplémentaire qu'il est indispensable de s'approprier.

Les outils numériques, comme les autres, sont spécifiquement dédiés à l'aide de certaines méthodes de conception. La question de l'aide à la conception géométrique des volumes est traitée par [Guéna et Untersteller, 2006]. Dans

[Halin *et al.*, 2003], les auteurs proposent un outil d'aide à la conception collaborative. Pour notre part, nous étudions plus particulièrement les outils qui permettent d'intégrer l'éclairage naturel dans la conception architecturale, à travers la simulation de la lumière.

Simulation de phénomènes physiques La notion de simulation fait partie intégrante de la conception architecturale depuis sa création [Lebahar, 1983]. Il est donc naturel et même indispensable de l'intégrer dans la CAAO pour poursuivre cette logique de simulation. Cette intégration demande l'interprétation des intentions géométriques du concepteur sous la forme d'une maquette numérique. C'est à partir de cette maquette que l'on effectue les simulations de phénomènes physiques. De plus, elle ouvre la voie à d'autres utilisations comme la communication, la représentation ou l'intégration dans un système d'information géographique. La palette de simulations est très étendue et regroupe l'ensemble des phénomènes physiques (lumineux, acoustique, thermique, aéraulique, etc.).

La simulation peut être utilisée dans le processus global de conception pour un traitement des données après la conception proprement dite [Kolarevic et Malkawi, 2005]. Elle permet une vérification du respect des normes ou des intentions et provoque, si besoin, une réitération de la phase de conception.

Simulation de la lumière La simulation de la lumière dans les outils de CAAO permet d'obtenir une représentation de l'éclairage dans le bâtiment. Cette représentation de l'éclairage permet d'anticiper la distribution lumineuse à partir de la définition d'un volume, et de la comparer à l'intention d'ambiance. Par une itération de simulation, le concepteur peut travailler sur les volumes ou les matériaux, et apprécier leurs impacts sur l'éclairage.

Simulation de l'éclairage naturel La simulation de l'éclairage naturel se fait par la simulation de la position du soleil et de la luminance du ciel, et l'ajout des dimensions temporelle et géographique [Miguet, 2000][Fontoynt, 1998]. Le Logiciel Solene [Miguet, 2000] en est l'exemple type car il contient plusieurs modèles de ciel afin d'effectuer une simulation complète de l'éclairage naturel dans un lieu géographique donné, à une date et une heure précises.

Simulation photoréaliste Pour avoir une vue générale de l'ambiance lumineuse, la simulation de la lumière est associée à un modèle photoréaliste. En architecture, la simulation photoréaliste est destinée à la présentation des projets (concours, concertation publique, etc.). Elle est généralement très valorisante mais parfois peu en rapport avec la réalité de la scène. Les principaux outils comme RADIANCE [Ward, 1994], Genelux, Dial-EUROPE [Dia, 2007] et LightScape sont détaillés dans un état de l'art de Roy [Roy, 2000]. Malgré des lacunes en compatibilité et en interface homme-machine, l'auteur retient RADIANCE qui réunit les meilleures performances techniques et la meilleure qualité de simulation physique.

Simulation photométrique Pour faire une étude de détails précis ou avoir une répartition quantitative exacte, la simulation directe est associée à un modèle photométrique. La simulation photométrique est utilisée pour analyser une scène, et est axée sur l'exactitude du phénomène. L'interprétation des résultats de ces simulations reste difficile. Elle permet une simulation photoréaliste fidèle au prix d'un très long temps de calcul.

Les applications de simulation photométrique sont nettement moins développées que les précédentes car le résultat obtenu n'est pas directement exploitable mais il doit être interprété. En revanche, la précision des modèles photométriques est supérieure aux modèles photoréalistes. Ils peuvent intégrer un spectre de

radiation plus large et donc donner des résultats en thermique et en éclairage (*High Dynamic Range Definition*).

Dans le cas des simulations photométriques, c'est généralement un bureau d'études qui fait la simulation afin d'en faire une interprétation. Nous notons qu'il y a alors un accroissement de la distance entre le concepteur et l'ambiance photométrique. Il existe un fossé entre les outils de conception et les outils de simulation, ce qui rend difficile le cycle essai-correction [Glaser *et al.*, 2003].

1.2.3 Ambiance et conception



FIG. 1.10 – Casa Batllò (1904) par Antoni Gaudí à Barcelone, Espagne.

La prise en compte constante de l’ambiance lumineuse à chaque étape du processus de conception, permet la cohérence de la stratégie d’éclairage, et une véritable osmose entre la lumière et le bâtiment. Chaque élément ajouté est étudié par rapport aux précédents. Le processus d’interaction entre le projet et l’intention d’ambiance est ici fait mentalement par l’architecte lui-même. Cette démarche est illustrée par Antoni Gaudí, comme le rappelle M. Millet à propos de la *Casa Batllò* (fig. 1.10).

« La lumière a apparemment été prise en considération à chaque étape du processus de développement : conception, développement des plans et sections, positionnement et taille des fenêtres, forme et composition de la surface, et des détails. » [Millet, 1996]

N’oublions pas que Gaudí était un génie visionnaire est qu’il est très difficile de recréer cette dynamique. Le problème posé ici à l’architecte est de trouver la configuration matérielle supportant l’ambiance qu’il souhaite exprimer.

Bilan du contexte

Un bilan des éléments du contexte nous permet d'amorcer la problématique de la simulation inverse de l'éclairage naturel dans le projet architectural. La relation entre la lumière naturelle et le bâtiment est analysée à travers l'éclairage et l'ambiance lumineuse. Les sources de lumière naturelle ne se limitent pas au soleil, mais comprennent aussi le ciel et l'environnement. Ces éléments peuvent prendre part à la conception architecturale. Certains architectes savent utiliser la lumière naturelle au cours de la conception pour réaliser leurs intentions d'ambiance lumineuse. Cependant, cette « conception par l'intention d'ambiance lumineuse » reste difficile à mettre en œuvre, et les outils actuels d'aide à la conception ne sont pas adaptés à cette démarche.

Dans le chapitre suivant, nous présentons plus en détail les problèmes liés à la création d'un outil d'aide à la conception qui intègre l'éclairage naturel. Cette présentation est suivie d'une exploration de la bibliographie associée à ce problème.

Chapitre 2

Problématique

Sommaire

2.1 Aide à la conception	43
2.1.1 Nature de l'aide	43
2.1.2 Application à l'ambiance lumineuse	49
2.2 Questionnement	56
2.2.1 Expression de l'intention	56
2.2.2 Traitement de l'intention	60
2.2.3 Présentation des solutions	64
2.3 Objectifs	65
2.3.1 Conception par l'intention	65
2.3.2 Simulation inverse	66

NOUS étudions dans ce chapitre les difficultés posées par la mise en œuvre de la « conception par l'intention d'ambiance lumineuse » assistée par ordinateur. Ces problèmes concernent aussi bien la nature de l'aide à la conception, que le modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel. Les questions émergeant de cette problématique gravitent autour de l'intention d'ambiance lumineuse, de son expression et de son traitement. Ces questions nous permettent de fixer des objectifs à propos des notions que nous souhaitons intégrer dans la CAAO.

2.1 Aide à la conception par l'intention

L'aide numérique à la conception prend place dans le processus de conception architecturale, et en ce qui nous concerne, de conception par l'intention d'ambiance lumineuse. Dans ce cadre, la proposition d'une méthode d'aide à la conception fait face à des problèmes relatifs à l'ambiance lumineuse, au phénomène physique de l'éclairage naturel et à la simulation inverse de l'éclairage.

2.1.1 Nature de l'aide à la conception

La question sur la nature de l'aide à la conception s'articule autour de la conception architecturale, de l'intention d'ambiance et de l'outil d'aide à la conception. L'intégration de l'ambiance au cours de la conception architecturale est présentée à travers la notion d'intention d'ambiance. Puis les modalités de l'intervention d'une aide à la conception sont explorées dans le cadre de la conception par l'intention d'ambiance.

L'ambiance dans la conception

La place de l'ambiance architecturale et urbaine dans le processus de conception est le point de départ de la problématique. Cette ambiance est exprimée à travers une intention d'ambiance qui traduit la volonté du concepteur. Cette intention d'ambiance est utilisée comme ligne directrice pendant la conception, et permet de conserver la logique du parti architectural.

Intention d'ambiance Une intention d'ambiance est l'idée d'une ambiance qu'un architecte souhaite créer dans le projet architectural. Il imagine non pas l'objet architectural mais la perception que les usagers, *a fortiori* lui-même, pourront avoir de l'objet architectural. Selon Faucher [Faucher et Nivet, 1998], l'intention architecturale est le désir exprimé de matérialisation d'une sensation. Les intentions d'ambiance sont donc en relation avec la perception propre du concepteur. Cette perception étant liée intimement à l'expérience, les intentions sont inspirées du vécu. Une intention d'ambiance est donc toujours une référence à une ambiance vécue. Aussi, au même titre qu'il existe des bâtiments de référence, nous pensons imaginer des ambiances de référence.

Un projet architectural est destiné à révéler l'esprit du lieu, nommé « simplicité du quadriparti » par Heidegger [Heidegger, 1980] ou « *genius loci* » par Norberg-Schulz [Norberg-Schulz, 1997]. Une intention d'ambiance est un vecteur de révélation qui essaye d'exprimer cet esprit de manière perceptible. Nous nous approchons d'une conception phénoménologique de la perception [Merleau-Ponty, 1945].

La manipulation, au sens propre, du phénomène perceptif dans le projet architectural est la définition des conditions de « l'être au monde » [Husserl, 2000]. En effet, en jouant sur les objets perçus, les intentions d'ambiance définissent les modalités de présence des objets pour la perception de l'utilisateur. C'est en

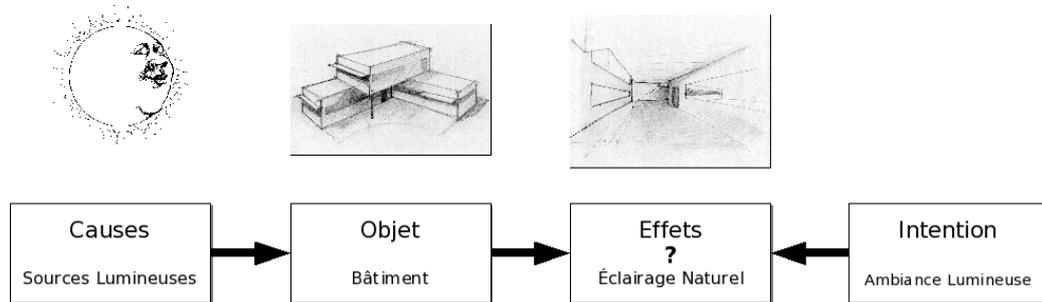


FIG. 2.1 – La conception par l'intention d'ambiance.

ce sens que les intentions d'ambiance sont l'expression de la relation entre l'environnement et le phénomène perceptif. De la même manière que les intentions de forme sont liées aux phénomènes physiques qui existent dans les structures, les intentions d'ambiance sont liées aux phénomènes physiques qui sont le support de ces ambiances.

Conception par l'intention d'ambiance La conception par l'intention d'ambiance est une méthode de conception architecturale qui utilise l'ambiance comme point de départ. L'avantage de cette méthode est de travailler directement sur l'ambiance du projet qui sera perçue par l'utilisateur, sans être obligé de passer par un intermédiaire. C'est l'élément à la base de l'intention d'ambiance qui est défini et influence les autres éléments du projet architectural (fig. 2.1).

Les phénomènes physiques, qui sont le support de l'ambiance, sont influencés par les propriétés du bâtiment. Le bâtiment est donc un outil de maîtrise des phénomènes physiques, et par là même, de modelage de l'ambiance. Le problème est de trouver la configuration matérielle supportant l'ambiance que l'on souhaite exprimer, sachant que cette configuration est aussi le support d'une expression architecturale. Cette configuration matérielle est composée d'éléments variables : le plan masse (orientation, position géographique), les volumes et les matériaux ; mais aussi d'invariants : le climat, l'environnement naturel et urbain.

Par exemple, le monastère de Sainte Marie de la Tourette montre la dualité des orthodoxes d'être à la fois coupés du monde au travers de la méditation, et dans le monde par une activité humaine. On retrouve cette dualité dans le bâtiment, à la fois église et résidence, qui marque les moments de vie individuels et collectifs. Elle s'exprime en partie par le traitement de la lumière dans les espaces individuels (chambres) et collectifs (cloître) qui a guidé le processus de conception du monastère [Millet, 1996].

Aide à la conception architecturale

L'aide à la conception par l'intention d'ambiance demande d'allier la subjectivité de l'ambiance perçue à une formalisation de l'intention d'ambiance, nécessaire pour une méthode numérique. L'irruption de la technique dans ce processus, pour le moins subtil, risque d'en pervertir l'essence, si elle n'en respecte pas les principes fondamentaux, et en particulier la conservation de l'intention.

Question de la technique La conception par l'intention d'ambiance peut être abordée de deux manières différentes¹. Selon une conception anthropologique, c'est une activité qui demande au concepteur de montrer ses intentions d'ambiance pour révéler son projet architectural. Suivant une conception instrumentale, c'est un ensemble de moyens utilisant les ambiances et permettant d'aboutir à la définition d'un projet architectural. Quel que soit le point de vue adopté, cette méthode met au jour le projet architectural à partir des intentions d'ambiance.

¹ La question de la technique dans les « Essais et conférences » de M. Heidegger [Heidegger, 1980]

Outil de conception L'utilisation de plusieurs outils peut donner plusieurs points de vue du même phénomène. Cette richesse de points de vue est déterminante pour comprendre tous les aspects du phénomène étudié [Stannord, 1998]. Les propriétés des outils sont comme des filtres simplificateurs du phénomène observé. Ce filtrage permet d'apprendre petit à petit les caractéristiques plus globales qui ne sont pas représentées par les outils, mais qui sont présentes dans le phénomène lui-même.

Si on accepte l'idée que le concepteur utilise au cours du processus de conception, non pas un outil, mais le bon outil au bon moment, alors tous les outils sont utilisés ponctuellement. Le bon outil pour la conception par l'intention d'ambiance doit permettre avant tout de travailler avec l'intention d'ambiance, à savoir l'expression des intentions d'ambiance, puis un traitement numérique associé à ces intentions.

Nature de l'aide à la conception Comment déterminer la nature de l'aide à la conception par l'intention d'ambiance ? Le terme aider (lat. *Adjudare*) signifie fournir une assistance dans l'idée d'ajouter une force ou de seconder. Si nous nous intéressons maintenant au terme assister (lat. *Assistere*), il signifie : se tenir auprès, porter aide ; et dans le domaine informatique : amplifier, répartir, traiter les informations.

Chaque nouvel outil entraîne une nouvelle façon de concevoir [Madrazo, 1998]. Si l'on veut suivre l'idée de la conception par l'intention d'ambiance, nous devons produire un outil capable de respecter ce type de conception. Comme nous l'avons dit précédemment, la conception par l'intention d'ambiance est liée au vécu. Un outil de ce type s'adressera aux concepteurs qui utilisent déjà l'ambiance dans la conception.

Lors de la conception architecturale, il est fréquent de prendre des chemins

sinueux sans savoir où l'on va pour réaliser son projet, contrairement à une conception raisonnable et efficace dans laquelle tout est optimisé [Gardner, 1998].

Traduction d'une intention d'ambiance Le processus de conception par l'intention d'ambiance peut s'apparenter à une traduction des intentions d'ambiance dans le projet architectural. L'ensemble des opérations est donc une traduction d'intentions d'ambiance en une configuration matérielle (volumes et matières) dans un cadre donné (environnement), et ce, quels que soit le type et la forme des intentions. Le problème est la liaison entre l'ambiance et les paramètres physiques de la configuration matérielle. La recherche de cette relation est généralement soutenue par des simulations, qu'elles soient graphiques ou numériques, qui valident une configuration élaborée à l'aide de l'intuition et de l'expérience.

Aide à la conception par le dessin Le système du calque sert à la fois de guide, de correcteur et d'exploration avec une intégration des solutions précédentes [Lebahar, 1983]. C'est un résumé, un rappel schématique qui permet de se remettre en tête une idée. On peut aussi voir le dessin comme une aide à l'indexation mentale, un jalonnement du parcours imaginé, une balise, une indication de la progression du processus de conception qui permet de reprendre le cheminement, de l'observer avec du recul ou de le mettre en perspective avec l'objectif de départ. Ce principe de calque est exploité dans un outil numérique par Huot [Huot *et al.*, 2004].

Ce jalonnement de l'imagination nécessite une bonne organisation, matérielle et mentale, et un moyen d'expression compréhensible. L'imagination permet tous les modes de navigation : le cheminement peut se transformer en réseau, et inversement. À mesure que les idées exprimées deviennent de plus en plus complexes par l'intégration de nouveaux paramètres, il est indispensable que

l'expression de ces idées reste compréhensible, si l'on veut créer des jalons cohérents.

Par rapport au problème de l'aide à la conception, la conception par l'intention d'ambiance pose la question de la représentation de l'ambiance dans le projet, et plus particulièrement de l'intention d'ambiance. L'utilisation d'un outil graphique de conception pour exprimer une intention d'ambiance résulte en une matérialisation concrète de cette intention (dessin, croquis, aquarelle, etc.) qui est généralement associée à une géométrie. On remarque qu'il y a une expression simultanée de l'ambiance et de la forme, bien qu'au départ l'intention ne soit liée qu'à l'ambiance. Un exemple d'application à la peinture/sculpture est le logiciel « Deep Paint 3D » [Dee, 2007] : un volume est déduit d'une image par un jeu de reflets et de couleurs. Cette image crée la forme par des règles empiriques dues aux réflexions diffuses et spéculaires.

2.1.2 Application à l'ambiance lumineuse

L'application d'une démarche d'aide à la conception par l'intention d'ambiance ne peut se faire que sur une partie de l'ambiance. Nous devons donc nous focaliser sur une ambiance sensorielle particulière qui regroupe un ensemble de perceptions, de sensations et leurs phénomènes physiques associés.

Nous choisissons l'ambiance lumineuse pour diverses raisons. Nous avons souligné l'importance de la vision chez l'être humain dans le contexte. Lorsque l'on perçoit une ambiance visuelle, il y a une perception simultanée de la forme et de la lumière qui se révèlent mutuellement. Les problèmes liés à la représentation et la distinction de ces deux éléments dans les outils de conception graphique sont une forte motivation pour travailler sur les ambiances lumineuses. Par ailleurs, des raisons circonstancielles nous engagent à poursuivre les travaux initiés dans

le laboratoire, qui accueille cette recherche, sur les ambiances relatives à la perception visuelle (ensoleillement et visibilité).

La lumière est un élément primordial dans notre perception du monde, du bâtiment, de l'espace [Stannord, 1998]. Plus précisément, nous nous attachons aux ambiances lumineuses dues à l'éclairage naturel. Ces ambiances sont une connexion permanente à l'environnement. Elles ont des implications lumineuses, thermiques et esthétiques, et couvrent une grande variété de conditions climatiques, entre autres les ciels couverts.

Ambiance lumineuse et éclairage naturel dans la conception

La place de l'ambiance lumineuse dans la conception architecturale dépend de la sensibilité du concepteur à la lumière, et de sa propre relation avec le milieu. C'est de cette notion subjective que vont surgir les problèmes liés à l'intégration des intentions d'ambiance lumineuse dans un outil de conception.

Perception de l'ambiance lumineuse La lumière n'est pas perçue directement, mais par le biais des objets qui la réfléchissent. Un objet éclairé est remarqué plutôt que l'origine de son éclairement. Contrairement à la perception sonore pour laquelle l'origine et le timbre des sons sont perçus, plutôt que leurs réflexions sur les objets de l'environnement.

La lumière est généralement appréhendée comme une présence et l'ombre comme une absence, bien que J. Tanizaki nous rappelle que c'est le jeu entre l'ombre et la lumière qui génère l'ambiance lumineuse [Tanizaki, 1993]. Ces jeux d'ombres et de lumière sont perçus comme une entité indivisible. Les nuances de lumières et d'ombres sont comparables aux mélanges des couleurs, en ce sens que le noir ou le blanc sont les deux extrémités d'une échelle de nuances infinies, le noir est l'obscurité, et le blanc la lumière extérieure.

Description de l'ambiance lumineuse Il est difficile de caractériser l'ambiance lumineuse par ses effets, car nous ne pouvons la percevoir que de manière globale. La description d'une ambiance lumineuse par ses effets est donc une description rationnelle faite en observant le résultat des effets lumineux sur notre perception. S'il est possible d'analyser notre perception d'une ambiance lumineuse pour en dégager les effets qui la composent, est-il possible de concevoir une ambiance lumineuse en faisant une association d'effets lumineux ? Comment pouvons-nous imaginer l'ambiance lumineuse résultant d'une telle opération ?

Si l'on prend le parti de faire une description graphique de l'ambiance lumineuse, les questions précédentes sont toujours présentes. La conception peut se faire en décrivant une ambiance lumineuse puis en essayant de retrouver les effets qui la composent, ou en décrivant des effets lumineux pour construire une ambiance.

Relations aux autres éléments L'ambiance lumineuse est un des éléments qui lie l'utilisateur à l'environnement extérieur, à l'aspect diffus de la lumière du ciel et à l'aspect temporel de la lumière. Cette ambiance lumineuse dépend du bâtiment lui-même (volumes, ouvertures, structures et matériaux) et de la transparence de sa façade, mais aussi de sa localisation géographique et du climat. Nous ne négligeons pas le fait qu'au cours de la conception beaucoup d'autres phénomènes liés aux ambiances lumineuses sont à prendre en compte, en particulier la thermique et la consommation énergétique du bâtiment. Un outil d'aide à la conception dédié à l'ambiance lumineuse doit être compatible avec les autres outils utilisés lors de la conception.

Maîtrise de l'éclairage naturel par le bâtiment

L'éclairage est influencé par notre action sur les paramètres du bâtiment. Ces paramètres peuvent être, suivant leur importance dans le processus de conception, la forme, les ouvertures ou les matières. Les ouvertures du bâtiment sont alors déterminées avant l'ambiance lumineuse pour des raisons esthétiques, thermiques ou fonctionnelles.

Le contrôle de l'éclairage naturel dans le projet architectural est fait, par ordre de traitement, par :

- Les masques lointains, le plan masse,
- Les dimensions (surtout la hauteur) du vitrage, et donc la surface vitrée,
- Les dispositifs de protection ou autres,
- La profondeur qui a un impact au niveau de la géométrie de la pièce pour garder les surfaces invariantes (contraintes du programme),
- Les matériaux.

Ces éléments sont considérés dans le cas où le local donne directement sur l'extérieur. Ils sont variables (paramètres) ou invariants (contraintes) suivant les situations. Par exemple, les masques lointains sont des paramètres dans le cas où une pièce donne sur un atrium, qui est aussi défini par le concepteur.

Inconvénients de la simulation de l'éclairage naturel Certains outils numériques d'aide à l'esquisse peuvent faire une simulation d'éclairage [Cohen et Wallace, 1993, Weinstock et Stathopoulos, 2006]. Cette simulation permet d'anticiper la distribution lumineuse à partir de la définition d'un volume et de la comparer à une éventuelle intention d'ambiance lumineuse. Par une itération de simulation, le concepteur peut travailler sur les volumes ou les matériaux, et apprécier leur impact sur l'éclairage. Les résultats des simulations mettent en évidence la relation entre l'ambiance et la configuration matérielle. On

peut alors déceler les différences entre les intentions d'ambiance et l'ambiance effectivement produite par la configuration matérielle en cours de conception, et proposer une nouvelle configuration. C'est le principe d'une méthode classique de conception empirique basée sur la notion d'essai-erreur. L'inconvénient est que les simulations restent des intermédiaires entre le concepteur et l'ambiance lumineuse.

Pour améliorer ce cycle, il apparaît qu'il faudrait donner des informations permettant de définir des paramètres explicites pour caractériser d'autres éléments que ceux relatifs au facteur de lumière du jour, et si possible, avec une dimension qualitative. Par exemple, l'influence de l'éclairage naturel dans le bâtiment pourrait être exprimée par la transparence des façades.

Maîtrise du bâtiment par l'éclairage naturel

La maîtrise de l'ambiance lumineuse tout au long du processus de création architecturale est un des moyens permettant la conception par l'intention d'ambiance. Cette maîtrise demande au concepteur d'avoir conscience de la relation entre la configuration matérielle qu'il met en place et l'ambiance lumineuse qu'elle génère. Ceci demande une étude pratique de la relation environnement - ambiance lumineuse par la représentation et la manipulation de la lumière dans le projet architectural. Cette étude permet la compréhension du phénomène physique d'éclairage et du phénomène psychologique de perception.

Il est difficile de concevoir une ambiance lumineuse dans l'absolu car elle est liée à la conception de la forme géométrique et au choix des matériaux. Une intention d'ambiance lumineuse est générée par l'expérience du concepteur et basée sur une configuration géométrique. L'expression de cette intention d'ambiance permettra la conception par l'intention d'ambiance lumineuse.

Certains outils intègrent actuellement les intentions d'ambiance pour en

accompagner la conception. Cette intégration demande un traitement informatique des intentions afin de déduire un ensemble de configurations spatiales. La simulation inverse de phénomènes physiques est un des moyens permettant d'accomplir ce traitement (fig. 2.2). La préoccupation est ici de rechercher les causes d'un phénomène à partir de ses effets. La simulation inverse de l'éclairage propose d'agir directement sur l'ambiance lumineuse à partir de la description des intentions d'ambiance. Cette recherche est basée sur l'utilisation de la simulation inverse en architecture :

- 2D : Le Corbusier [Harzallah, 2002], Henri Sauvage,
- 3D : Twarowsky (origine 1962), Knowles,
- Ensoleillement : Siret [Siret, 1997],
- Visibilité : Nivet [Nivet, 1999],
- Application : Houpert [Houpert, 2003].

Cette méthode de simulation inverse n'est possible que si l'on caractérise sans ambiguïtés l'éclairage que l'on cherche. Cette caractérisation doit être simple et explicite et peut se faire par des indicateurs spécifiques. Nous rejoignons l'idée d'une base d'expression commune de l'ambiance lumineuse pour les acteurs du projet. D'autre part cette méthode n'est utile que si l'on peut exprimer les résultats de manière claire.

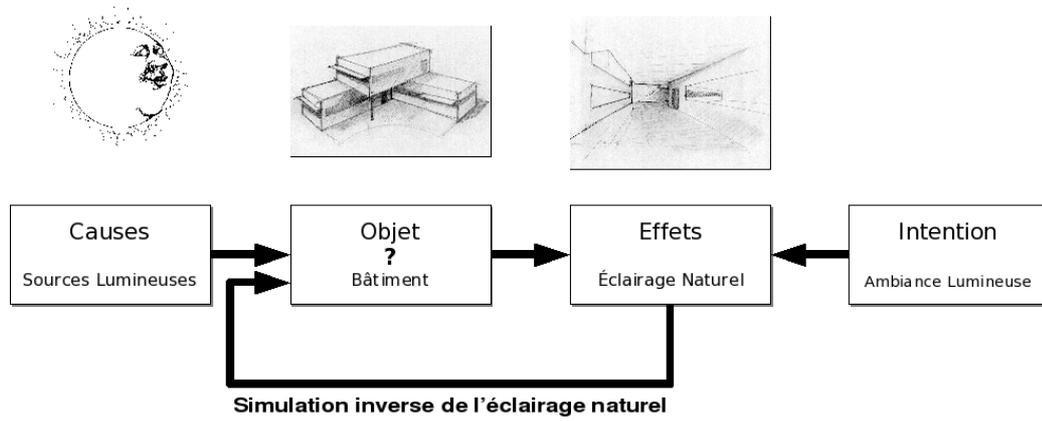


FIG. 2.2 – La simulation inverse de l'éclairage naturel dans la conception architecturale.

2.2 Questionnement

Nous étudions plus précisément les questions posées par la mise en place d'une aide numérique à la conception par l'intention. Autrement dit, comment est-il possible d'intégrer la notion d'ambiance lumineuse au cœur de l'outil de conception ?

La problématique peut se diviser en trois problèmes qui suivent les étapes du calcul numérique : la structuration des paramètres d'entrée, la simulation inverse et l'analyse des résultats. Les problèmes posés par chacune de ces étapes dans la conception par l'intention d'ambiance lumineuse sont expliqués, ainsi que le rôle éventuel d'un outil d'aide à la conception.

2.2.1 Expression de l'intention d'ambiance lumineuse

Le problème, à cette étape, est de permettre l'expression et la représentation graphique de l'intention d'ambiance lumineuse. Nous considérons que les intentions d'ambiance lumineuse sont conçues au préalable, et qu'elles sont connues. Nous précisons que nous ne traitons pas la question de la conception *de* l'ambiance lumineuse, mais bien de la conception *par* l'intention d'ambiance lumineuse. La question de l'expression de l'intention d'ambiance lumineuse se décline autour de la sensation, de l'observation et de la description de la lumière.

Sentir et percevoir la lumière

La première interface qui nous lie à l'ambiance lumineuse est le sens visuel. Le système de vision permet l'acquisition d'informations visuelles : la luminance et la couleur, reçues des objets présents dans notre champ de vision qui constituent notre environnement visuel. Notre œil peut être assimilé à un appareil photographique dont les propriétés dépendent de la biologie. Pour aider à mieux

sentir la lumière nous pouvons étendre ces propriétés. L'extension du spectre de la perception visuelle au rayonnement infrarouge permettrait de considérer et de concevoir les ambiances lumineuses et thermiques simultanément. L'extension de la plage de luminance perceptible permettrait de couvrir une plus grande gamme de valeur, comme dans l'imagerie à grande gamme dynamique (*High Dynamic Range Imaging - HDRI*).

Dans la suite du système perceptif, vient le décodage de cette information brute : la perception naturelle (ou discrète selon Merleau-Ponty [Merleau-Ponty, 1945]). Ce décodage inné ou acquis révèle les propriétés de notre environnement (textures, couleurs, transparence, etc.) à travers les phénomènes optiques (émission, réflexion, transmission, etc.). La lumière est une présence d'informations pour le sens de la vue. Mais l'ombre peut aussi apporter son lot d'informations pour notre perception visuelle, justement par cette « présence » d'ombre qui pourrait ne pas avoir lieu. Malgré les connaissances actuelles de la perception visuelle, c'est un phénomène cognitif qui n'est pas encore reproduit par un système numérique. Il est donc difficile d'imaginer une aide numérique à la perception visuelle.

Observer et analyser la lumière

L'observation influence le décodage d'informations au cours de la perception. Les informations données par l'œil seront les mêmes que dans la perception naturelle mais elles seront décodées différemment (*Gestalttheorie*).

L'observation de la lumière dans les espaces construits se porte sur tous les éléments qui constituent le support physique de l'ambiance lumineuse. L'élément le plus évident est la répartition spatiale de la lumière. Mais on peut aussi faire attention aux sources de lumière, aux directions d'éclairement, à l'aspect diffus de la lumière du ciel ou à la dynamique temporelle de la lumière diurne et annuelle.

Hormis un ensemble de quantité comme une valeur de luminance sur une table ou une durée d'éclairement, nous pouvons aussi observer à travers la lumière les qualités d'un éclairage, comme la manière dont la lumière prend la place de l'ombre au début de la journée.

L'observation de l'ambiance lumineuse est la focalisation de l'attention sur notre perception de la lumière. C'est un sujet nettement plus délicat que nous n'aborderons pas et qui demande d'avoir conscience de notre propre perception, ainsi que du raisonnement induit par l'observation qui modifie cette perception.

L'analyse de la lumière est le traitement cognitif qui fait suite à l'observation. C'est l'interprétation des informations décodées pour chercher à comprendre le phénomène observé. La répartition de la lumière dans un espace est caractérisée par les alternances et les nuances entre l'ombre et la lumière, par les motifs de transition. Des ensembles de motifs de transition peuvent caractériser les heures ou les saisons. Les sources de lumière peuvent aussi être déterminées par l'analyse de la lumière. Une lumière nettement plus intense que les autres peut être une tâche solaire. Une lumière au plafond provient sûrement de la réflexion de l'environnement, la source pouvant être une fenêtre ou un mur éclairé indirectement. L'interprétation de la luminance révèle les autres propriétés de la lumière (intensité, couleur, etc.), et par les propriétés de la lumière, nous arrivons enfin à décoder les propriétés des objets (texture, réflectance, transparence, etc.).

L'observation et l'analyse de la lumière sont des étapes importantes et indispensables de la conception par l'intention d'ambiance lumineuse. Néanmoins il est difficile d'apporter directement une aide numérique à un processus cognitif, pour des raisons similaires à celles évoquées lors de l'étude de la perception naturelle.

Décrire et représenter les intentions d'ambiance lumineuse

La luminance et la couleur étant les seules informations disponibles dans notre environnement, la description d'une ambiance lumineuse pourrait être basée uniquement sur ces données (voir les impressionnistes). Sur un rendu sommaire d'un espace donné (volume et orientation), le concepteur dessine des taches lumineuses sur des surfaces, murs ou meubles [Glaser *et al.*, 2003]. C'est une description géométrique des ambiances lumineuses (tache, bulle, surface et volume, contraste, densité, etc.)

L'ambiance lumineuse peut aussi être exprimée par le biais des propriétés de la lumière (intensité, radiosité, longueur d'onde, etc.). Cette démarche demande d'avoir connaissance des phénomènes optiques, connaissance qu'il paraît raisonnable d'acquérir pour la conception architecturale.

Si nous décrivons l'ambiance lumineuse par les propriétés des objets, nous en arrivons à une conception architecturale qui s'intéresse à décrire la matière, la forme et la structure pour exprimer une intention d'ambiance lumineuse. Cette situation demande une connaissance des phénomènes d'interactions lumière-matière, mais aussi des phénomènes perceptifs. Nous sommes ici à un niveau d'expertise qu'il devient difficile d'intégrer dans le projet architectural.

La représentation d'une intention d'ambiance lumineuse est la description graphique de la lumière perçue dans un espace construit. Cette représentation est un outil de travail pour concevoir ou communiquer une intention d'ambiance lumineuse. Elle apporte des informations concernant la relation de l'espace à la lumière et permet de comprendre le parti architectural exprimé. La représentation des intentions peut constituer une aide à l'analyse de l'ambiance lumineuse à travers la description des propriétés lumineuses (répartition spatio-temporelle de la lumière).

Peut-on aider à décrire ou représenter la lumière, et comment ? Nous

considérons l'aide à la représentation de l'intention d'ambiance lumineuse comme la mise à disposition des outils permettant l'expression des intentions d'ambiance lumineuse. C'est donc un problème de visualisation d'informations relatives à la lumière. S'il est difficile de fournir directement une aide à la perception naturelle, le stimulus traité par notre système de perception visuelle peut être modifié pour constituer une aide à la conception. La représentation des ambiances lumineuses sera donc étudiée comme aide à la perception.

Comment représenter les paramètres invisibles de la lumière ? Quel est donc l'affichage adapté à la conception par l'intention d'ambiance ? Nous devons afficher un minimum de données spatiales pour donner assez d'indices au concepteur, mais nous ne pouvons afficher les données que nous ne connaissons pas. Nous nous interrogeons sur le rôle de la donnée spatiale dans la définition des intentions d'ambiance lumineuse, et en particulier, sur les différences entre les divers types de rendus (photoréaliste, photométrique, non-photoréaliste).

2.2.2 Traitement de l'intention d'ambiance lumineuse

Ce problème concerne la formalisation et le traitement de l'intention d'ambiance lumineuse : c'est l'étape de simulation inverse proprement dite. Si cette question contient bien évidemment un aspect technique, elle contient aussi un aspect conceptuel sur la place du modèle dans le processus de conception : sur quel type de lumière doit porter la description de l'éclairage, lumière incidente ou réfléchi ? (fig. 2.3 & 2.4)

Formaliser l'intention d'ambiance

La formalisation de l'intention d'ambiance lumineuse introduit la relation entre l'intention d'ambiance lumineuse et la géométrie. C'est donc une étape à ne pas négliger car elle constitue l'articulation entre l'expression des intentions

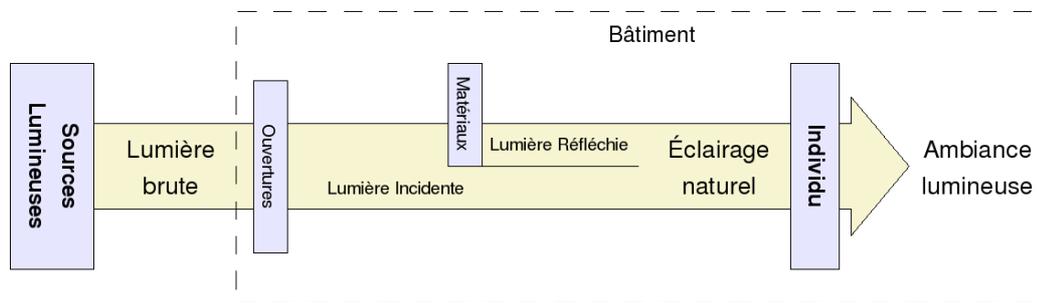


FIG. 2.3 – L'éclairage naturel en architecture.

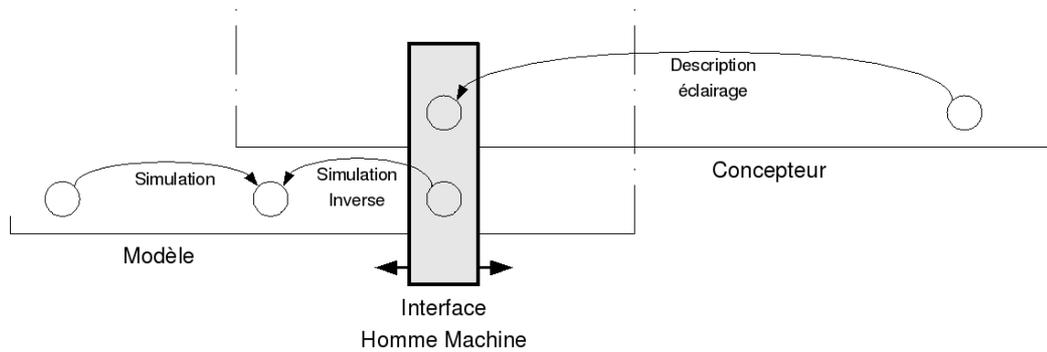


FIG. 2.4 – Position de l'interface homme-machine dans la conception architecturale.

d'ambiance lumineuse et la simulation inverse de l'éclairage naturel. Cette articulation peut être vue comme un problème de traduction de l'intention d'ambiance lumineuse en une représentation formelle de l'intention d'ambiance lumineuse. Autrement dit, c'est un problème de structuration des données appliqué à l'intention d'ambiance lumineuse. En poussant plus avant cette idée, nous pourrions imaginer un langage formel basé sur une sorte de grammaire lumineuse qui permette de modéliser les intentions d'ambiance lumineuse.

Quel que soit le degré de formalisation, le problème est de créer un cadre formel avec une structure non ambiguë, qui puisse contenir et décrire le plus grand panel d'intentions d'ambiance lumineuse possible. Il faut donc tenir compte de toutes les combinaisons de paramètres exprimés dans l'expression

d'intentions. Comment concevoir un cadre acceptant tout type d'intention d'ambiance lumineuse ? Quel est le degré de finesse, la granularité et le niveau d'abstraction requis pour être un lieu d'expression structurée ?

Un outil numérique est un moyen privilégié pour donner un cadre formel de traduction des intentions. L'interface de l'outil, lié à l'interaction homme-machine (IHM), est un lien entre l'utilisateur et le modèle de simulation. Plus précisément, l'outil numérique est un lien entre l'intention et l'éclairage. Comment l'outil peut permettre d'exprimer l'intention d'ambiance lumineuse librement tout en traduisant la moindre nuance dans une structure formelle ?

La modélisation déclarative vise à exprimer les contraintes d'un problème, en laissant une part d'incertitude, dans un formalisme adapté à ce problème (langage naturel, graphique, ...). L'approche de [Jolivet *et al.*, 2002] via le langage naturel ne répond pas à notre problème. Le langage de l'architecte tout en nuance, contient fréquemment des références implicites et explicites qu'une description en langage pseudo-naturel aura du mal à exprimer.

Simuler la lumière et générer une géométrie

L'insertion de la simulation inverse dans le processus de conception permet de compléter les méthodes de simulation pour gérer de manière globale le couplage entre les causes et les effets d'une ambiance lumineuse. Cette évolution des outils de conception explicite la relation entre la configuration matérielle et l'ambiance lumineuse, par le dégagement des qualités de l'ambiance et la quantification de cette relation. Dans cette optique, la simulation de phénomènes physiques constitue une aide à la conception.

Nous arrivons au cœur du problème de la simulation inverse de l'éclairage naturel. C'est une étape où l'on cherche à retrouver les causes produisant l'éclairage intérieur. Les sources de cet éclairage étant connues et imposées

par l'environnement, nous cherchons quelles sont les propriétés du filtre de l'éclairage, c'est-à-dire les propriétés de l'enveloppe du bâtiment.

Nous considérons qu'il n'y a pas de solution optimale en architecture, essentiellement parce qu'il est difficile d'intégrer dans un problème de simulation inverse l'ensemble des paramètres de la conception architecturale. Un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel devra répondre à la question de l'éclairage, mais il sera ensuite nécessaire d'interpréter les solutions pour y intégrer des contraintes thermiques ou acoustiques, une notion esthétique, une dimension urbaine ou environnementale. S'il n'existe pas de solution optimale, l'inversion du raisonnement de simulation est-il adapté à la simulation inverse de l'éclairage en architecture ? Autrement dit, est-ce que la simulation inverse de l'éclairage est un bon moyen de répondre au problème de la création d'un outil d'aide à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse ?

Il se peut très bien que le concepteur ait une vision approximative de son intention et qu'elle soit sujette aux changements. Étant donné que les problèmes inverses peuvent être mal posés, la moindre modification dans l'intention d'ambiance lumineuse peut changer complètement les solutions. Ce problème est généralement résolu par une méthode d'optimisation. Cette remarque nous amène à nous interroger sur le niveau de détail qui est nécessaire dans la description de l'intention d'ambiance lumineuse et le calcul des solutions. Est-ce que ces détails (couleur, texture, reflet) ne seraient justement pas autant d'indices permettant de faciliter le traitement du problème ?

Enfin, un autre problème est soulevé par la nature de la source de l'éclairage naturel : l'environnement. Car c'est non seulement une source étendue et dynamique, mais aussi parce qu'il est imposé par la position géographique et le climat.

2.2.3 Présentation des solutions

La présentation des solutions de la simulation inverse de l'éclairage naturel est un problème corrélé à la nature de l'aide à la conception. En effet, c'est précisément lors du retour des résultats que se résout cette question. La présentation des solutions n'est pas seulement l'affichage d'une forme géométrique contenant une ouverture qui produit l'éclairement souhaité, mais plutôt la présentation du potentiel géométrique de l'espace étudié par rapport aux intentions d'ambiance lumineuse. Un problème inverse pouvant receler ou non des solutions, il ne s'agit pas seulement d'informer qu'une intention d'ambiance lumineuse est irréalisable dans cet espace ou d'énumérer une myriade de solutions. Il est aussi question de montrer l'adéquation de l'intention d'ambiance avec l'espace et par quels moyens cette dernière pourrait s'insérer dans l'espace. Quel résultat montrer et sous quelle forme ?

Le modèle de simulation est évidemment lié à la présentation des solutions dues à une simulation inverse. Cependant, il est nécessaire de se demander de quelle manière l'outil peut aider le travail de conception par l'intention d'ambiance lumineuse. Il apparaît clairement que l'organisation des solutions est un des atouts essentiels de l'outil numérique. Ce dernier peut regrouper des solutions en proposant des classements divers et être une balise du processus de conception au même titre que le dessin ou le calque. L'outil numérique peut être une aide à la conception par la compréhension des ambiances lumineuses, à partir du moment où il devient une aide à la visualisation de l'interaction lumière-espace.

2.3 Objectifs de la recherche

L'intégration de la simulation inverse de l'éclairage naturel dans le projet architectural, pose des problèmes relatifs à la définition du modèle de simulation inverse, et à l'utilisation de ce principe dans le processus de conception. Notre objectif est de montrer qu'il est possible de mettre en place un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel pour répondre aux attentes de la conception par l'intention d'ambiance lumineuse.

2.3.1 Conception par l'intention d'ambiance lumineuse

Le but de cette recherche est de permettre l'expression et le traitement d'intention d'ambiance lumineuse provenant de l'imagination, de références architecturales ou de normes du programme.

Nous abordons cette question avec une conception instrumentale, et étudions donc les moyens numériques utilisant les intentions d'ambiance lumineuse. Une méthode numérique d'aide à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse est proposée. Nous déterminons la nature d'une aide à la conception qui prendrait comme base l'expression des intentions d'ambiance lumineuse dues à la lumière naturelle. Le problème se situe au niveau de la création d'un outil de conception lié à la perception visuelle, aux effets lumineux et aux phénomènes physiques.

Nous nous interrogeons sur les possibilités d'intégration d'une méthode de simulation inverse de la lumière naturelle dans le projet architectural. Est-ce que la prise en compte de la lumière naturelle dans un outil de conception par l'intention d'ambiance lumineuse est pertinente ? Par là même, nous souhaitons proposer un moyen pour interroger l'activité de conception par l'intention d'ambiance pour mieux la connaître.

2.3.2 Simulation inverse de l'éclairage naturel

Nous souhaitons montrer comment un outil numérique s'intègre dans le processus de conception en architecture, et la faisabilité de cette méthode par l'implémentation d'un prototype. Nous mettons en place une formalisation des intentions d'ambiance lumineuse en vue de l'intégration de méthodes de simulation inverse dans la CAAO. Nous positionnons la simulation inverse de l'éclairage naturel comme une aide de l'un des aspects du processus de conception lorsqu'il prend sa source dans les effets de d'éclairage naturel.

Pour réaliser cette intégration, nous devons trouver une méthode de simulation inverse de l'éclairage adaptée aux particularités de la conception en architecture. Cette méthode doit tenir compte des sources de l'éclairage naturel, le ciel et l'environnement urbain, et du caractère complexe des intentions d'ambiance lumineuse. Nous devons pour cela adapter une méthode existante ou créer notre propre méthode de simulation inverse de l'éclairage. A cet effet, nous présentons une partie de la bibliographie que le problème de simulation inverse de l'éclairage a générée, dans un état de l'art au chapitre suivant.

Chapitre 3

État de l'art

Sommaire

3.1	Description de l'éclairage	70
3.1.1	Propriétés de l'éclairage	70
3.1.2	Interface de description	75
3.2	Simulation inverse de la lumière	82
3.2.1	Modélisation de la lumière	82
3.2.2	Types de problèmes inverses	86
3.3	Bilan de l'état de l'art	92
3.3.1	Description de l'éclairage naturel	92
3.3.2	Simulation inverse pour la conception architecturale	93
3.3.3	Présentation des solutions	94

CE CHAPITRE constitue un état de l'art des travaux sur la simulation inverse de l'éclairage dans la CAAO. Les problèmes inverses sont un thème de recherche en informatique depuis les années 90 [Martin, 1990]. Ces problèmes ont tout d'abord été étudiés pour la reconstruction inverse. Dans le domaine de la vision par ordinateur, la résolution des problèmes d'éclairage inverse est utilisée pour analyser une scène (géométrie, surfaces, sources de lumière) à partir des images de cette dernière. En informatique graphique, les problèmes d'éclairage inverse permettent de formaliser des situations où l'on souhaite produire une image ou une distribution lumineuse, à partir de paramètres divers généralement spécifiés par un utilisateur (conception d'éclairage ou de luminaire). Notre travail se situe dans ce dernier cas et l'état de l'art suivant est dédié à ce problème.

L'utilisation de l'éclairage inverse dans la CAAO se compose de deux phases : la description des intentions d'ambiance et le traitement de cette description. Nous proposons de suivre cette logique dans cet état de l'art et présentons d'abord les moyens de description des intentions d'ambiance lumineuse, puis les techniques de traitement de ces descriptions.

3.1 Description de l'éclairage

Cette partie présente les méthodes de description des ambiances lumineuses dans la simulation inverse de l'éclairage. Cette étape de description est l'articulation entre l'expression des intentions d'ambiance lumineuse et le modèle de simulation inverse. Ces méthodes sont classées selon les critères suivants :

- Les propriétés de l'éclairage sur lesquelles le concepteur peut travailler ainsi que les informations affichées à l'écran.
- Le type d'interface qui détermine l'interaction homme-machine : c'est le vecteur d'expression des intentions d'ambiance lumineuse.
- Le mode d'expression qui montre comment le concepteur peut décrire une intention d'ambiance lumineuse.

3.1.1 Propriétés de l'éclairage

Les propriétés de l'éclairage sont les informations affichées à l'écran sur lesquelles le concepteur peut travailler. Ces informations sur l'éclairage sont les éléments de base de la description de l'éclairage. Ce sont à travers ces données que le concepteur s'exprime et ce sont les seuls éléments disponibles pour le modèle de simulation inverse. Elles constituent donc le lien entre le concepteur et le modèle. Les propriétés de l'éclairage dépendent des sources de lumière et de la configuration spatiale du volume étudié.

Lumière directe et indirecte

L'éclairage naturel d'un local est une combinaison de trois composantes (Figure 3.1). L'éclairage dû à la lumière provenant directement du ciel est la composante directe, ou composante du ciel. La composante indirecte extérieure, ou composante réfléchie extérieure, est l'éclairage résultant de la réflexion des

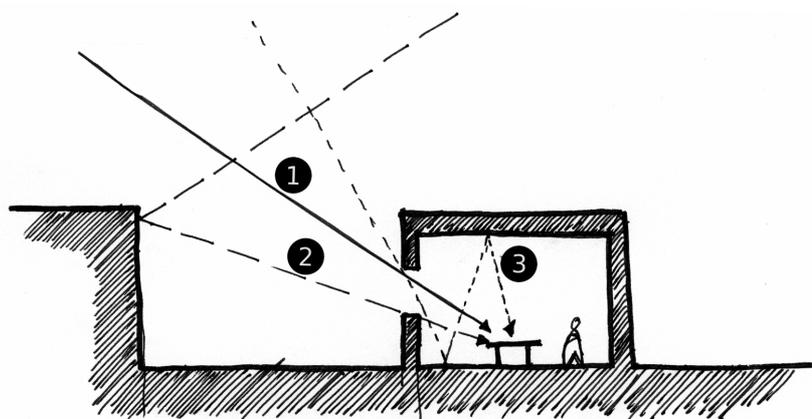


FIG. 3.1 – Composantes de l'éclairage naturel : directe (1), indirecte extérieure (2), indirecte intérieure (3).

rayons lumineux sur les surfaces extérieures. La composante indirecte intérieure, ou composante réfléchie intérieure, est l'éclairage issu des réflexions intérieures.

Lumière directe La lumière directe dépend des propriétés des sources de lumière (position, intensité et autres). La simulation de l'ensoleillement direct est utilisée par les architectes pour projeter des ombres et montrer les zones ensoleillées et ombragées selon une date et une heure. Cette méthode est aussi utilisée avec d'autres types de sources lumineuses, directionnelles ou ponctuelles, lorsque l'intensité et l'orientation de la lumière directe sont déterminantes pour provoquer l'éclairage recherché (norme de travail, musées, spectacles, etc.). L'expression des intentions de lumière directe dans [Poulin et Fournier, 1992, Schoeneman *et al.*, 1993, Siret, 1997] se fait par la délimitation d'une zone éclairée par une lumière directe et suppose que les autres parties du volume ne sont pas éclairées directement. C'est une description spatiale binaire qui permet de reconstruire la géométrie de la scène [Poulin et Fournier, 1992, Siret, 1997] ou de positionner des sources artificielles [Schoeneman *et al.*, 1993].

Lumière indirecte La lumière indirecte extérieure dépend des propriétés de l'environnement de la scène étudiée (géométrie et matériaux). L'expression et la simulation de cette composante ne sont pas référencées dans les travaux précédents.

La lumière indirecte intérieure dépend de la géométrie de la scène et des propriétés de réflectance des matériaux. Cette lumière est traitée par un modèle de réflexions diffuses dans le cadre de l'illumination globale pour les problèmes d'éclairage inverse [Kawai *et al.*, 1993, Costa *et al.*, 1999a, Contensin, 2002, Jolivet *et al.*, 2002] ou de géométrie inverse [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995]. L'utilisation d'un modèle de réflexions diffuses révèle bien le fait que l'on se soucie de l'éclairage total et non pas de la provenance de la lumière. La description de cette lumière peut se faire à travers des niveaux d'éclairage sur des éléments ponctuels [Moeck, 2004, Jolivet *et al.*, 2002, Contensin, 2002] ou des surfaces [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995, Kawai *et al.*, 1993, Costa *et al.*, 1999a].

La proportion des différentes composantes de la lumière a une grande influence sur la qualité de l'ambiance lumineuse et peut être facilement quantifiée par des propriétés lumineuses. Lors de l'expression de l'intention de proportion, le problème est de distinguer clairement la lumière directe et indirecte dans l'ambiance lumineuse [Seitz *et al.*, 2005]. Dans les travaux de Yu [Yu *et al.*, 1999] sur la recherche de la réflectance des matériaux, la proportion entre la lumière directe et indirecte est forcément considérée puisqu'elle détermine les propriétés d'émission des surfaces. Néanmoins, cette proportion ne fait pas partie de l'expression des intentions d'ambiance lumineuse.

Direction de l'éclairage

La direction de l'éclairage est liée à une source directionnelle (soleil, source ponctuelle à l'infini) ou une source ponctuelle orientée (spot). C'est un paramètre utilisé couramment pour décrire l'éclairage dans les spectacles avec des sources artificielles ou l'éclairage du soleil. Une lumière directionnelle produit un éclairage très contrasté permettant de réaliser des effets très marqués. À notre connaissance, le paramètre de direction n'est pas utilisé pour décrire d'autres éclairages naturels que l'ensoleillement. Les scripts de Costa [Costa *et al.*, 1999a] permettent de spécifier les ombres, les lumières et la direction de l'éclairage pour modéliser le confort visuel. Le travail de Moeck [Moeck, 2004] sur la perception des objets tient compte de la donnée directionnelle par le biais de l'apparence des objets, mais ne permet pas la spécification d'une direction.

La direction de l'éclairage est un paramètre aussi utile que le niveau d'éclairement, mais n'est pas présent dans les interfaces graphiques. Cette absence est certainement due au fait que la direction de l'éclairage n'est pas directement perçue. Néanmoins, ce paramètre peut être utilisé pour décrire la lumière perçue par un observateur [Costa *et al.*, 1999a, Moeck, 2004] ou la lumière reçue par une surface.

L'éclairage naturel

Les dimensions spatiale et temporelle de l'éclairage naturel sont dues aux propriétés des sources de lumière naturelle. La dimension temporelle est donnée par le caractère dynamique du soleil. La dimension spatiale est donnée par l'étendue de la voûte céleste. Les éléments de l'environnement seront considérés, selon leur distance à la scène, comme des sources proches ou distantes. Le caractère étendu de la source est répercuté sur la répartition de la lumière dans l'espace.

Quantités lumineuses

Les quantités lumineuses sont des valeurs quantifiables associées à des unités de mesure photométriques (luminance, émittance, intensité, etc.), ou des unités de mesure physiologiques (brillance, contraste, etc.). Si l'on considère la conception architecturale comme étant l'action de donner une proportion et une taille à l'espace, la conception par l'intention d'ambiance lumineuse peut être vue comme le fait de donner « une proportion et une taille » à la lumière.

Les données lumineuses quantifiables sont présentes dans tous les travaux précédents, et décrivent la lumière échangée entre les surfaces ou vue par un usager. Les moyens permettant d'exprimer ces propriétés sont basés sur l'indication d'une valeur explicite en lux [Costa *et al.*, 1999a], la qualité des textures [Moeck, 2004], un langage pseudo-naturel [Jolivet *et al.*, 2002], le dessin de zones éclairées [Kawai *et al.*, 1993, Schoeneman *et al.*, 1993, Siret, 1997, Jung *et al.*, 2003] ou la photographie [Marschner et Greenberg, 1997] [Yu *et al.*, 1999]. Ces propriétés paraissent donc indispensables pour exprimer une intention d'ambiance lumineuse.

Qualité lumineuse

Les qualités lumineuses sont des propriétés subjectives de la lumière, comme le confort visuel ou les impressions dues à l'ambiance lumineuse. Ces propriétés sont liées à la perception et dépendent de la culture, de l'expérience et de l'état d'esprit de l'observateur. La qualité de la lumière a été explicitement mentionnée dans peu de travaux [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995, Moeck, 2004, Shacked et Lischinski, 2001]. Cela est peut-être dû au fait qu'il est difficile d'aborder la subjectivité des impressions.

La qualité lumineuse est adressée par [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995] sous la forme d'indicateurs de préférence. Ces préférences sont évaluées à partir

d'études statistiques de confort et d'occupation. Dans [Moeck, 2004], l'expression des qualités de la lumière se fait à travers la description de l'apparence des objets de la scène. Les propriétés de brillance, de specularité ou de contraste peuvent être spécifiées pour exprimer des intentions d'ambiance lumineuse. Cette démarche permet d'avoir une approche identique aux exigences d'éclairage dans l'industrie et le travail spécifique sur un objet. Shacked [Shacked et Lischinski, 2001] prend en compte la perception visuelle des attributs de la scène ou de l'objet pour définir des qualités de l'éclairage d'un élément particulier de la scène. La qualité lumineuse est ici définie par le biais du contraste spatial que l'auteur cherche à équilibrer. Une description des qualités d'ambiance est possible avec un langage pseudo-naturel dans le cadre de la modélisation déclarative. Mais les travaux sur le sujet évoquent plutôt des quantités lumineuses (beaucoup de lumière, peu, très peu, etc.) que des qualités [Jolivet *et al.*, 2002].

3.1.2 Interface de description

L'interface de description détermine l'interaction homme-machine : c'est la manière dont les intentions d'ambiance lumineuse sont exprimées. Les interfaces de description de l'éclairage pour la simulation inverse sont des interfaces textuelles ou des interfaces graphiques dans un environnement standard. Nous n'avons pas remarqué de travaux utilisant des interfaces alternatives (réalité virtuelle ou autres). Il existe une différence entre les interfaces qui permettent d'agir sur des paramètres et de voir le résultat [Kawai *et al.*, 1993, Marks *et al.*, 1997, Costa *et al.*, 1999a], et les interfaces où l'utilisateur exprime une idée et obtient un résultat approchant [Schoeneman *et al.*, 1993, Siret, 1997, Marschner et Greenberg, 1997, Yu *et al.*, 1999]. L'expression des intentions architecturales serait plus proche de la seconde approche.

Interfaces textuelles

Avec une interface textuelle, l'ambiance lumineuse est exprimée par des mots, parlés ou écrits. Ces interfaces permettent de décrire beaucoup de propriétés lumineuses, des impressions ou des idées (le « non-visible »), mais seul un petit ensemble de ces propriétés peut être exploité par un modèle de simulation inverse.

Jolivet [Jolivet *et al.*, 2002] et Poulingeas [Poulingeas, 2004] décrivent la position de la source et l'intensité de l'éclairage dans les intentions lumineuses. Ces intentions sont formalisées par une modélisation déclarative basée sur la logique floue. La relation à l'accessibilité visuelle dépend des mêmes éléments que l'éclairage : les ouvertures. Nivet [Nivet, 1999] propose une description de l'accessibilité visuelle : je veux voir « totalement, partiellement, pas du tout » depuis « la totalité, une partie, aucune partie » de la zone de l'observateur.

Dans [Costa *et al.*, 1999a], les objectifs de conception sont décrits de manière très précise par des scripts, et permettent de spécifier l'éclairage, l'ombrage ainsi que leur direction pour modéliser le confort visuel.

Les intentions sont modélisées par des fonctions de préférences dans [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995]. Ces fonctions sont définies par le concepteur ou déduites à partir d'autres sources telles que des attentes de performances énergétiques, des études sociales ou psychologiques, des études statistiques ou autres. Ces fonctions de préférences permettent de modéliser les attentes du concepteur en fonction-objectifs.

Interfaces graphiques

Les interfaces graphiques permettent d'exprimer les intentions d'ambiance avec une description visuelle des propriétés lumineuses, ce qui peut être vu comme la « forme » spatio-temporelle de l'ambiance. Cette description

peut aussi apporter du sens à travers l'utilisation de conventions symboliques [Glaser *et al.*, 2003].

Les interfaces graphiques affichent le « plan de travail » de façon sommaire, et permettent au concepteur de modifier les propriétés lumineuses. Le positionnement des sources lumineuses ou des cibles est supporté implicitement. Les quantités lumineuses (luminance et autres) sont facilement exprimées à l'aide de pinceaux ou de curseurs. C'est la représentation graphique de l'ambiance lumineuse [Schoeneman *et al.*, 1993, Lebahar, 1983]. Nous considérons une photographie comme une description de l'ambiance lumineuse qui apporte des données plus précises.

Schoeneman [Schoeneman *et al.*, 1993] propose une interface pour peindre la composante directe d'un éclairage artificiel sur les surfaces d'une scène tridimensionnelle. Dans [Siret, 1997], la description des intentions se fait par la définition d'une zone rectangulaire ensoleillée sur le sol d'une scène pour un intervalle de temps donné. Pour Contensin [Contensin, 2002], les objectifs d'éclairage sont décrits par la sélection d'une facette et l'indication de son intensité dans une interface graphique. Dans [Kawai *et al.*, 1993], l'utilisateur peut ajuster le poids d'une fonction-objectif et spécifier des contraintes lumineuses. Cette fonction-objectif est représentée par un éclairage qui calcule la brillance, et permet à l'utilisateur de corriger cette fonction. La description lumineuse dans une interface graphique peut se faire à l'aide d'une ou plusieurs photographies [Marschner et Greenberg, 1997, Yu *et al.*, 1999] avec une calibration connue.

Marks [Marks *et al.*, 1997] avance que les intentions sont beaucoup trop complexes à modéliser, et la description de l'éclairage se fait par la sélection et la composition de scènes précalculées. Jung [Jung *et al.*, 2003] utilise des données symboliques pour décrire les positions des sources de lumière. Les conventions de dessin pourraient être aussi utilisées pour décrire les propriétés de la lumière.

Représentation graphique de l'éclairage

Quel que soit le mode d'interaction, les interfaces de description de l'éclairage comportent un affichage de la lumière dans l'espace. Ce retour d'informations est important pour montrer comment le modèle interprète la description de l'éclairage. Les données affichées sont un support pour l'expression des intentions et constituent des indices qui permettent d'imaginer la scène réelle. Dans le cas de la conception par l'intention d'ambiance lumineuse, les données géométriques sont recherchées et donc représentées de manière schématique. En revanche, les données relatives à la lumière sont plus détaillées et affichées selon différents modes de représentation.

Représentation photométrique La représentation photométrique affiche les valeurs de certaines unités (luminance, intensité, éclairement, etc.) avec une palette de couleurs arbitraire. Elle montre une réalité physique très proche des modèles physiques, et permet d'apprécier les répartitions de valeurs de manière précise et sans ambiguïté due à la perception. Cette représentation est utilisée en architecture et en urbanisme pour l'étude spatiale et temporelle de la lumière et le respect des normes d'éclairage à des fins fonctionnelles et esthétiques [Miguet et Groleau, 2002, Dia, 2007].

Représentation photoréaliste La représentation photoréaliste montre une scène telle qu'on peut la voir dans notre réalité sensible. L'objectif de ce type de représentation est de reproduire le plus fidèlement possible le comportement de la lumière, et de produire des images proches de la photographie. Ce type de représentation est utilisé en architecture et en urbanisme pour avoir un aperçu de l'ambiance lumineuse essentiellement à des fins de communication du projet. La représentation photoréaliste peut aussi être utile pendant la phase de conception



FIG. 3.2 – Le rendu non-photoréaliste au cinéma : *Renaissance* (Copyright : ©Onyx Films / Millimages / Luxanimation / Timefirm Ltd / France 2 Cinema).

pour améliorer la collaboration des acteurs de la conception, au même titre que la photographie en conception collaborative [Halin *et al.*, 2003]. Ce mode de représentation est utilisé dans la plupart des travaux décrits précédemment.

Représentation non-photoréaliste La représentation non-photoréaliste est l'interprétation artistique d'une scène ou d'un objet. Ce type de représentation s'est fortement inspiré de la production artistique classique à ses débuts (rendu aquarelle, mosaïque, cubisme, etc.), et tend à trouver des styles qui lui sont propres (Figure 3.2). Une représentation non-photoréaliste a l'avantage de pouvoir mettre en évidence des éléments particuliers de la scène et ainsi être plus facilement compréhensible par un observateur. Ce style est souvent utilisé en architecture pour la conception et la communication car il permet au concepteur de mieux exprimer ses intentions que par une représentation photoréaliste [Ske, 2007].

Mode d'expression des intentions

Le mode d'expression montre comment le concepteur interagit avec l'information lumineuse. Cela peut être vu comme le langage utilisé pour décrire l'intention

d'ambiance. Ce mode d'expression peut être aussi bien une expression très libre, la composition d'éléments prédéfinis ou un hybride des deux modes précédents.

Expression libre L'expression libre est proche de la création artistique et elle est généralement utilisée par les architectes pour exprimer leurs intentions. Elle peut revêtir de nombreuses formes dont l'interprétation est ambiguë et dépendante du contexte, comme les poèmes pour une interface textuelle ou la peinture pour les interfaces graphiques. Il est donc très difficile d'intégrer ce type d'expression dans un modèle de simulation inverse de l'éclairage. C'est pourquoi aucun mode d'expression libre n'a été référencé dans les travaux précédents. Cependant, nous pouvons noter l'utilisation de l'expression libre dans certains travaux de recherche sur la conception de la géométrie, par la reconnaissance des croquis et la reconstruction du volume associé [Sosnov *et al.*, 2002].

Composition La composition d'éléments prédéfinis utilise seulement des conventions pour décrire les intentions d'ambiance. Ce mode est très proche d'une interface textuelle de programmation, ou d'une interface graphique de géométrie de construction de solides (*Constructive Solid Geometry - CSG*). L'expression des ambiances peut se faire par l'écriture d'un script traduisant des contraintes lumineuses [Costa *et al.*, 1999a]. L'utilisation des scripts de description de l'éclairage permet effectivement d'éviter les ambiguïtés et les erreurs d'interprétations. Cependant, c'est le niveau zéro de la traduction d'intention d'ambiance car c'est au concepteur de donner toutes les contraintes au système. L'expression des ambiances peut aussi se faire par la composition d'éclairages précalculés [Marks *et al.*, 1997]. Cette méthode visuelle est facile à prendre en main mais le concepteur est limité par le panel d'éclairages proposés. La composition de conventions symboliques permet aussi de décrire les positions des sources lumineuses [Jung *et al.*, 2003, Glaser *et al.*, 2003].

De manière générale, l'avantage de ce mode de composition est sa facilité d'intégration dans un modèle de simulation inverse puisqu'il est proche d'un langage de programmation, non ambigu par définition. La composition est très bien adaptée à la création de volumes géométriques car elle est proche de la géométrie constructive en architecture. Appliquée à l'expression des intentions d'ambiance lumineuse, ce type d'expression peut être vu comme une sorte de géométrie lumineuse constructive, en référence à la géométrie de construction de solides.

Hybride Entre ces deux extrêmes, on peut trouver un compromis en cachant les mécanismes de composition pour donner l'apparence d'une expression libre. Cela reste un mode d'expression avec un ensemble de conventions dans un cadre bien défini et dans lequel chaque action n'a aucune ambiguïté pour le modèle. Néanmoins, le concepteur a une impression de liberté parce qu'il peut s'exprimer avec une palette d'outils faciles d'utilisation. Nous trouvons des exemples dans les outils de CAO actuels (AutoCAD, ArchiCAD, SketchUp, etc.), ou dans la modélisation déclarative à travers un langage pseudo-naturel [Jolivet *et al.*, 2002]. La difficulté de création d'un tel mode d'expression réside dans le positionnement du compromis entre l'expression libre et la composition d'éléments prédéfinis. Le panel d'expression et la définition de conventions doivent être partagés par les utilisateurs de l'outil de CAO et facilement intégrable dans un processus de création.

3.2 Simulation inverse de la lumière

Le principe de la simulation inverse est d'identifier la cause ou l'ensemble des causes d'un phénomène à partir de ses conséquences, qu'elles soient connues ou désirées. L'une des caractéristiques des problèmes inverses est d'être fréquemment mal posés : de petites variations dans les données d'entrées peuvent entraîner des variations importantes dans les résultats. Il en résulte que ces problèmes sont difficiles à résoudre par des méthodes analytiques.

En particulier, les problèmes d'éclairage inverse se présentent dans des situations où certains éléments de la scène participant au phénomène d'éclairage sont inconnus. L'objectif de l'éclairage inverse est donc de retrouver ces inconnues à partir des éléments disponibles : l'éclairage de la scène et les causes référencées. Nous présentons dans cette partie les méthodes de modélisation de la lumière, puis les types de problèmes inverses liés à la simulation inverse de l'éclairage.

3.2.1 Modélisation de la lumière

La modélisation de la lumière est au cœur de la simulation de l'éclairage. Nous précisons dans cette partie les paramètres de description des sources lumineuses et les méthodes de modélisation de la propagation de la lumière.

Position et géométrie de la source de lumière

La position de la source lumineuse est une propriété descriptive importante lors de la simulation de l'éclairage naturel. Les sources distantes produisant une lumière directionnelle sont distinguées des sources proches qui produisent une lumière située. Le fait de considérer une source comme distante est une approximation destinée à simplifier la simulation. Cette approximation a peu

d'impact sur le résultat de la simulation lorsque la source est à une distance très grande relativement à la dimension de la scène. Par exemple, le soleil ou un élément de ciel sont toujours considérés comme des sources distantes situées à l'infini qui vont produire une lumière directionnelle. Il est évident que plus une source considérée comme distante s'approche de la scène, plus l'erreur d'approximation est grande [Patow et Pueyo, 2002].

Une source proche est située par rapport à, ou dans, la scène. Elle ne bénéficie pas de l'approximation de direction et produit donc une lumière située. Une source proche produit un éclairage différent sur les éléments de la scène selon sa position et sa géométrie.

Une source est considérée comme ponctuelle lorsque sa taille est très petite par rapport à sa distance ou aux dimensions de la scène. Cette approximation considère que toute l'énergie est émise depuis un unique point.

Une source étendue est une surface émettrice de lumière. Elle peut être assimilée à un ensemble de sources ponctuelles ou un ensemble de petites surfaces. Il est en effet difficile de faire une simulation d'éclairage avec une source étendue sans faire une décomposition de cette source. Lorsqu'une source étendue est distante, chacun de ses éléments produira une lumière directionnelle qui lui est propre. Si une source étendue est proche, on considère la position et la géométrie de chaque élément séparément.

La notion de proximité (proche/distante) est aussi utilisée pour qualifier une distribution lumineuse produite par une source lumineuse. Une distribution de lumière proche décrit l'éclairage d'une surface située dans la scène. Une distribution de lumière distante décrit une répartition de l'éclairage autour d'une source, généralement en coordonnées polaires. On retrouve donc la même logique que pour les sources proches ou distantes dans le sens où une distribution de lumière proche varie en fonction de la position du point éclairé, alors que la

distribution de lumière distante varie en fonction de la direction éclairée. Le fait de faire la description d'un éclairage proche (position) ou éloigné (direction) de la source est déterminant pour le modèle de simulation inverse, car cette description est une donnée d'entrée du modèle [Patow *et al.*, 2004].

Sources de lumière naturelle La lumière naturelle fait partie intégrante de la conception architecturale. Les intentions d'ambiance lumineuse exprimées par les architectes sont souvent relatives à cette lumière. Nous décrivons les sources de lumière naturelle selon leur position et leur géométrie.

Le soleil est souvent considéré comme une source ponctuelle distante car sa distance en fait une source très petite. En revanche, le ciel est une source étendue souvent considérée comme distante. Les travaux concernant la simulation de la lumière naturelle utilisent généralement un modèle de ciel CIE [Com, 2007] qui décrit trois modèles de ciel : ciel uniforme (10000 lux), ciel couvert et ciel clair. Cette pratique tend à être remplacée par l'utilisation de modèles plus réalistes [Miguet, 2000] permettant de prendre en compte les variations de couleur ainsi que des conditions climatiques plus diverses. Une simulation du ciel permet de prendre en compte la taille du soleil même si celui reste petit par rapport au ciel.

Les sources de lumière naturelle (Soleil, ciel, environnement) [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995, Siret, 1997] sont dynamiques, puisqu'elles dépendent du climat, de la position géographique, de la date et de l'heure. La dimension temporelle de la lumière ajoute à la complexité de l'équation de rendu une variation potentielle de tous les paramètres de la scène, y compris les paramètres relatifs aux sources lumineuses. Dans l'ensemble, nous remarquons que peu de travaux prennent en compte la lumière naturelle ainsi que sa dimension temporelle.

Propagation de la lumière

Cet aspect de la description de la lumière est déterminant car il modélise la propagation de la lumière, élément central de la simulation lumineuse. De nombreux travaux depuis le début de l'informatique graphique se sont focalisés sur la propagation de la lumière.

La simulation de l'éclairage est modélisée en informatique graphique par l'illumination locale ou globale. Comme son nom l'indique, l'illumination locale considère le phénomène de l'éclairage localement, c'est-à-dire que les interréflexions ne sont pas prises en compte. Cette simulation « minimale » permet d'éclairer sommairement une scène mais elle est très éloignée d'un aspect photoréaliste.

L'illumination globale peut être vue comme un cas particulier de la théorie de transport des particules [Cohen et Wallace, 1993]. Elle est basée sur l'équation de rendu qui établit l'équilibre lumineux d'une scène. L'équation de rendu (Équation 3.1) est utilisée pour calculer la luminance L en un point x dans une direction ω , à partir de la luminance émise L_e ou des luminances réfléchies par les autres surfaces de la scène L_r .

$$L(x, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + L_r(x, \vec{\omega}) \quad (3.1)$$

Cette équation peut être abordée de plusieurs manières selon le degré de précision souhaité dans les calculs. Le terme « équation générale » est utilisé lorsque cette équation est considérée dans son intégralité sans aucune approximation. Cette approche brutale permet de faire une simulation précise au prix d'un calcul complexe.

Les approches suivantes font des approximations ou des estimations pour diminuer la complexité du calcul, tout en essayant d'obtenir des résultats ayant une erreur minimale. L'équation de radiosité est inspirée des échanges d'énergie

thermique entre les surfaces et considère que toutes les surfaces de la scène sont lambertiennes [Cohen et Wallace, 1993]. Une surface lambertienne émet ou réfléchit la lumière dans toutes les directions avec une luminance constante. Cette approche évite des calculs de réflexions complexes mais demande le calcul des facteurs de formes. Un facteur de forme entre deux surfaces s_1 et s_2 représente la quantité d'énergie issue de s_1 qui est reçue par s_2 .

La méthode de Monte-Carlo permet une approche stochastique de l'équation de rendu [Jensen, 2001]. En effet, la luminance d'un élément de la scène sera évaluée en fonction de son environnement visible par une série de sondages distribués aléatoirement. La qualité de la simulation dépend du nombre de ces sondages et de leur loi de distribution.

3.2.2 Types de problèmes inverses

Nous présentons dans cette partie les types de problèmes d'éclairage inverse pour mettre en évidence le panel d'approches et d'applications de cette catégorie de problèmes. L'équation de transport (Équation 3.1) peut s'exprimer en équation d'opérateurs linéaires [Arvo, 1993] :

$$L = L_e + \hat{K}\hat{G}L \quad (3.2)$$

avec L la luminance d'une surface dans une direction donnée, L_e l'émittance propre de la surface, \hat{K} l'opérateur de réflexion locale et \hat{G} l'opérateur de radiance globale.

Cette équation d'opérateurs linéaires permet de décrire les problèmes inverses selon que l'élément recherché dépend de la géométrie de la scène (\hat{G}) - géométrie inverse, des propriétés de réflectance des surfaces (\hat{K}) - réflectance inverse, ou des caractéristiques des sources lumineuses (L_e) - éclairage inverse [Marschner, 1998].

Géométrie inverse

La géométrie inverse traite des problèmes tels que la recherche de la géométrie des réflecteurs et des éléments influant sur la visibilité de la source. L'élément recherché est l'opérateur \hat{G} représentant les paramètres géométriques de la scène.

Illumination locale Siret [Siret, 1997] traite la simulation inverse de l'ensoleillement par une méthode de calcul géométrique. Ce dernier gère le temps comme une somme d'instantanés et considère l'impact global de la tache solaire. Il recherche une géométrie permettant la visibilité du soleil pendant une certaine période de temps. La solution proposée est basée sur des « pyramides complexes d'ensoleillement ».

Houpert [Houpert, 2003] développe dans sa thèse un outil de modélisation des contraintes solaires et visuelles. Ses travaux valident l'outil basé sur la simulation inverse par des tests en situation réelle et une analyse des réactions des utilisateurs. La méthode de conception générale considère le projet comme flou, et la conception elle-même est une suite de réduction d'incertitudes et de résolution de contraintes.

Illumination globale Mahdavi [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995] adopte un point de vue implicite (essai-erreur) du problème et utilise une stratégie d'optimisation orientée par des préférences dynamiques, pour prendre en compte l'ambiance lumineuse et reconstruire des ouvertures.

Patow [Patow *et al.*, 2004] propose une méthode de calcul de la géométrie d'un réflecteur pour un dispositif optique (ampoule et réflecteur) à partir de la distribution distante de la radiance du dispositif, et des caractéristiques de l'ampoule. Il utilise une technique d'optimisation globale, et fait un traitement complet de la surface au vu des dépendances entre les éléments du réflecteur. Les

résultats obtenus sont très satisfaisants, cependant l'auteur remarque un problème de temps de calcul dû à une méthode basique au niveau algorithmique.

Réflectance inverse

Dans la réflectance inverse, on distingue la recherche de texture et la recherche de la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (*Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF*), qui représentent respectivement les variations spatiales et angulaires de la réflexion lumineuse sur une surface. L'élément recherché est l'opérateur \hat{K} représentant les propriétés de réflectance des matériaux de la scène.

Fournier [Fournier, 1995] nous propose une démarche unificatrice englobant l'illumination locale et globale. L'idée générale se base sur le découpage en volumes d'une scène (*volume-driven*) et l'échange de lumière entre ces volumes (*light-driven*), plutôt que sur un découpage en éléments de surfaces et sur leurs échanges de lumière. Le but est de découper la scène en volumes de telle sorte que l'on puisse calculer un équilibre global à l'intérieur de ceux-ci. L'équilibre local est vu comme un cas particulier d'échange de lumière entre les surfaces des volumes. Le type de découpage des volumes et le format d'échange entre les volumes constituent les difficultés inhérentes à cette méthode.

Dans [Yu et Malik, 1998] et [Yu *et al.*, 1999], les auteurs présentent une méthode en tenant compte des illuminations directes et indirectes pour retrouver la réflectance des surfaces à partir d'un ensemble de photographies et du modèle numérique de la pièce. Cette dernière est éclairée par des sources artificielles dont les positions et les intensités sont connues. Le résultat obtenu est un modèle géométrique associé aux propriétés réfléchives des surfaces. Ce modèle peut être ensuite ré-éclairé par des techniques traditionnelles.

Les travaux de Kawaiï [Kawai *et al.*, 1993] permettent de trouver les réflec-

tances des surfaces, ainsi que les émittances. Il prend en compte les paramètres qualitatifs de la lumière par une méthode empirique.

Éclairage inverse

L'élément recherché L_e est relatif aux propriétés d'émittance des surfaces. Autrement dit, c'est la recherche des propriétés des sources lumineuses. Les méthodes proposées répondent aux problèmes de positionnement de sources, d'émittance des sources préalablement positionnées, ou donnent un cadre général de résolution.

Illumination locale Ramamoorthi et Hanrahan proposent une méthode basée sur le traitement du signal [Ramamoorthi et Hanrahan, 2001b, Ramamoorthi et Hanrahan, 2001c, Ramamoorthi et Hanrahan, 2001a] pour traiter différents problèmes de rendu inverse dans les catégories de l'éclairage inverse et de la réflectance inverse. La synthèse d'image photoréaliste nécessite des données fiables et précises. Pour obtenir ce genre de données les auteurs proposent de mesurer ces données sur des photographies par des techniques de rendu inverse. L'idée est de donner un cadre formel aux problèmes de rendu inverse, pour ce faire, les auteurs proposent d'assimiler l'opération d'illumination à une convolution.

Moeck [Moeck, 2004] fait un travail sur l'éclairage d'un objet orienté vers l'architecture. L'auteur propose d'apporter une contribution au domaine de la conception d'éclairage en architecture à travers une méthode basée sur les problèmes de satisfaction de contraintes et les spécifications d'éclairage des objets appartenant à une scène. La méthode employée est une optimisation de satisfaction de contraintes, focalisée sur le paramètre de l'éclairage.

Illumination globale L'émittance de sources lumineuses positionnées au préalable est traitée par Schoeneman [Schoeneman *et al.*, 1993], qui propose une interface pour peindre la lumière dans une scène sans toutefois tenir compte des inter-réflexions. Il fait une décomposition de l'éclairage global avec une approximation par un système linéaire de dimensions finies. La recherche se fait sur l'émittance de chacune des sources, autrement dit, sur le coefficient de pondération des sources dans un système linéaire. La résolution du système linéaire se fait avec une méthode de Gauss-Seidel, qui est modifiée pour ramener les coefficients négatifs à zéro au cours du calcul.

Marschner [Marschner, 1998] a comme objectif la manipulation de photographies, la source est une sphère englobant l'objet, divisée en éléments de base dont on cherche à optimiser la proportion. Les auteurs utilisent la technique des moindres carrés avec une régularisation linéaire, et une décomposition en valeurs singulières pour permettre un ajustement dynamique des paramètres de la régularisation.

Le positionnement de sources artificielles dans un bureau avec des contraintes de confort et d'économie d'énergie lumineuses a été proposé par Costa [Costa *et al.*, 1999a, Costa *et al.*, 1999b]. Il applique une méthode d'optimisation par un algorithme de recuit simulé dans le cadre de la radiosité.

Shacked [Shacked et Lischinski, 2001] dégage les informations pertinentes dans une scène 3D grâce aux informations lumineuses. C'est une méthode automatique d'éclairage photoréaliste pour mettre en relief les propriétés géométriques de l'objet (relief, profondeur, texture). Cette méthode gère en théorie l'éclairage d'objet et de scène, en revanche seul l'éclairage d'objet est mis en pratique. Cette méthode est développée par Hai Nam Ha et Olivier [Ha et Olivier, 2006a, Ha et Olivier, 2006b] qui proposent un algorithme génétique pour optimiser la méthode de positionnement de source.

Contensin [Contensin, 2000] présente une méthode de résolution directe. Elle utilise la radiosité classique et fait un groupement des éléments du système d'équations linéaires par les types de facettes qu'elles mettent en relation. C'est une résolution par pseudo-inversion basée sur une décomposition en valeurs singulières.

Poulingeas [Poulingeas, 2004] propose un modèle basé sur la radiosité et la technique de Monte-Carlo, ce qui est un compromis entre une base physique, réaliste et un problème calculable. Nous avons précédemment cité le travail de Kawai [Kawai *et al.*, 1993] qui porte aussi sur l'émittance des surfaces.

3.3 Bilan de l'état de l'art

Dans ce bilan de l'état de l'art, nous essayons de répertorier les éléments intéressants et les inconvénients des travaux précédents, aussi bien au niveau de la description des intentions que du traitement de ces intentions.

Une aide à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse peut se faire grâce aux simulateurs de lumière couplés, ou intégrés, aux logiciels de CAO. L'aide à la conception se traduit par la représentation d'un phénomène objectif qui permet la validation du projet par rapport à des intentions (simulation photoréaliste) ou des normes (simulation photométrique). Cependant, il existe toujours la logique de la conception géométrique, puis la confrontation à l'intention d'ambiance. Dans le cadre de la simulation inverse, les outils ne sont pas encore à la disposition du public mais nous pouvons constater leurs limitations intrinsèques indépendamment de l'implémentation logicielle.

3.3.1 Description de l'éclairage naturel

Il existe des lacunes au niveau de la description de l'ambiance, c'est un problème soulevé par Costa [Costa *et al.*, 1999a] dans ses conclusions. Ce dernier remarque les difficultés pour combiner la précision et la facilité dans une même méthode de description des intentions d'ambiance lumineuse. Ces difficultés s'expliquent par le fait qu'une ambiance lumineuse peut s'exprimer par des méthodes très diverses. Nous constatons que beaucoup de méthodes considèrent la direction incidente de l'éclairage comme une variable. Ces méthodes cherchent donc cette direction ce qui implique de nombreux calculs et une explosion de solutions difficile à maîtriser. Néanmoins, l'architecte peut avoir une idée précise de la direction incidente de l'éclairage, cette direction pourrait donc être considérée comme une donnée du problème.

Les réflexions de l'ensoleillement propagent une quantité d'énergie importante sous forme lumineuse et thermique. Ces réflexions ne sont pas spécifiquement étudiées dans les travaux précédents.

La perception humaine ne distingue pas la lumière directe de la lumière indirecte. L'inconvénient majeur des interfaces graphiques est que l'on fait la description de la lumière perçue par un observateur et non de la lumière reçue par une surface. Il est donc difficile de dessiner la composante directe de la lumière comme Schoeneman le remarque dans sa conclusion [Schoeneman *et al.*, 1993].

3.3.2 Simulation inverse pour la conception architecturale

La simulation inverse est un principe utilisé en ingénierie pour identifier un modèle. La convergence vers une solution se fait souvent à l'aide d'une technique d'optimisation. Cette démarche pourrait paraître adaptée à la CAAO car le concepteur d'espace cherche aussi une solution unique : le bâtiment. Or, la notion de bâtiment « optimal » est difficile à intégrer dans un modèle de simulation inverse, tant les paramètres d'optimisation d'un bâtiment seraient nombreux et complexes. Nous cherchons donc une méthode de simulation inverse de l'éclairage qui aide la conception d'une solution sans forcément donner une solution optimale.

La plupart des méthodes précédentes utilisent l'équation de radiosité, et proposent une ou plusieurs solutions sur la base de critères objectifs, automatiquement et sans explication sur la manière de découvrir la solution. Dans ces méthodes, le problème est représenté par un système d'équations linéaires dont la résolution inverse est obtenue par une méthode directe ou indirecte. La méthode directe est une pseudo-inversion du système d'équations linéaires et permet d'obtenir une solution analytique. La méthode indirecte est une optimisation de contraintes, basée sur un cycle prédictions-corrrections, en vue de minimiser une

fonction-objectif permettant de mesurer la distance entre la solution courante et l'intention.

La notion de qualité lumineuse est évoquée par [Shacked et Lischinski, 2001, Moeck, 2004, Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995, Ha et Olivier, 2006a, Ha et Olivier, 2006b]. Seul [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995], qui expérimente des méthodes de résolutions directes et indirectes, fait une reconstruction d'ouverture.

Quelques méthodes adaptées à la CAAO ont été développées, orientées sur l'ouverture des solutions plutôt que la réduction et l'optimisation. Nous notons la technique de Marks [Marks *et al.*, 1997], qui propose plusieurs solutions précalculées tirées aléatoirement, que le concepteur peut sélectionner et assembler à sa guise, car il considère que les intentions sont trop complexes à modéliser.

Une optimisation est la convergence vers une solution dite « optimale » à l'aide d'une fonction-objectif. Certaines techniques sont dédiées à la recherche d'un minimum local, d'autres plus complexes, à celle du minimum global. Les auteurs qui se limitent à la recherche d'un minimum local se justifient en avançant que si les données de base sont bien choisies, le premier minimum rencontré est généralement une solution valide. Nous remarquons que tous les minima, quels qu'ils soient, constituent autant de pistes d'explorations pour le concepteur. Une technique d'optimisation adaptée à la détection du minimum global et des minima locaux serait un révélateur de solutions potentielles.

3.3.3 Présentation des solutions

Les méthodes basées sur une optimisation d'un système linéaire proposent par nature une seule solution de configuration des sources lumineuses respectant une ambiance donnée, même dans les cas où il existe plusieurs possibilités. Les méthodes de résolution directe subissent là une limitation identique : le calcul

de la solution est effectué jusqu'au bout sans intervention du concepteur. Ces deux types de résolution considèrent que la proposition d'une seule solution par le système satisfera forcément le concepteur puisqu'elle satisfait les contraintes ou intentions initiales.

Les *designs galleries* [Marks *et al.*, 1997] proposent une alternative par une exploration de solutions déjà calculées, et dans le cas de l'éclairage, on peut même composer la solution finale avec un ensemble de choix parmi les propositions. Siret [Siret, 1997] propose des éléments de solutions destinés à être interprétés et non une solution complète.

Deuxième partie

Une méthode d'éclairage inverse pour la conception architecturale

Chapitre 4

Positionnement

Sommaire

4.1 De l'intention à l'ouverture	102
4.1.1 Matérialisation des intentions d'ambiance lumineuse	103
4.1.2 Aide à la conception des ouvertures	107
4.1.3 Application du principe de simulation inverse	111
4.2 Hypothèses	115
4.2.1 Visualisation des intentions d'ambiance lumineuse	116
4.2.2 Simulation inverse de l'éclairage naturel	119
4.3 Conclusion	122

LE PROBLÈME de la simulation inverse de la lumière naturelle est formulé dans le but d'aider à la définition des ouvertures du bâtiment. De nombreuses méthodes permettent d'inverser la simulation de la lumière, certaines étant spécifiquement destinées à prendre en compte l'éclairage naturel dans le projet architectural. Nous constatons qu'aucune méthode ne propose de travailler sur l'éclairage naturel avec une interface graphique, alors que c'est un élément fondamental de la conception architecturale.

Un outil, qui prenne en compte l'éclairage naturel et propose un aspect graphique, sera une aide pour l'architecte qui souhaite mettre en œuvre cette démarche de conception. Nous positionnons ce problème comme une aide à la définition d'une géométrie, par rapport à une intention d'ambiance lumineuse, à travers l'adaptation d'une méthode de simulation inverse de l'éclairage naturel.

Notre démarche est d'apporter une aide à la conception dans une logique de matérialisation de l'intention d'ambiance lumineuse, afin d'aider la traduction d'une intention d'ambiance lumineuse en une description d'éclairage naturel. Cette description graphique de l'éclairage naturel est une distribution de la lumière au niveau spatial et temporel. Cette distribution est définie en premier lieu par l'apport de lumière naturelle. Cet apport est déterminé par les propriétés géométriques et photométriques des ouvertures. Nous axons donc notre recherche sur l'aide à la conception des ouvertures.

Nous proposons une méthode pour maîtriser certains paramètres de l'enveloppe du bâtiment à partir de l'éclairage, avec une approche graphique et dans une logique similaire à la modélisation déclarative [La Greca et Daniel, 2006, Ha et Olivier, 2006a, Ha et Olivier, 2006b]. La nature de l'assistance proposée est une aide à la définition des paramètres géométriques des ouvertures en relation avec la lumière naturelle. Ce problème est posé comme une recherche d'émission de sources anisotropiques dans le cadre de l'éclairage inverse.

4.1 De l'intention à l'ouverture

Notre problématique se situe au niveau de l'intégration de l'éclairage naturel dans une méthode d'aide à la conception par l'intention d'ambiance. L'éclairage naturel est lié à certaines propriétés du bâtiment (volume et matériaux) et de son environnement urbain et naturel (contexte et ciel). L'influence des propriétés de l'environnement sur l'éclairage naturel n'est pas considérée dans les travaux cités précédemment. Néanmoins, cette influence constitue un lien entre l'espace construit et l'environnement, et il nous paraît essentiel d'en tenir compte dans notre méthode.

La conception par l'intention d'ambiance lumineuse tend à définir des propriétés du bâtiment à partir des intentions d'ambiance lumineuse exprimées par l'architecte. Pour qu'une méthode constitue une aide à cette démarche, elle doit faciliter la définition de propriétés du bâtiment à partir des intentions d'ambiance lumineuse. Ces dernières peuvent donc être vues comme un outil de sculpture du bâtiment (Sculpt mode blender [Ble, 2007], DeepPaint3D [Dee, 2007]). La maîtrise des paramètres physiques est un problème inhérent à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse. Hormis le fait que la lumière naturelle est un des nombreux paramètres du projet, elle a des dimensions dynamique, symbolique et fonctionnelle ainsi que des implications aussi bien esthétiques que thermiques. La difficulté est de savoir comment l'architecte peut maîtriser l'éclairage pour respecter ses intentions d'ambiance lumineuse.

Notre démarche est de proposer aux architectes une méthode pour travailler directement sur la description des intentions d'ambiance lumineuse. L'éclairage naturel étant un révélateur de l'architecture [Millet, 1996], les intentions d'ambiance lumineuse permettent de mettre au jour des propriétés géométriques de l'enveloppe. Cette démarche peut être considérée comme une double révélation car c'est à la fois une représentation graphique des intentions d'ambiance

lumineuse, mais aussi la production des formes géométriques à même de produire l'éclairage voulu.

L'étape de traduction des intentions d'ambiance lumineuse est présentée à travers la notion de matérialisation des intentions. Les intentions d'ambiance lumineuse sont concrétisées à travers une représentation graphique de l'éclairage naturel. N'oublions pas que c'est une des représentations possibles des intentions d'ambiance lumineuse. Cette matérialisation s'exprime par un choix des paramètres physiques relatifs à l'éclairage naturel.

Notre objectif étant l'intégration de l'influence de l'environnement dans la conception, il nous paraît approprié d'étudier les éléments qui conditionnent l'apport de lumière naturelle provenant de l'environnement. Nous nous focalisons sur les ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment, principales actrices de l'éclairage naturel. Ces ouvertures sont appréhendées comme un pivot de l'éclairage naturel. Nous pouvons ici reformuler notre problématique : comment définir les propriétés des ouvertures, à partir de l'éclairage naturel et de l'environnement, avec le principe de simulation inverse ? Le problème se focalise donc sur l'aide à la définition des ouvertures, dans un volume donné, à partir de la description d'un éclairage naturel basé sur des intentions d'ambiance lumineuse. En résumé, le concepteur peut aller de l'intention à l'ouverture en passant par l'éclairage naturel.

4.1.1 Matérialisation des intentions d'ambiance lumineuse

Comme nous l'avons vu précédemment dans le contexte (Chapitre 1), l'ambiance architecturale est une notion complexe qui implique de nombreux facteurs (physiques, culturels, psychologiques, etc.). Il est donc difficile, voire impossible, de concevoir une ambiance dans son ensemble. Cependant, l'architecte peut avoir des intentions relatives à une ambiance pour traduire son parti architectural. L'expression d'une intention d'ambiance devient donc la recherche d'un équilibre

sensible [Nussaume, 2000], et c'est précisément le résultat de cette recherche que nous souhaitons formaliser.

En particulier, les intentions d'ambiance lumineuse peuvent être exprimées à travers l'éclairage sous des formes très diverses : dessin, photographie, texte, etc. (Chapitre 3). Le concepteur doit pouvoir s'approprier ces formes pour qu'il puisse réellement exprimer son intention par un moyen qu'il peut maîtriser. Toutefois, ces représentations de l'éclairage sont parfois difficilement exploitables par un modèle de simulation inverse. Cette situation montre que la concrétisation des intentions d'ambiance lumineuse est un problème dans le cadre de la simulation inverse de l'éclairage naturel. Nous sommes donc confrontés au paradoxe provenant de la contradiction entre la précision et la facilité d'une description soulevé par Costa [Costa *et al.*, 1999a].

Nous abordons ce paradoxe avec une approche à la fois graphique et quantitative. Le travail d'expression de l'intention se fait par une description de l'éclairage dans une scène 3D [Schoeneman *et al.*, 1993]. La représentation de cette scène est un élément déterminant car c'est le support des éléments géométriques connus, de l'éclairage, de l'interaction avec l'utilisateur et de la présentation des solutions. La traduction des intentions d'ambiance lumineuse en éclairage se fait par une action sur les paramètres physiques de l'éclairage. Étant donné que cet éclairage est relatif à la lumière naturelle, cette description est aussi l'expression d'un lien entre le bâtiment et l'environnement. Pour bien montrer la dépendance de l'éclairage naturel aux propriétés de l'environnement, ce dernier est intégré dans la scène 3D.

Représentation de l'éclairage

Ainsi que nous l'avons indiqué dans l'état de l'art (Chapitre 3), l'expression des intentions d'ambiance lumineuse peut être associée à une scène tridimension-

nelle destinée à représenter les propriétés géométriques, matérielles et lumineuses du projet. Cette scène est donc le support de l'information.

L'architecte a une capacité de projection dans l'espace, ainsi qu'une connaissance et une expérience des phénomènes physiques d'éclairage. Ces qualités lui permettent d'imaginer une scène suivant le mode de représentation proposé. Un mode de représentation correspond à un mode de perception de l'espace [Moles et Rohmer, 2006]. La « philosophie de la centralité » peut être représentée par une projection perspective. Ce mode de représentation facilite la projection dans l'espace car il correspond au point de vue de l'individu en situation. La « philosophie de l'espace comme étendue » peut s'apparenter à une projection orthogonale de la scène. C'est le point de vue d'observateur extérieur pour lequel l'espace est une configuration géométrique dont les points sont équivalents. Ce mode de représentation demande un véritable effort de projection dans la scène pour comprendre les volumes et leurs possibles interactions avec la lumière. L'architecte conçoit les volumes avec une attitude cartésienne, mais il se projette aussi dans l'espace imaginé comme s'il était en situation.

Néanmoins, la précision de cette projection peut être limitée par les propriétés de la scène étudiée. D'une part, cette scène peut avoir une certaine complexité qui rend difficile sa représentation mentale. Il n'est pas facile de concevoir toutes les interactions entre un volume et la lumière, particulièrement si ce volume est non-standard. D'autre part, cette projection dans l'espace peut être cantonnée aux éléments visibles résultant de l'interaction entre le volume et la lumière : les effets lumineux.

L'objectif de la représentation de l'éclairage est d'aider l'imagination de la scène de manière plus précise, en vue de l'expression de l'intention d'ambiance lumineuse. Nous souhaitons donner des indices explicites sur l'éclairage, par l'affichage de paramètres physiques normalement inaperçus, car noyés dans

notre perception de l'ambiance lumineuse. Le fait que ces paramètres ne soient pas perceptibles les fait appartenir au domaine du raisonnement plutôt que de l'expérience.

Cette représentation de l'éclairage constitue une aide à la compréhension des interactions lumineuses. Ceci peut être particulièrement intéressant lors de l'étude de l'éclairage de bâtiments de référence, pour montrer la structure sous-jacente de l'éclairage et le rôle des éléments de l'enveloppe.

Action du concepteur

L'intention d'ambiance lumineuse doit se traduire en un langage non-ambigu, qui soit non seulement compréhensible par les autres acteurs de la conception, mais surtout utilisable dans un modèle de simulation inverse. Afin d'exprimer les intentions d'ambiance lumineuse, nous proposons de les représenter à travers un paramètre physique : l'éclairage. Le concepteur doit pouvoir agir sur les éléments de l'éclairage pour délimiter des zones, leur donner de l'importance, définir un niveau d'éclairage et créer des relations entre elles. Autrement dit, il peut donner une mesure à la lumière à travers une des représentations possibles d'une intention d'ambiance lumineuse. C'est l'expression, en règles physiques et en mesures objectives, d'un ressenti personnel que l'on souhaiterait percevoir dans le projet. L'une des difficultés est de concilier la subjectivité d'une description avec une nécessaire formalisation de l'éclairage.

Nous avons vu dans l'état de l'art que les architectes privilégient les outils de conception graphiques et l'expression par l'image [Lebahar, 1983]. Le fait d'agir directement sur les paramètres lumineux de la scène étudiée à travers leur représentation graphique permet de nous rapprocher de la démarche des outils de conception graphique. L'action du concepteur peut être vue comme un dessin de l'éclairage avec, comme outils, les paramètres physiques de l'éclairage.

Éclairage naturel

La relation entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment fait intervenir de nombreux phénomènes physiques. L'éclairage naturel participe à cette relation de manière aussi bien physique, par l'apport d'une quantité d'énergie lumineuse et thermique, que symbolique, à travers notre perception des effets lumineux.

Une intention d'ambiance lumineuse relative à l'éclairage naturel est donc une volonté d'établir un lien entre le bâtiment et l'environnement. Ce lien peut être appréhendé par l'affichage explicite des relations entre les éléments intérieurs et extérieurs. La définition de ces relations peut donc constituer un moyen d'expression des intentions d'ambiance lumineuse.

L'intégration de l'éclairage naturel dans ce cadre d'expression implique que l'éclairage décrit soit dépendant de l'environnement. L'éclairage naturel a des aspects dynamiques, géographiques, climatiques et cycliques qu'il est difficile de représenter dans une scène numérique. De plus, les propriétés lumineuses de l'environnement, naturel ou urbain, changent au cours du temps (saisons, constructions, etc.). Notre approche prend en compte toutes les sources d'éclairage naturel, la position du soleil, les conditions climatiques du ciel et les propriétés de l'environnement urbain. La possibilité est offerte au concepteur de spécifier ses intentions au niveau spatial et temporel.

4.1.2 Aide à la conception des ouvertures

Nous avons expliqué par quels moyens le concepteur peut exprimer une intention d'ambiance lumineuse, nous expliquons maintenant le choix de l'élément du bâtiment sur lequel porte l'aide à la conception.

La géométrie de l'espace conditionne toutes les composantes de l'éclairage intérieur. Lors de la conception architecturale, cette géométrie est déterminée

par beaucoup de paramètres, ce qui rend difficile la proposition d'une aide à la définition des volumes uniquement basée sur des intentions d'ambiance lumineuse.

Les matériaux n'influencent que les interréflexions, et s'ils ont un rôle décisif quant à l'éclairage final, ils sont dépendants de l'éclairage naturel fourni par les ouvertures.

L'apport de lumière naturelle est défini principalement par les propriétés des ouvertures (orientation, position, dimensions). Ces propriétés influencent la composante directe et la composante indirecte extérieure, qui dépendent toutes deux des sources de lumière naturelle. Les ouvertures sont donc inhérentes au problème de réalisation d'un éclairage relatif à la lumière naturelle. Le choix de l'ouverture se justifie par son double rôle, à la fois dans la conception, comme filtre-connecteur, et dans l'éclairage naturel, comme pivot du phénomène physique.

Filtre-connecteur

L'ouverture participe à la relation entre le bâtiment et l'environnement. Cet élément joue un rôle fondamental lors de la conception architecturale en tant que vecteur d'expression du parti architectural. L'ouverture, au sein de l'enveloppe, a un rôle de filtre-connecteur selon Christian Norberg-Schulz [Norberg-Schulz, 1997]. Simultanément, elle crée une liaison avec l'extérieur, et façonne cette liaison par l'influence qu'elle peut avoir sur notre perception de l'environnement extérieur. Au cours de la conception, la définition d'une ouverture est la définition de ces deux éléments : liaison et transformation. Cette idée de filtre-connecteur est illustrée par une œuvre de James Carpenter, *Periscope window*, dans laquelle des lentilles convexes, disposées derrière une

surface opaque, reçoivent la lumière naturelle de l'environnement et jouent avec notre perception de cette lumière (fig. 4.1) [Marpillero, 2006].

Avec une approche plus « matérielle », l'ouverture peut être considérée comme un élément central de la conception, car elle est partie prenante de l'enveloppe. Elle est reliée aux façades qui définissent la perception du bâtiment depuis l'extérieur, à la visibilité qui conditionne la communication sociale, et aux ambiances lumineuse et thermique qui influencent notre perception intérieure du bâtiment. L'ouverture a une action sur plusieurs phénomènes physiques qui traduisent certaines interactions entre l'objet architectural et son milieu : éclairage, thermique, visibilité, circulation et autres. Dans notre approche, l'éclairage naturel est choisi parmi les autres phénomènes physiques pour définir les propriétés des ouvertures.

Pivot de l'éclairage naturel

L'ouverture joue un rôle décisif dans le phénomène physique de l'éclairage naturel. L'éclairage naturel peut être considéré comme un système dont le point d'équilibre est déterminé par l'enveloppe. Si les effets lumineux à l'intérieur sont vus comme des images des conditions extérieures filtrées par le bâtiment, on peut considérer trois éléments : la source d'éclairage, le filtre (bâtiment) et l'éclairage engendré. Le seul élément statique est le filtre, il agit comme un point fixe entre les deux autres, sorte de moyeu de l'articulation du phénomène lumineux. L'ouverture est au centre de notre modèle, et nous analysons la relation qu'elle peut avoir aux autres éléments de la scène. Cet élément, constituant de l'enveloppe, est l'interface entre l'intérieur et l'extérieur. L'aide à la conception des ouvertures devient une aide à la définition du pivot de l'éclairage.

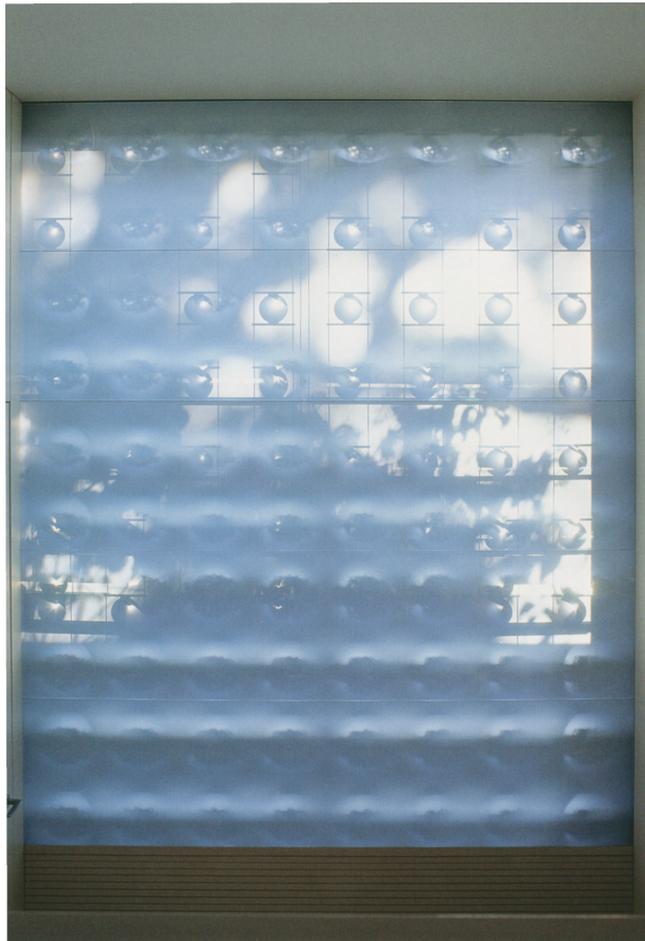


FIG. 4.1 – *Periscope window* [Marpillero, 2006] de James Carpenter (1995) à Minneapolis, États-Unis (Minnesota).

Propriétés des ouvertures et leur influence

Plus concrètement, l'aide à la conception porte sur des éléments mesurables et visibles de l'enveloppe : les propriétés des ouvertures. Une aide à la définition des ouvertures est donc une aide à la définition de la géométrie de l'ouverture : position, taille et forme. Un problème de faible luminosité se traduira par l'agrandissement des ouvertures, augmentation maximale du contact avec l'environnement. L'expression du parti architectural se fera à travers la forme de l'ouverture et les subtilités de l'ambiance lumineuse. Cependant, l'aide à la définition des ouvertures peut aussi porter sur les propriétés relatives à la transformation de la lumière qui influencent l'intensité, la direction, et dépendent des dispositifs de régulation de l'éclairage (brise soleil, étagère à lumière, persiennes, etc.) et de la qualité du verre. Nous nous préoccupons tout d'abord des propriétés géométriques, qui établissent une connexion avec l'environnement, mais sans négliger les autres propriétés de l'ouverture, qui peuvent générer des transformations.

4.1.3 Application du principe de simulation inverse

Nous avons choisi notre objet d'étude, les ouvertures, et nous présentons ici l'application du principe de simulation inverse dans la conception architecturale. Nous pouvons imaginer enrichir les outils d'aide à l'esquisse par l'intégration de la simulation inverse de l'éclairage naturel, pour passer d'une description de l'éclairage naturel aux propriétés des ouvertures. Le concepteur pourra ainsi comprendre l'impact de ses intentions d'ambiance sur la forme architecturale.

L'aide à la conception se situe au niveau de la formalisation des intentions en contraintes lumineuses, puis de l'évaluation de l'adéquation entre ces contraintes et la géométrie. L'association d'une intention d'ambiance lumineuse à une

géométrie est vue comme une relation entre l'environnement et l'éclairage naturel, qui génère un potentiel d'ouverture dans cette géométrie. La simulation inverse de l'éclairage naturel serait un moyen de montrer ce potentiel d'ouverture de la géométrie.

Nous proposons une méthode pour maîtriser certains paramètres géométriques du bâtiment à partir de l'éclairage naturel. L'idée d'approximation qui existe lors de la conception est conservée dans cette méthode pour explorer des solutions potentielles. L'intégration de la notion de simulation inverse dans l'esquisse architecturale soulève la question de l'approche du problème de simulation inverse. Dans notre approche, l'ouverture est elle-même considérée comme une source de lumière naturelle, et la simulation inverse comme une recherche d'émittance des sources de lumière.

Approximation

Les travaux précédents négligent la notion d'incertitude dans la conception. Cette notion est très présente dans la conception architecturale, qui est un cheminement orienté par des intentions. Certaines techniques de simulation de la lumière sont pourtant adaptées à l'évolution de la précision des calculs. La radio-sité hiérarchique [Hanrahan *et al.*, 1991] est utilisée par Yu [Yu *et al.*, 1999] pour retrouver les réflectances des surfaces, mais ce dernier l'exploite principalement pour son efficacité et non pour son caractère progressif.

Une méthode intégrant la notion d'approximation permettrait de suivre naturellement la maturation du projet. Nous proposons de faire le calcul de certaines propriétés géométriques de l'ouverture sans pour autant aboutir forcément à une solution géométrique. Cette démarche constitue une aide à la conception qui donne une orientation pour progresser dans le raisonnement, et non une aide au dessin.

L'ouverture comme source intermédiaire de lumière naturelle

La simulation inverse de l'éclairage peut être exprimée par les interrogations suivantes : d'où vient la lumière et en quelle quantité ? Étant donné que l'éclairage vient d'une source de lumière naturelle, la question est de savoir si l'on voit ou non cette source de lumière naturelle. C'est un problème de visibilité des sources de lumière naturelle. Cette visibilité est déterminée par les propriétés géométriques des ouvertures. Le problème de simulation inverse de l'éclairage naturel serait donc un problème de géométrie inverse. Or, la recherche de ces propriétés géométriques est complexe car les combinaisons de formes, de tailles et de positions des ouvertures sont très nombreuses. C'est pourquoi la question de la visibilité est généralement négligée dans les problèmes de géométrie inverse.

En revanche, cette question de visibilité est prise en compte dans les problèmes d'éclairage inverse. Si l'on considère l'ouverture comme une source intermédiaire de lumière, alors la recherche de la géométrie de l'enveloppe peut être vue comme un problème d'éclairage inverse. La difficulté posée par cette approche est liée aux propriétés des sources de lumière naturelle, qui sont étendues et de nature hétérogène (proche ou distante). Cela donne aux ouvertures, en tant que sources intermédiaires de lumière, un caractère anisotropique qui doit être pris en compte pour conserver toutes les nuances de l'éclairage naturel.

Si l'on considère ce problème comme un positionnement de sources intermédiaires de lumière naturelle, la position influence aussi les propriétés d'émission de ces sources. En effet, le déplacement d'une ouverture sur une surface change la visibilité des sources de lumière naturelle.

En considérant le problème d'émission des sources intermédiaires, la position, la taille et la forme de l'ouverture sont fixées. Nous pouvons considérer une ouverture comme une composition de sources unitaires. La propriété d'émission des sources intermédiaires est liée à la propriété de transparence de

l'ouverture. Cette propriété de transparence est liée aux matériaux qui composent l'enveloppe du bâtiment : opaque pour les murs et transparent pour les ouvertures. Les propriétés géométriques de l'ouverture dépendent directement de la frontière entre les éléments opaques et transparents. Le problème de simulation inverse de l'éclairage naturel peut donc s'exprimer sous la forme d'un problème d'éclairage inverse, et plus précisément de recherche d'émittance de sources anisotropiques.

4.2 Hypothèses

La démarche précédente est concrétisée par la proposition de deux hypothèses, qui permettent de mettre en œuvre les principes de la conception par l'intention d'ambiance lumineuse à travers la simulation inverse de l'éclairage naturel.

La première hypothèse concerne les moyens d'expression des intentions d'ambiance lumineuse. La visualisation de la lumière elle-même facilite l'expression des intentions. En effet, cette visualisation vient s'ajouter à la représentation de la scène pour comprendre la relation entre la lumière et l'espace, et les conditions d'émergence d'une ambiance lumineuse. Une intention d'ambiance lumineuse peut alors être exprimée non seulement par une répartition lumineuse spatiale et temporelle de l'éclairage naturel, mais aussi par des descripteurs de contraste ou de direction. Le moyen d'expression de l'intention est basé sur une interface graphique et l'action sur les paramètres visibles.

La deuxième hypothèse considère l'ouverture comme une source de lumière et propose un modèle d'éclairage inverse pour rechercher l'émittance de sources anisotropiques. En comparant la lumière apportée par les ouvertures potentielles avec la description de l'intention d'ambiance lumineuse, nous pouvons dégager des indications sur les propriétés géométriques et photométriques des ouvertures. C'est une formalisation de la relation entre la lumière et l'espace par la simulation inverse de l'éclairage naturel. Ce modèle constitue une aide à la conception par l'intention d'ambiance lumineuse car elle ne donne pas une solution définitive, mais une solution qui doit être interprétée par le concepteur. L'interprétation de la solution permet de créer des ouvertures qui génèrent un éclairage proche de la description lumineuse.

4.2.1 Visualisation des intentions d’ambiance lumineuse

La première étape de l’aide à la conception est la mise en place d’un cadre d’expression des intentions d’ambiance lumineuse. Ce cadre permet de traduire les intentions en une description graphique de la lumière naturelle. Cette visualisation des intentions d’ambiance lumineuse propose une représentation des propriétés non perçues de l’éclairage naturel. Ces propriétés donnent des informations supplémentaires par rapport à la perception visuelle. Le problème qui se pose est de déterminer les attributs de l’éclairage naturel appropriés pour faire une description quantifiée de l’éclairage naturel. L’observation de l’éclairage naturel *in situ* permet de constater les propriétés de l’éclairage qui sont perceptibles. L’étude du phénomène physique de l’éclairage naturel permet ensuite de déduire les propriétés « inaperçues » lors de l’observation.

Observation de l’éclairage naturel

L’observation d’une scène architecturale nous donne une information globale sur la relation qui lie la lumière à l’espace architectural. La distinction des éléments de l’éclairage naturel permet d’avoir une meilleure compréhension du phénomène global. L’éclairage naturel peut être décomposé selon ses composantes : composante directe, composante indirecte extérieure et composante indirecte intérieure. Néanmoins, il est difficile de voir les superpositions de couches lumineuses de ces différentes composantes. L’éclairage est perçu principalement par sa répartition spatiale et temporelle. La perception de l’éclairage et le raisonnement sur l’éclairage n’apportent donc pas les mêmes informations. Ceci s’explique par le fait que la perception englobe l’ensemble des paramètres lumineux, alors que le raisonnement analyse un ou plusieurs éléments de l’éclairage sans se soucier des autres.

L’affichage des composantes de la lumière donne donc un point de vue

différent sur un phénomène physique. En particulier, les apports de lumière naturelle du ciel et de l'environnement, que nous cherchons à intégrer dans le modèle de simulation inverse, sont représentés par la composante directe et la composante indirecte extérieure, respectivement. La somme de ces deux composantes, la lumière incidente, ne fait pas partie de la perception de l'éclairage : c'est l'éclairement d'une surface. Elle constitue donc un élément purement objectif que l'on peut appréhender sans ambiguïté. Cette lumière incidente constitue une base commune d'expression qui est strictement identique pour tous les acteurs du projet, car il n'y a aucun effet lumineux.

Par ailleurs, cette lumière incidente représente la lumière reçue par une surface intérieure de l'objet architectural. Elle n'est donc pas relative à un point de vue et permet d'avoir une vision globale de l'éclairage, et de tous les éclairages perceptibles, en tout point de vue et à tout moment. Un éclairage perceptible est composé de la lumière incidente et de la composante indirecte intérieure : les interrélaxions. Ces dernières peuvent être imaginées par le concepteur, selon les propriétés de réflexion que l'on peut attribuer aux matériaux.

Représentation de la lumière incidente

Le problème de représentation aboutit à la visualisation de la lumière incidente, et non de la matière qui révèle la lumière *in situ*. Cette visualisation permet de maîtriser la distribution de la lumière directement lors de la phase de conception.

Le premier élément concerne le support de l'expression sur lequel l'éclairage vient se poser. Ce support est la scène 3D dans laquelle l'information géométrique est réduite à sa plus simple expression pour mettre en évidence l'information lumineuse.

La visualisation des informations lumineuses est facilitée par l'utilisation

d'un rendu photométrique pour représenter l'éclairage. Ce type de rendu permet de présenter des informations habituellement invisibles dans un rendu réaliste, sans qu'il y ait de confusion avec les effets lumineux. La lumière incidente sur les surfaces est décrite par une répartition spatiale non-homogène. Dans la représentation, il est aussi possible de supprimer complètement l'information géométrique et les matériaux pour ne voir que l'information lumineuse. Il peut être intéressant de représenter ou de spécifier la lumière reçue par un plan virtuel dans l'espace étudié.

Les informations sur la direction incidente d'éclairement sont généralement absentes des outils de conception. Ce n'est pas un paramètre visible contrairement à la couleur ou la luminance, et donc difficilement descriptible dans une intention d'ambiance. Néanmoins, le fait de montrer uniquement les rayons se dirigeant ou provenant d'un point peut donner une information utile pour comprendre l'éclairage naturel. La direction de l'éclairage peut aussi être considérée de manière absolue. Dans le même esprit qu'une source directionnelle, il serait possible de spécifier une intention de direction générale de provenance de la lumière.

La notion de contraste est proche de la perception, et ce, même si l'on considère seulement la lumière incidente et non la lumière perçue. Étant donné que nous utilisons la lumière incidente, Le contraste est la seule valeur qui exprime une relation entre les éléments intérieurs de l'espace, et non une relation intérieur-extérieur.

L'accumulation de tous ces paramètres de description nous amène à évoquer la notion de cohérence de l'intention qui représente la faisabilité de l'intention indépendamment des conditions extérieures. La vérification de cette cohérence entre les paramètres de description permet de détecter si l'intention est possible, avant d'effectuer la simulation inverse de l'éclairage.

4.2.2 Simulation inverse de l'éclairage naturel

La deuxième hypothèse répond au problème de traitement des intentions. Ce traitement part d'une description de l'éclairage naturel pour calculer la géométrie de l'ouverture. Notre modèle prend en compte les éléments caractéristiques de l'éclairage naturel :

- l'aspect diffus de la lumière du ciel,
- l'aspect temporel de la lumière diurne et annuelle,
- l'aspect géographique et climatique,
- l'impact de l'environnement proche et distant.

Un modèle de simulation de la lumière centré sur l'ouverture met en relation les sources de lumière naturelle et les intentions d'ambiance lumineuse. Nous comparons l'apport de lumière des ouvertures potentielles à l'éclairage souhaité, pour évaluer les propriétés des ouvertures. Le format des solutions proposées est interprétable, car elles indiquent les positions des ouvertures pouvant reproduire l'éclairage souhaité.

Influence du ciel et de l'environnement

Un des apports majeurs de ce travail est la prise en compte des sources de l'éclairage naturel, le ciel et l'environnement, dans un modèle de simulation inverse. Les deux éléments qui composent le ciel, le soleil et la voûte du ciel, produisent des éclairages très différents, à savoir l'ensoleillement et l'éclairage diffus, respectivement. La question de la simulation inverse de l'ensoleillement est traitée par Siret [Siret, 1997]. Nous considérons donc les difficultés posées par l'éclairage diffus et prenons comme source la voûte céleste. C'est une source étendue contenue dans le demi-hémisphère supérieur. Sa nature (couleur, intensité, homogénéité) est variable selon le climat, aux niveaux spatial et temporel.

L'environnement, proche ou distant, est vu comme une source secondaire, dépendante de la source principale. La connaissance de cette source est liée aux infrastructures de données géographiques qui permettent de connaître l'environnement d'un projet architectural.

La simulation de la lumière incidente donne l'éclairage du ciel et de l'environnement : composante directe et composante indirecte extérieure. La composante indirecte extérieure est le grand absent de la simulation inverse de l'éclairage naturel dans les travaux précédents.

Un modèle d'éclairage inverse

Une méthode de simulation inverse est adaptée pour pouvoir traiter la description de l'éclairage. Ce modèle de simulation de la lumière est centré sur l'ouverture, et permet de prendre en compte les sources de lumière naturelle. Nous posons ce problème comme une recherche de l'émittance de sources anisotropiques. Une ouverture est composée d'un ensemble d'éléments d'ouverture, qui sont autant de sources unitaires de lumière naturelle. Ces sources anisotropiques sont créées sur la base d'un modèle sténopé. L'apport lumineux de chaque élément d'ouverture est comme une couche de lumière qui vient se poser sur les faces intérieures (fig. 4.2). La somme des apports lumineux de tous les éléments d'ouverture constitue l'apport lumineux global de l'ouverture.

La résolution du problème se fait par la recherche d'émittance de ces éléments d'ouverture pour positionner et dimensionner l'ouverture. Nous serons ainsi en mesure de révéler le potentiel d'ouverture de la face.

Des solutions interprétables

Le modèle précédent produit une évaluation des faces d'ouverture en vue de la réalisation des intentions d'ambiance lumineuse. C'est un calcul volontairement

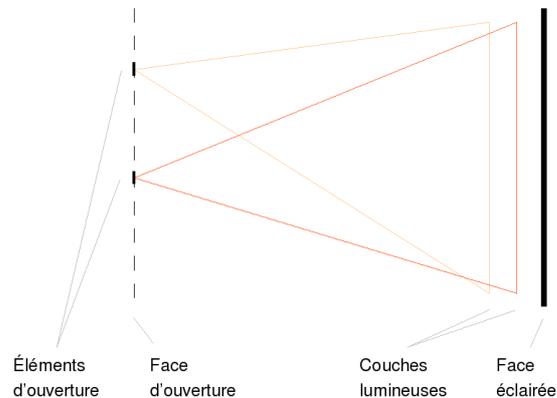


FIG. 4.2 – L’apport des éléments d’ouverture sur les face intérieures.

approximatif qui dégage les principales propriétés de l’ouverture. Nous déterminons la transparence de chaque élément d’ouverture afin de savoir s’il appartient à l’ouverture (transparent) ou non (opaque). Cette méthode est adaptable à d’autres propriétés de l’ouverture, comme les propriétés photométriques, si l’on considère plusieurs niveaux de transparence.

L’affichage des solutions se fait dans la scène 3D, support de la géométrie et de l’éclairage. Ces solutions représentent l’influence de la description des intentions d’ambiance lumineuse sur le projet architectural. Nous pouvons donc répondre à la question : Quel est l’impact de l’intention d’ambiance sur le projet architectural ? Et réciproquement : Quels sont les éléments d’ouverture qui ont le plus d’impact sur l’ambiance lumineuse ? Ces solutions sont vues comme une extension de l’intention d’ambiance lumineuse par le modèle de simulation inverse, qui indique les relations entre ces éléments. Ces solutions brutes laissent une porte ouverte pour l’imaginaire du concepteur. Cela demande une participation active du concepteur à la démarche de simulation inverse. Les réponses définitives à apporter et les éléments à modifier restent à la discrétion de l’architecte.

4.3 Conclusion

Ce chapitre précise notre positionnement sur le problème de simulation inverse. Notre démarche, pour aller de l'intention d'ambiance lumineuse aux propriétés géométriques et photométriques des ouvertures, est supportée par deux hypothèses. La première est la matérialisation des intentions d'ambiance lumineuse par une représentation de l'éclairage naturel. La deuxième concerne le dégagement du potentiel d'adéquation entre les faces d'ouverture et l'éclairage précédemment décrit, par un modèle de recherche d'émittance des sources lumineuses. Ces hypothèses sont la base théorique d'un environnement d'aide à la conception qui est présenté au chapitre suivant.

Chapitre 5

Réalisation

Sommaire

5.1	Expression des intentions	127
5.1.1	Paramètres de description	128
5.1.2	Interface graphique	131
5.1.3	Descripteurs	134
5.1.4	Conclusion	138
5.2	Traitement des intentions	139
5.2.1	Génération des sources anisotropiques	141
5.2.2	Évaluation des sources	156
5.2.3	Sélection des sources	162

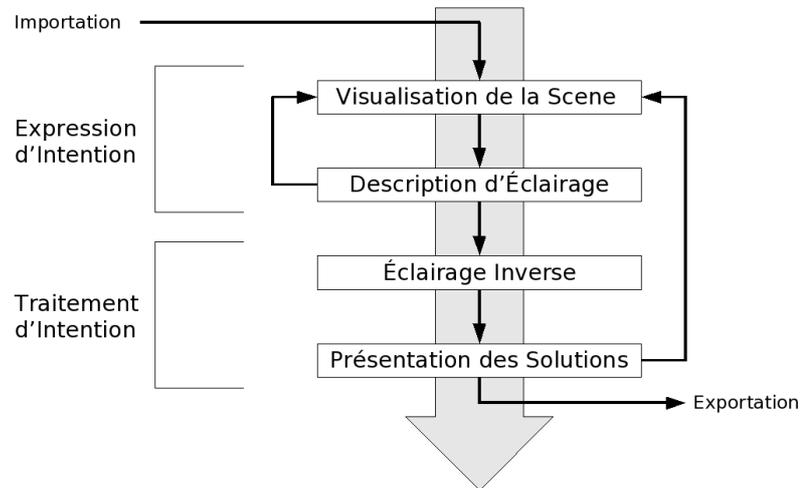


FIG. 5.1 – Étapes de l'environnement de conception.

L'INTERACTION entre la lumière naturelle et le bâtiment génère l'éclairage naturel, support physique de l'ambiance lumineuse. Le problème posé, lors de la conception par l'intention d'ambiance, est de trouver la configuration spatiale qui puisse créer l'éclairage souhaité. Dans ce contexte, nous proposons une méthode d'aide à la conception permettant de maîtriser certains éléments de l'enveloppe du bâtiment à partir de l'éclairage naturel. Cette méthode, destinée à aider la définition des ouvertures, est basée sur deux hypothèses : la notion de matérialisation des intentions d'ambiance lumineuse à travers une interface graphique, et la simulation inverse de l'éclairage naturel vue comme un problème d'émittance.

Les hypothèses précédentes sont en partie concrétisées, à travers la réalisation d'un environnement de conception (fig. 5.1). Cet environnement peut être utilisé lorsque les intentions d'ambiance lumineuse et le volume de travail sont connus. Nous traitons la « lumière directe » qui vient de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui comprend la lumière du ciel et les réflexions provenant de l'environnement extérieur.

Cet environnement de conception contient une interface homme-machine pour exprimer des intentions d'ambiance lumineuse, et un modèle d'éclairage inverse pour traiter les descriptions lumineuses. La première étape dans ce processus est d'obtenir une description de l'éclairage représentant une intention d'ambiance lumineuse. Les moyens de description de l'éclairage ont une grande influence sur l'expression des intentions d'ambiance et sur les données d'entrée du modèle d'éclairage inverse. C'est pourquoi cette étape est un maillon essentiel de l'environnement de conception.

La deuxième étape, la simulation inverse de l'éclairage, permet de calculer les propriétés géométriques de l'espace à partir des propriétés lumineuses. Ce problème est posé comme une recherche d'émission de sources anisotropiques. Cette approche est basée sur un modèle sténopé et une métrique d'image pour calculer des ouvertures. La stratégie de recherche de solutions est une propagation depuis le minimum global pour obtenir une solution de référence, ou depuis des minimums locaux pour élargir l'éventail de solutions.

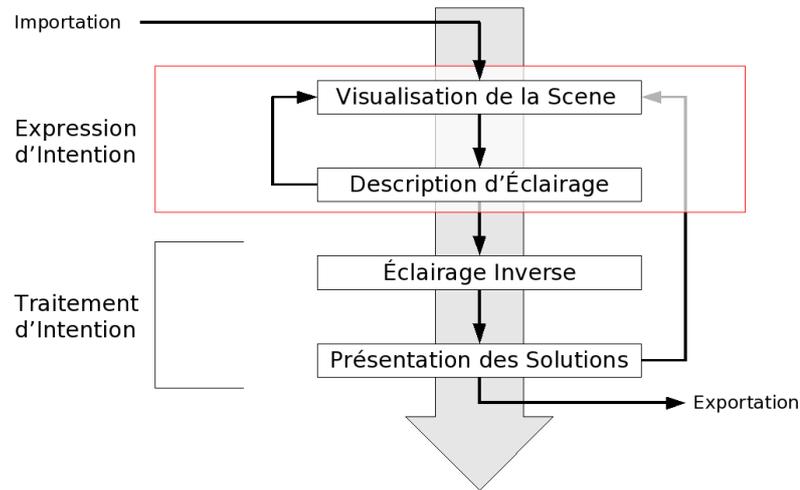


FIG. 5.2 – Expression des intentions.

5.1 Expression des intentions

L'idée de traduction des intentions d'ambiance lumineuse est concrétisée par une méthode de description de l'éclairage naturel. L'objectif de cette traduction est de conserver l'intention dans la description de l'éclairage, autrement dit, de donner une forme à l'intention d'ambiance lumineuse (fig. 5.2).

Cette description s'appuie sur un ensemble de paramètres quantifiables. L'éclairage naturel est décrit dans un volume donné, avec une distribution de lumière hétérogène, une direction principale de provenance de l'éclairage naturel et des indications de contraste entre les faces intérieures.

Ces éléments sont représentés directement dans la scène 3d sur des plans concrets (sol, murs, plafond, etc.) ou des plans virtuels à l'intérieur du volume (plan de travail ou vitrine d'exposition). Un mode d'expression hybride combine des éléments définis et une expression libre pour la répartition de l'éclairage. Les objets graphiques de description sont transformés en descripteurs de l'éclairage naturel en vue de leur utilisation dans le modèle de simulation inverse.

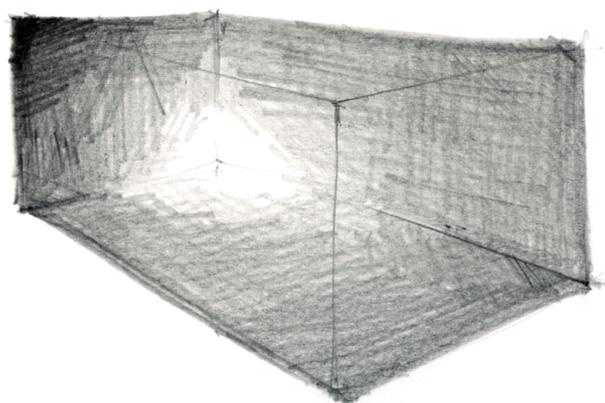


FIG. 5.3 – Croquis sur la répartition de lumière.

5.1.1 Paramètres de description

Notre méthode considère la lumière naturelle entrant dans l'espace conçu, depuis le ciel, considéré comme principale source de lumière, et les réflexions de l'environnement extérieur comme des sources secondaires. Les paramètres de description représentent les relations définies dans le volume entre l'éclairage et la lumière naturelle, ou entre les zones d'éclairage. Ces paramètres ne sont pas perçus, mais ils traduisent des propriétés de l'éclairage que l'architecte peut utiliser pour exprimer ses intentions d'ambiance lumineuse.

Éclairement

Une intention d'ambiance lumineuse relative à la « forme » de la lumière peut s'exprimer à travers une répartition spatiale de la lumière incidente (fig 5.3). Cette distribution lumineuse est représentée par l'éclairement, une quantité lumineuse absolue en lux reçue par les surfaces intérieures, concrètes ou virtuelles. Cet éclairement est décrit par une distribution hétérogène de valeurs d'éclairement.

Les intentions d'ombres ou de lumière sont spécifiées en indiquant si ces valeurs d'éclairement sont, respectivement, maximales ou minimales.

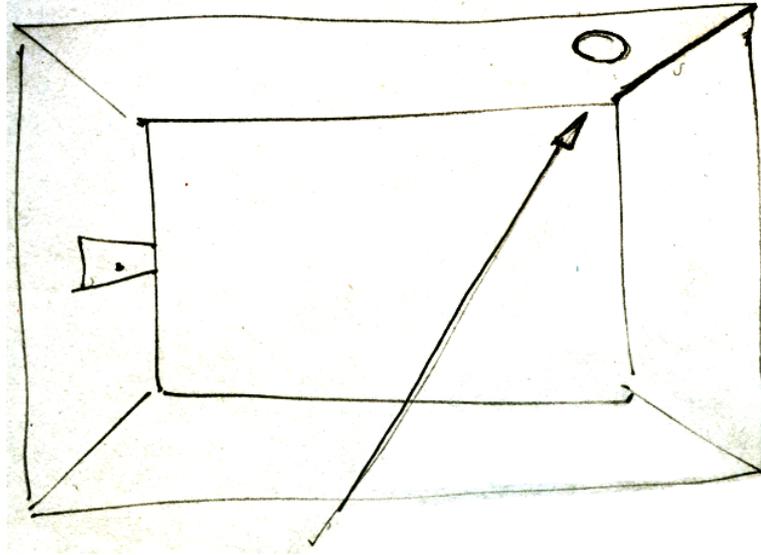


FIG. 5.4 – Croquis sur la direction d'éclairement.

Direction d'éclairement

Une intention peut être relative à l'orientation des rayons lumineux de la lumière incidente (fig. 5.4). Cette orientation est une propriété globale de l'éclairage qui représente la direction privilégiée de provenance de la lumière naturelle. La direction d'éclairement est un lien entre les surfaces éclairées, les propriétés des ouvertures et les sources de lumière extérieures.

Contraste

Une intention relative à la répartition globale de la lumière dans un espace peut être représentée par notre notion de contraste. Nous définissons le contraste comme une relation entre les surfaces intérieures. C'est une valeur relative contrairement au paramètre d'éclairement qui est une valeur absolue. Cette propriété de l'éclairage est le rapport entre les moyennes d'éclairement de deux surfaces. Cette relation crée des dépendances entre l'éclairage de plusieurs surfaces.

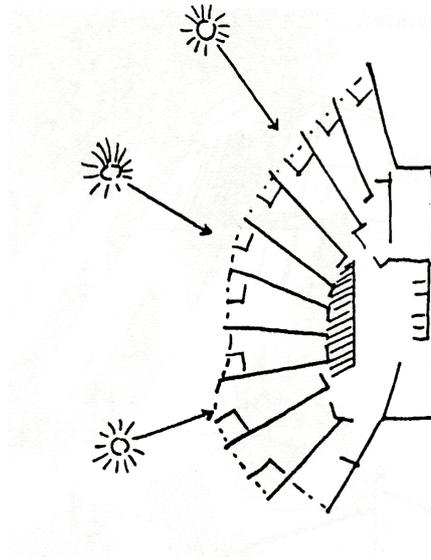


FIG. 5.5 – Étude d'éclairage d'Alvar Aalto.

Une surface peut très bien porter une valeur de contraste sans avoir de valeur d'éclairément, et inversement. Ce sont deux manières différentes de spécifier une répartition d'éclairément dans le volume : la valeur d'éclairément est une répartition spatiale détaillée sur une face, alors que le contraste, valeur relative, est une relation entre les faces.

Dimension temporelle

La prise en compte du temps facilite l'utilisation de la transformation de l'ambiance lumineuse dans le bâtiment comme mesure du temps (fig. 5.5). En effet, l'éclairage vient marquer l'échelle temporelle (heure ou date) par des symboles spatiaux (jeu d'éclairage direct et de réflexions), et constitue une liaison entre les dimensions spatiale et temporelle. Le caractère ponctuel, périodique ou répétitif des intentions est représenté par l'association des valeurs d'éclairément à une période temporelle (journée ou année).

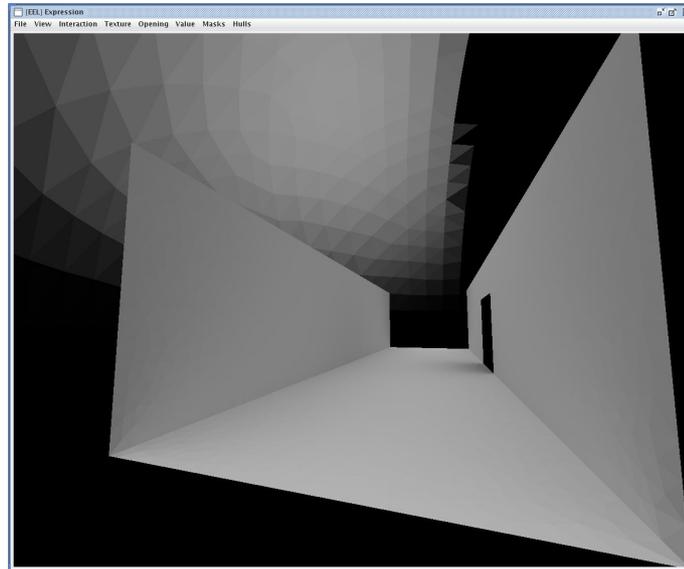


FIG. 5.6 – Aperçu de l'interface graphique.

5.1.2 Interface graphique

Les paramètres de description sont représentés dans une scène 3d (fig. 5.6). Certains de ces paramètres, comme les valeurs d'éclairément, sont situés, pour visualiser les relations entre les surfaces. En revanche, la direction, qui est un paramètre global, n'est pas située. L'action directe sur ces paramètres visibles constitue le mode d'expression de l'interface.

Type d'interface

La lumière et la forme sont perçues simultanément, et une interface graphique permet de les représenter et surtout de les distinguer. La lumière directe n'est pas appréhendée facilement avec un rendu réaliste parce que, d'une part elle n'est pas perçue directement, et d'autre part, il est difficile de faire abstraction des réflexions. Un rendu photométrique est donc utilisé pour apporter une représentation plus lisible et éviter les confusions avec les effets lumineux

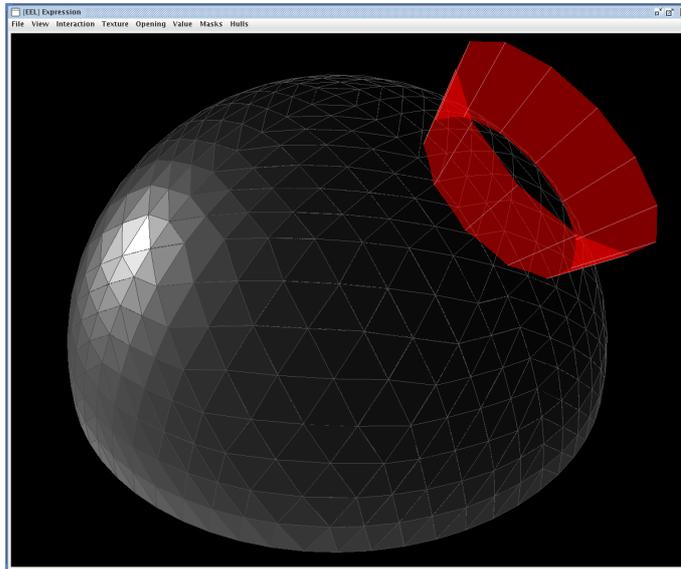


FIG. 5.7 – Représentation de la direction globale d'éclaircement.

[Ware, 2004]. L'éclairage naturel n'est pas représenté tel qu'il est perçu, mais justement par des paramètres non perçus qui permettent de comprendre les relations entre la lumière naturelle et l'espace.

Une direction d'éclaircement est représentée par un vecteur principal de direction, un angle solide et une valeur d'éclaircement (fig. 5.7). La forme de l'angle solide peut être un cône, pour donner une indication générale, ou un ensemble de directions qui délimitent une forme. Cette forme est centrée sur le vecteur principal de direction qui indique la position d'une source lumineuse extérieure par rapport à la scène. L'orientation et la longueur de ces vecteurs indiquent la direction et l'importance de la direction dans l'éclairage, respectivement. La corrélation de cet indicateur avec le volume étudié, révèle la correspondance entre les caractéristiques des ouvertures et la répartition lumineuse.

Pour la variation temporelle, nous sommes face à un problème de représentation des différents ensembles de valeurs sur une même géométrie. Cette variation

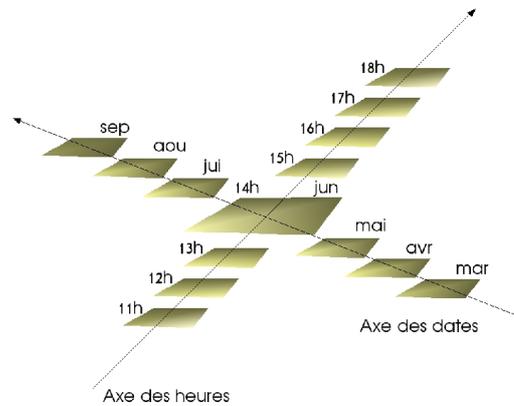


FIG. 5.8 – Principe de représentation de la matrice temporelle.

contient deux dimensions, la date et l'heure, ce qui associe à chaque élément de travail une matrice pour chaque paramètre étudié. A partir d'une représentation à une date et une heure données, nous proposons d'afficher les palettes de valeurs correspondant soit à la variation de l'heure, soit à la variation de la date. Nous évitons ainsi d'afficher la matrice complète tout en proposant des indices de la variation temporelle (fig. 5.8).

Mode d'expression

Nous retenons l'idée de dessiner les intentions d'ambiance lumineuse dans la scène virtuelle afin de donner une forme à la lumière [Schoeneman *et al.*, 1993]. L'action sur les paramètres affichés est le vecteur d'expression de l'intention d'ambiance lumineuse. Ces paramètres, imperceptibles dans la réalité, permettent de représenter la structure de l'éclairage.

L'éclairage peut être représenté par une texture (photographie ou dessin), à chaque pas de temps, pour décrire l'éclairement ou le contraste de la surface (fig. 5.9). Cette surface n'est pas forcément une limite du volume, elle peut être arbitrairement choisie dans le volume. La direction est spécifiée dans un hémisphère correspondant au ciel. Le contraste est défini par un curseur entre

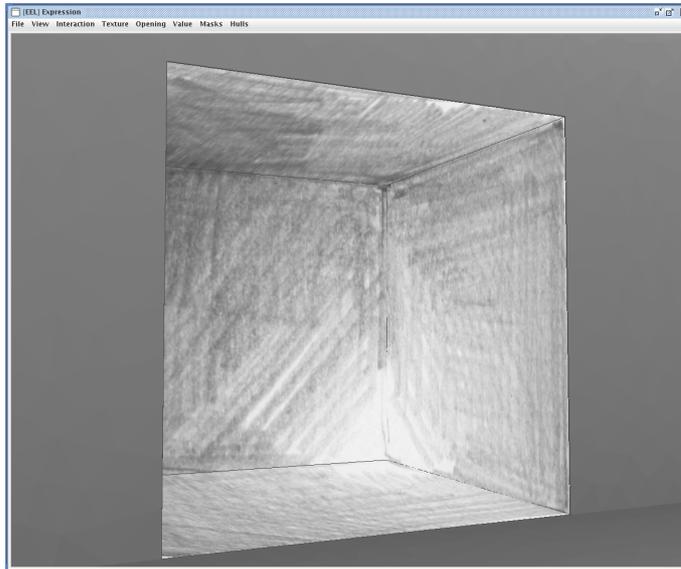


FIG. 5.9 – Dessin de l'éclairage intégré dans la scène.

les faces qui indique la valeur relative de l'une par rapport à l'autre. Ce lien symbolique dû à la perception est concrétisé par un lien visible [Ware, 2004]. L'architecte peut modéliser ces indicateurs et introduire des critères subjectifs traduisant les qualités d'une ambiance lumineuse.

5.1.3 Descripteurs

Les descripteurs établissent des correspondances entre les éléments de l'interface et les paramètres de l'éclairage. L'objectif est la traduction des intentions d'ambiance lumineuse avec des valeurs, des directions et des durées. Une zone peut se décrire en termes de quantités lumineuses absolues (éclairage, durée) ou relatives (contraste). Il est possible d'établir un intervalle d'éclairage d'une zone en mettant en relation les propriétés des ouvertures avec les propriétés de l'éclairage direct. Ensuite, il est possible d'établir un intervalle de contraste en

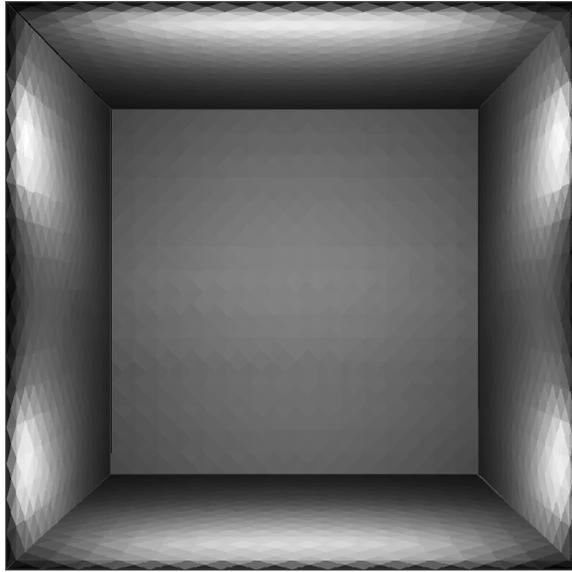


FIG. 5.10 – Représentation photométrique de l'éclairage.

mettant en relation les intervalles d'éclairage. Ce problème peut être vu comme un problème de satisfaction de contraintes ou d'optimisation.

Contrainte d'éclairage

Une contrainte d'éclairage contient un descripteur de valeur d'éclairage (minimale ou maximale) (fig. 5.10) et un descripteur de temps.

Par exemple, la spécification d'une lumière d'ambiance pour la lecture, le matin, peut correspondre à :

- valeur minimale uniforme de 300 lux (Norme AFNOR, lecture dans une bibliothèque)
- période : entre 9h et 12h

Contrainte de contraste

Une contrainte de contraste contient un descripteur de relations entre les zones (fig. 5.11). La ligne en pointillés symbolise la relation entre les deux surfaces et le

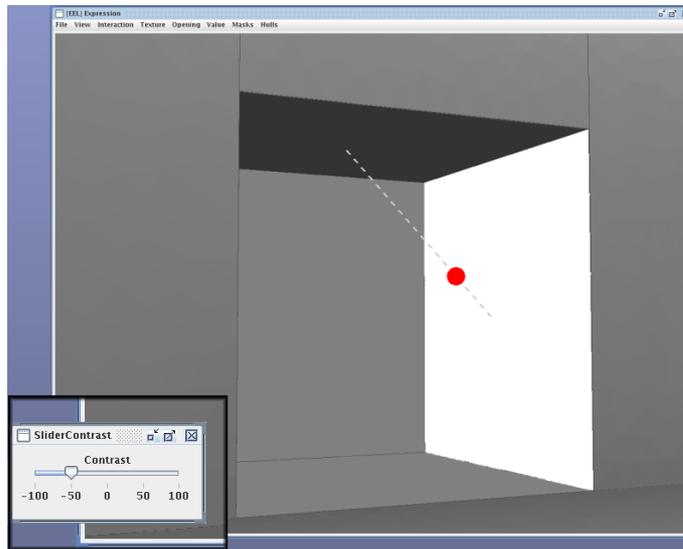


FIG. 5.11 – Contrainte de contraste.

point rouge est un curseur de réglage de la contrainte. Si le curseur est positionné au milieu de la ligne, il indique alors qu'il n'y a pas de contraste entre les faces. Si l'utilisateur déplace le curseur vers une face, il demande alors que cette face soit plus éclairée que l'autre.

Un descripteur de contraste définit une relation entre deux faces intérieures. L'ensemble de ces descripteurs définit des relations entre plusieurs zones, en supposant qu'au moins l'une d'entre elles soit associée à une contrainte d'éclairage.

Cohérence de l'intention

La liaison de plusieurs contraintes d'éclairage par des contraintes de contraste amorce la résolution de contraintes et la détection d'incohérences. La modélisation du graphe du contraste est une abstraction des relations entre les faces. Un graphe de contrainte de contraste peut être généré pour visualiser le

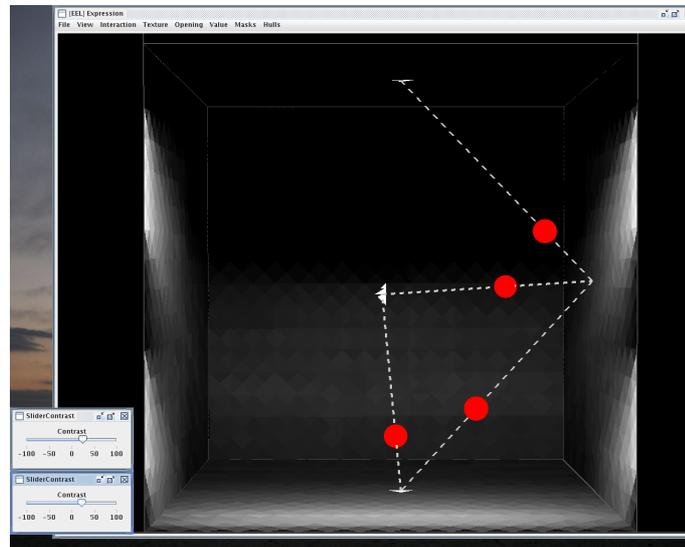


FIG. 5.12 – Graphe de contraste.

système de contraste. Ce graphe est affiché directement sur la scène afin de réitérer le processus d'expression d'intentions avant une simulation physique (fig. 5.12).

Les incohérences entre les contraintes de contraste sont détectées par une résolution de contraintes basée sur un algorithme *Branch-and-prune* [Granvilliers et Benhamou, 2006]. Lorsqu'une contrainte de contraste est spécifiée, une marge d'erreur lui est associée et constitue un intervalle qui est le domaine de cette contrainte. L'algorithme *Branch-and-prune* nous permet de vérifier que les domaines des contraintes de contraste sont compatibles et, le cas échéant, de réduire les domaines pour que les valeurs des intervalles soient consistantes. Les incohérences, qui constituent habituellement un problème à supprimer, sont ici répertoriées. Elles font partie de l'aide que nous pouvons apporter au concepteur, en lui indiquant les positions et les moments où ces incohérences surviennent.

5.1.4 Conclusion

Les travaux précédents ne répondant pas à nos contraintes, nous avons proposé une méthode pour « dessiner » les intentions d’ambiance lumineuse à travers l’éclairage, le contraste et la direction de l’éclairage.

Cette formalisation des intentions d’ambiance lumineuse est destinée à être utilisée comme donnée d’entrée d’un modèle de simulation inverse de l’éclairage naturel. Il est nécessaire d’adapter un modèle de simulation inverse aux contraintes d’éclairage, qui contiennent des distributions hétérogènes de lumière issues de l’expression des intentions d’ambiance lumineuse.

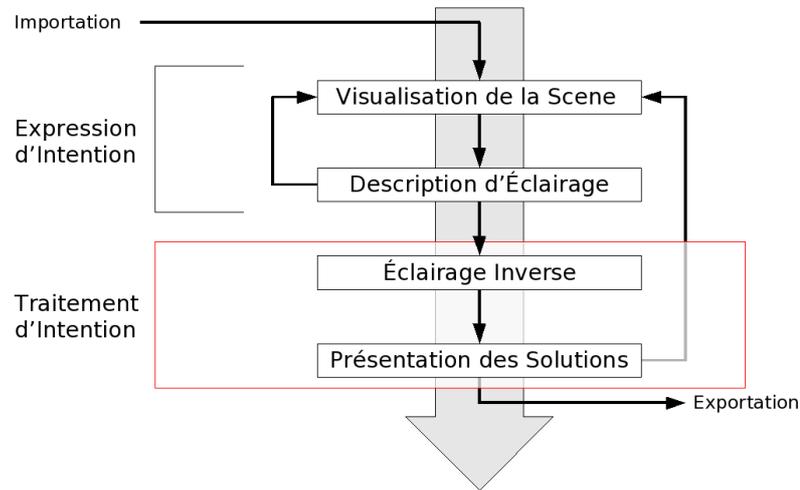


FIG. 5.13 – Traitement des intentions.

5.2 Traitement des intentions

Un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel utilise la description de l'éclairage pour calculer des propriétés géométriques et photométriques des ouvertures du bâtiment (fig. 5.13). La description de l'éclairage résultant de l'expression des intentions d'ambiance lumineuse est composée d'une répartition d'éclairement sur des surfaces concrètes ou virtuelles, d'une direction de provenance de la lumière naturelle et d'indications de contraste entre les surfaces.

L'objectif de cette étape est de respecter les contraintes d'éclairement et de contraste, selon leurs valeurs et leurs plages temporelles. Les propriétés des ouvertures sont mises en relation avec les propriétés de l'éclairage naturel. Le problème d'éclairage inverse est posé comme une recherche d'émissance de sources anisotropiques avec une approche discrète. Les zones de l'enveloppe pouvant porter des ouvertures sont discrétisées. Chaque élément discret, appelé « élément d'ouverture », est considéré comme une source lumineuse intermédiaire, car il filtre la lumière des sources extérieures d'éclairage naturel.

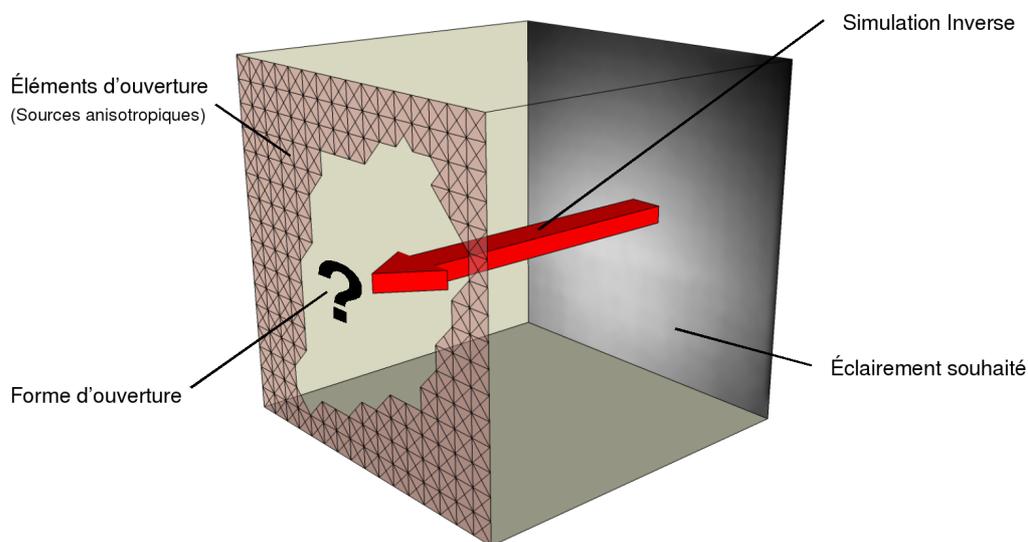


FIG. 5.14 – Principe de la simulation inverse.

La lumière apportée à une surface intérieure par l'élément d'ouverture dépend de la position relative de ces deux éléments, par exemple, un même élément d'ouverture ne transmet pas la même lumière au plafond ou au sol. Dans notre modèle, un élément d'ouverture est assimilé à une source anisotrope étendue. Ces éléments sont considérés sans épaisseur et avec un comportement binaire face à la lumière : opacité ou transparence. La transparence de l'élément d'ouverture est liée à l'émittance de cet élément lorsqu'il est considéré comme une source. La recherche de l'émittance des sources nous permet de savoir quels éléments d'ouverture vont « émettre » ou non de la lumière, et donc quels éléments d'ouverture sont transparents ou opaques. L'ensemble des éléments d'ouverture transparents définit la frontière entre les zones opaques et transparentes, cette limite détermine la forme de l'ouverture. Le problème de recherche de forme de l'ouverture est donc posé comme un problème d'éclairage inverse, et plus précisément de recherche d'émittance de sources anisotropiques. Nous cherchons

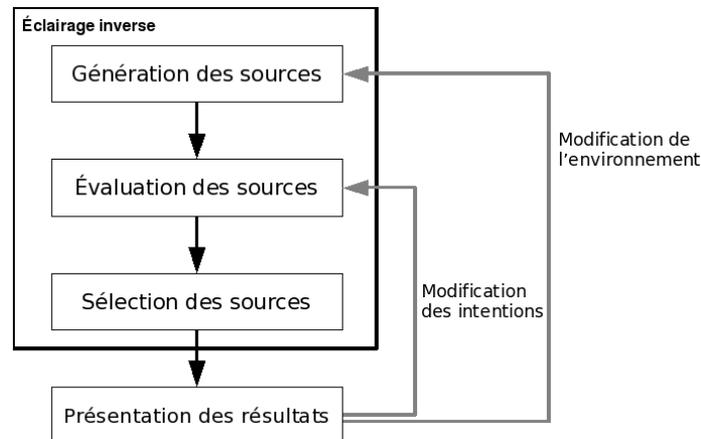


FIG. 5.15 – Étapes de l'éclairage inverse.

donc quels éléments d'ouverture doivent être transparents pour que la somme de leurs éclairages respectifs s'approche des intentions du concepteur (fig. 5.14).

L'apport de lumière d'un élément d'ouverture est généré par une simulation lumineuse du ciel et de l'environnement. Chaque élément d'ouverture est évalué selon sa contribution à l'intérieur du bâtiment. Les descripteurs permettant cette évaluation sont basés sur la distance d'image entre l'éclairage souhaité et la contribution d'un élément d'ouverture. Un sous-ensemble d'élément d'ouverture est sélectionné afin de créer une ouverture qui produit un éclairage proche des intentions d'ambiance lumineuse (fig. 5.15).

5.2.1 Génération des sources anisotropiques

Notre modèle de simulation de la lumière nécessite l'apport lumineux de chaque source intermédiaire sur les surfaces intérieures de la scène. Cet apport constitue une relation entre la surface et la source lumineuse intermédiaire.

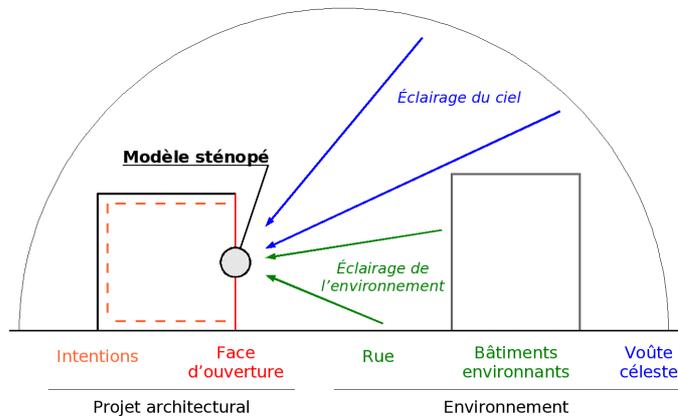


FIG. 5.16 – Le modèle sténopé appliqué à l'éclairage intérieur.

Modèle sténopé

Nous considérons une pièce du bâtiment comme un appareil photographique. La pièce elle-même est la chambre noire, les ouvertures représentent l'optique et l'environnement extérieur est l'objet à photographier. L'environnement extérieur est composé de la voûte céleste et de l'environnement naturel et urbain. L'éclairage intérieur sans interréllections peut être vu comme une image de l'extérieur. Dans le processus inverse, l'éclairage intérieur est donné à travers les intentions d'éclairage du concepteur. Le problème est donc de trouver les propriétés de la caméra, c'est-à-dire les propriétés des ouvertures du bâtiment en cours de conception (fig. 5.16).

Discrétisation

Les faces d'ouvertures sont triangulées en n éléments d'ouverture. La contribution lumineuse de chaque élément d'ouverture est calculée avec un modèle sténopé pour obtenir l'éclairage intérieur. L'éclairage de tous les éléments d'ouverture sur les faces intérieures peut être calculé comme une combinaison linéaire des contributions d'éclairage des différents éléments d'ouverture.

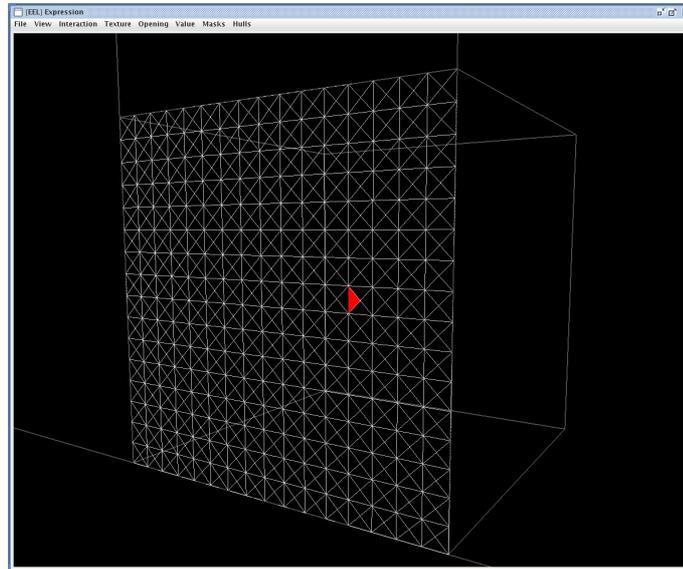


FIG. 5.17 – Un élément d’ouverture sélectionné sur un maillage régulier.

Étant donné que nous cherchons la forme et la position d’une ouverture, nous ne pouvons faire de prédiction sur ces propriétés. Cela reviendrait à avoir un *a priori* sur la forme ce qui est contraire à notre volonté d’exploration de l’espace de solutions. Il est donc exclu de faire un maillage adaptatif de la face d’ouverture. Les zones d’ouvertures sont donc partitionnées par un maillage régulier (fig. 5.17). La finesse de ce maillage dépend de la précision attendue sur les solutions d’ouvertures. Cette finesse de maillage est déterminante pour le temps de calcul et l’efficacité de la méthode. La complexité de notre algorithme dépend directement du nombre des éléments d’ouverture : $O(n_{ouv} \cdot n_{int} \cdot n_{env})$ avec n_{ouv} le nombre d’éléments d’ouverture, n_{int} le nombre de faces intérieures portant des contraintes d’éclairement et n_{env} le nombre d’éléments de l’environnement considérés comme des sources de lumière extérieures.

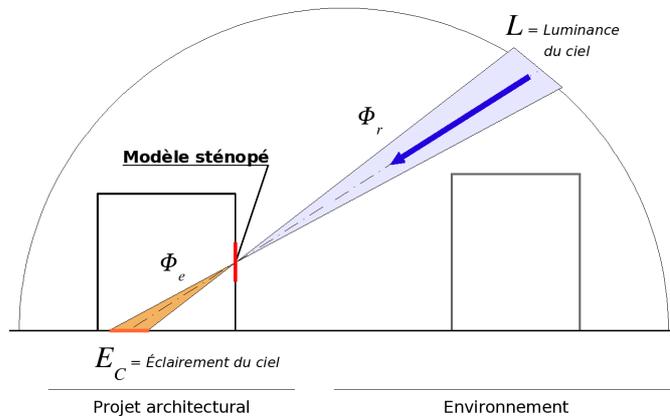


FIG. 5.18 – Contribution lumineuse d’une facette du ciel à travers un élément d’ouverture.

Simulation lumineuse

Nous utilisons le logiciel Solene pour faire la simulation du ciel. La voûte céleste est représentée par un hémisphère géodésique et sa luminance par un modèle de Perez [Miguet, 2000].

Pour chaque élément d’ouverture et chaque surface intérieure, les apports lumineux de tous les éléments extérieurs sont calculés. Une facette du ciel, respectivement une facette de l’environnement, peut fournir aux faces intérieures un éclairement du ciel E_C , respectivement un éclairement de l’environnement E_E , à travers un élément d’ouverture (fig. 5.18). Le problème pour calculer la contribution des facettes extérieures aux faces intérieures se divise en deux sous-problèmes. D’une part, calculer la valeur des éclaircements E_C et E_E pour chaque élément d’ouverture. D’autre part, déterminer la position, taille et la forme de la zone illuminée.

Valeur d’éclairement Le simulateur d’éclairage Solene calcule la luminance du ciel L et l’émittance de l’environnement urbain M . Nous établissons donc une

relation entre la luminance L et l'éclairement du ciel E_C , et entre l'émittance M et l'éclairement de l'environnement E_E .

Le flux lumineux Φ_r reçu par un élément d'ouverture peut s'exprimer selon la luminance L d'une facette du ciel sur un élément d'ouverture :

$$\Phi_r = \int_S L \cdot \Omega_r \cdot \cos \beta \cdot d\varepsilon \quad (5.1)$$

avec Ω_r l'angle solide contenant le flux Φ_r , β l'angle entre la normale de l'élément d'ouverture et la direction de l'élément d'ouverture vers la facette source et S la surface de l'élément d'ouverture.

Le flux lumineux Φ_e émis par un élément d'ouverture peut s'exprimer selon l'éclairement E d'une surface éclairée S .

$$\Phi_e = E \cdot S \quad (5.2)$$

$$S = \frac{\Omega_e \cdot l^2}{\cos \alpha} \quad (5.3)$$

avec Ω_e l'angle solide contenant le flux Φ_e , α l'angle entre la normale de la surface éclairée et la direction de la surface éclairée vers l'élément d'ouverture et l la distance entre l'élément d'ouverture et le centre de la surface éclairée.

En remplaçant S dans l'équation 5.2, on obtient :

$$\Phi_e = \frac{E \cdot \Omega_e \cdot l^2}{\cos \alpha} \quad (5.4)$$

Puis en remplaçant la distance l par la distance entre l'élément d'ouverture et la face qui porte la surface éclairée $d = l \cdot \cos \alpha$, on obtient :

$$\Phi_e = \frac{E \cdot \Omega_e \cdot d^2}{\cos^3 \alpha} \quad (5.5)$$

Pour qu'il y ait conservation de l'énergie lumineuse, le flux reçu Φ_r est transmis, réfléchi ou absorbé selon, respectivement, les coefficients de transmission, de réflexion ou d'absorption de l'élément d'ouverture. Le flux

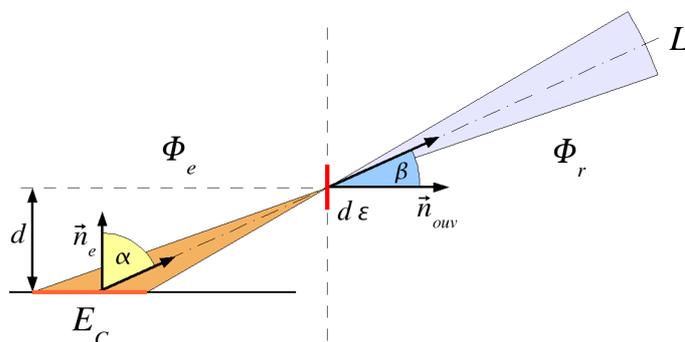


FIG. 5.19 – Illustration de l'équation 5.8.

lumineux Φ_e émis vers l'intérieur est égal au flux transmis par l'élément d'ouverture :

$$\Phi_e = \Phi_r \cdot \tau \quad (5.6)$$

avec τ le coefficient de transmission de l'élément d'ouverture.

On peut donc exprimer l'éclairement provenant du ciel E_C en fonction de la luminance L , en remplaçant Φ_r et Φ_e dans l'équation 5.6 :

$$E_C = \int_S \frac{L \cdot \Omega_r \cdot \cos^3 \alpha \cdot \cos \beta \cdot \tau \cdot d\epsilon}{\Omega_e \cdot d^2} \quad (5.7)$$

Si l'on considère qu'il n'y a pas de phénomènes de diffraction ou de réfraction, alors $\Omega_r = \Omega_e$ (fig. 5.19).

$$E_C = \int_S \frac{L \cdot \cos^3 \alpha \cdot \cos \beta \cdot \tau \cdot d\epsilon}{d^2} \quad (5.8)$$

Dans le cas où la surface éclairée et l'élément d'ouverture sont parallèles (fig. 5.20), par exemple si l'on calcule l'éclairage du fond d'une pièce, les angles α et β sont égaux. De plus, si l'on considère le coefficient de transmission τ égal à un, on peut alors simplifier l'équation précédente :

$$E_C = \int_S \frac{L \cdot \cos^4 \alpha \cdot d\epsilon}{d^2} \quad (5.9)$$

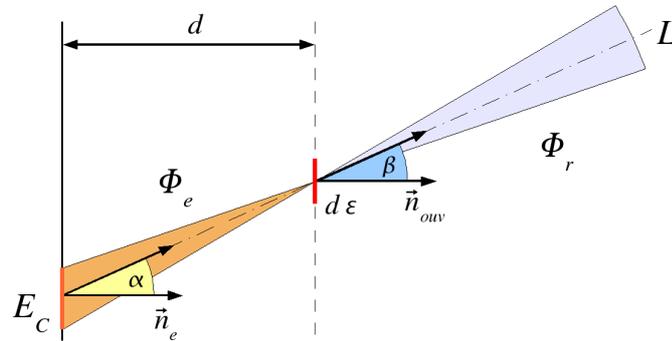


FIG. 5.20 – Illustration de l'équation 5.9.

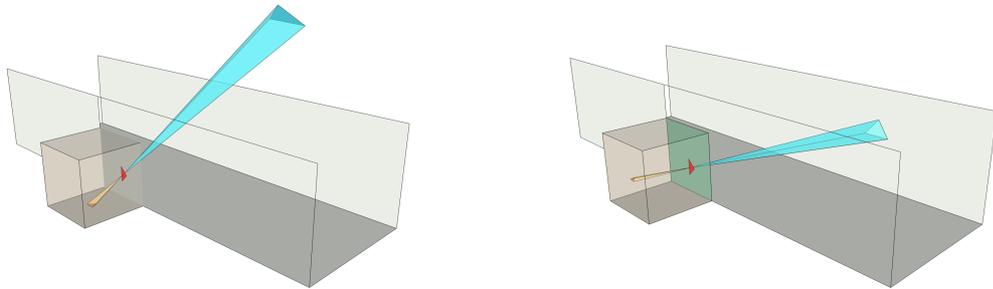


FIG. 5.21 – Projection des facettes de l'environnement sur les faces intérieures.

L'éclairement venant de l'environnement E_E est obtenu à partir de l'équation 5.9, qui est modifiée pour établir une relation entre l'émittance d'une facette de l'environnement M et l'éclairement E_E :

$$E_E = \int_S \frac{M \cdot \cos^4 \alpha \cdot d\varepsilon}{d^2 \cdot \pi} \quad (5.10)$$

Position, taille et forme de la zone illuminée Le deuxième problème concerne le calcul de la position, de la taille et de la forme de la zone illuminée. Nous utilisons la projection perspective du modèle sténopé centré sur l'élément d'ouverture pour projeter les facettes de l'environnement (ciel et bâtiments) sur les faces intérieures (fig. 5.21). Nous obtenons ainsi une projection du maillage des objets de l'extérieur sur les faces intérieures.

L'inconvénient de cette solution est qu'il faut discrétiser des faces intérieures

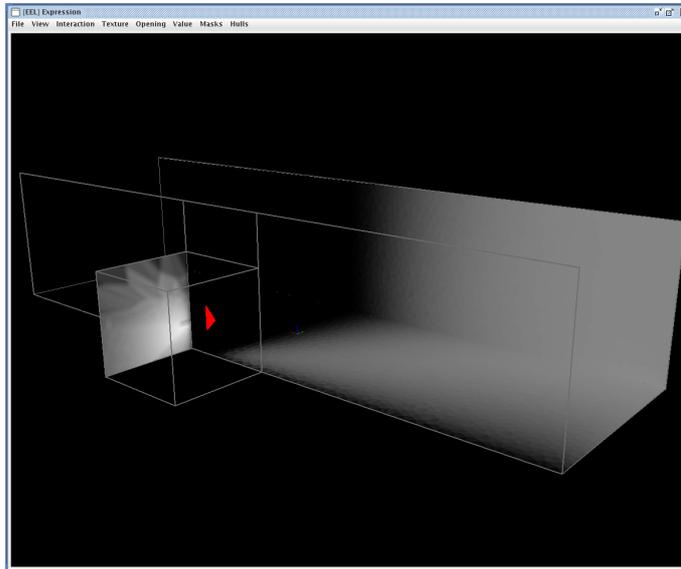


FIG. 5.22 – Affectation des valeurs d'éclairement sur l'environnement.

pour chaque élément d'ouverture. Nous proposons dans le paragraphe suivant une méthode pour calculer la contribution de sources étendues et hétérogènes en évitant cette coûteuse triangulation des faces intérieures.

Calcul de la contribution Les valeurs calculées de l'apport d'éclairement sont affectées sur les éléments extérieurs correspondants (fig. 5.22). Ainsi, une photographie de l'extérieur depuis le centre de l'élément d'ouverture représente l'apport lumineux à l'intérieur du volume. Cette photographie subit une convolution relative à la taille et à la forme de l'élément d'ouverture. Puis, la photographie est découpée pour correspondre à la position de la surface intérieure, sur laquelle elle est plaquée.

Ce processus est résumé dans l'algorithme 5.1. La fonction *CalculEclairement*(*élément*, *face*, *facette*) utilise la relation entre la luminance et l'éclairement intérieur pour calculer la valeur d'éclairement d'une facette *facette* à travers un élément d'ouverture *élément* sur une face intérieure *face*.

Algorithme 5.1 : Génération des sources anisotropiques

Données : Ensemble des éléments d'ouverture Ouv , Faces du volume Int ,
Ensemble des facettes de l'environnement Env

Résultat : Apports lumineux des éléments de Env sur les faces de Int

début

$img \leftarrow null$;

$valExt \leftarrow 0$;

pour chaque $élément \in Ouv$ **faire**

pour chaque $face \in Int$ **faire**

pour chaque $facette \in Env$ **faire**

$valExt \leftarrow CalculEclairment(élément, face, facette)$;

$Affectation(valExt, facette)$;

fin

$img \leftarrow Projection(élément, Env)$;

$img \leftarrow TraitementImage(img)$;

$Affectation(img, face)$;

fin

fin

fin

La fonction $Projection(élément, Env)$ positionne une caméra sur le centre de l'élément d'ouverture, dirigée selon la normale de la face éclairée, et demande à la carte graphique de faire un rendu hors-écran de la scène. La fonction $TraitementImage(img)$ fait subir une convolution et un découpage à l'image obtenue.

L'éclairement apporté par chaque élément d'ouverture E_i est donc :

$$E_i = \sum_{j=0}^n E_C^j \cdot v(i, j) + \sum_{k=0}^m E_E^k \cdot v(i, k) \quad (5.11)$$

avec E_C^j l'éclairement du $j^{ème}$ élément du ciel, E_E^k l'éclairement du $k^{ème}$ élément de l'environnement et $v(i, j)$ la visibilité entre les éléments i et j , cette visibilité est calculée par la carte graphique lors du rendu de la scène dans la fonction $Projection$:

$$v(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ et } j \text{ sont mutuellement visibles} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.12)$$

Validation de l'algorithme de génération des sources

La validité de l'utilisation des éléments d'ouverture comme sources anisotropiques est éprouvée par la comparaison entre l'éclairement issu de notre modèle et l'éclairement calculé avec Solene. Les tests sont effectués sur un volume simple, un cube, avec une face totalement ouverte orientée au sud, et sous deux ciels : ciel clair CIE et ciel couvert CIE.

La composante directe F_d , sur l'environnement et à l'intérieur du volume, est calculée avec Solene. La composante indirecte extérieure F_{ie} est calculée avec la lumière réfléchie de l'environnement vers l'intérieur. Ces deux composantes sont additionnées pour connaître la valeur d'éclairement de la lumière incidente E_{Sol} :

$$E_{Sol} = F_d + F_{ie} \quad (5.13)$$

Pour la simulation avec le modèle sténopé, nous nous plaçons exactement dans la même situation. La géométrie du ciel et de l'environnement, ainsi que leurs valeurs de luminance et leurs valeurs d'émittance, respectivement, sont importées dans notre modèle. L'apport de chaque élément d'ouverture E_i est calculé par le modèle sténopé. l'éclairement E_{Ste} à l'intérieur du volume est la somme des apports de tous les éléments d'ouverture :

$$E_{Ste} = \sum_{i=0}^n E_i \quad (5.14)$$

La mesure d'erreur est basée sur l'erreur quadratique moyenne (EQM). L'image d'erreur quadratique ΔE est issue du carré de la différence arithmétique entre l'éclairement de Solene et l'éclairement du modèle sténopé :

$$\Delta E = |E_{Sol} - E_{Ste}|^2 \quad (5.15)$$

Éclairement d'un élément d'ouverture Un modèle sténopé est utilisé pour calculer l'apport de lumière d'un élément d'ouverture (fig. 5.23). Le ciel et l'environnement reçoivent les valeurs d'éclairement qu'ils apportent à l'intérieur du volume à travers l'élément d'ouverture. Ainsi, la prise de vue de l'extérieur représente l'éclairement intérieur. La répartition de l'éclairement obtenu montre bien le caractère anisotropique de ses sources de lumière (fig. 5.24 & 5.25).

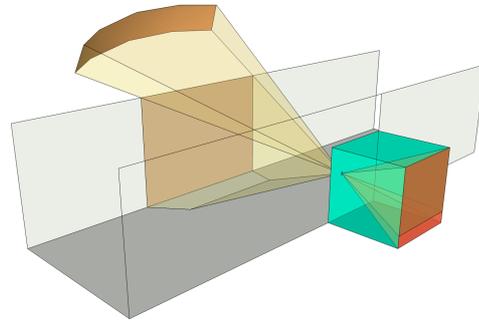


FIG. 5.23 – Principe de génération des sources.

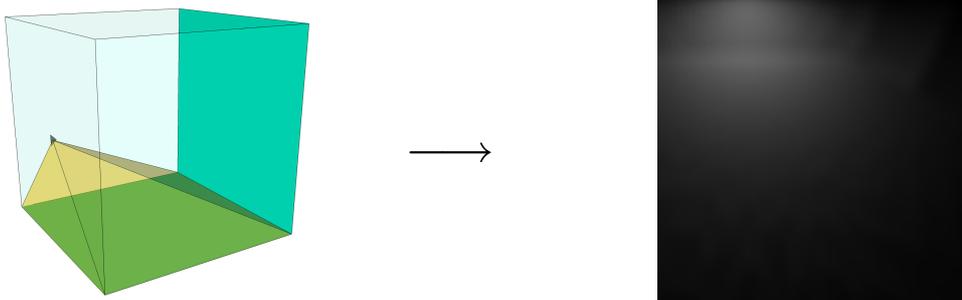


FIG. 5.24 – Projection sur le sol.

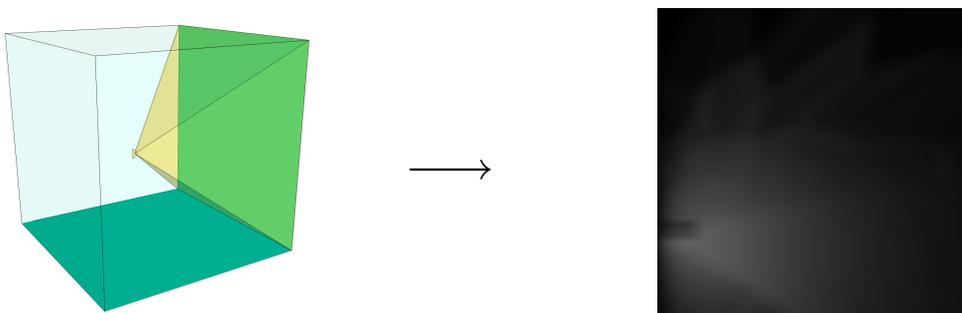


FIG. 5.25 – Projection sur le bord.



FIG. 5.26 – Simulation Solene sous ciel couvert E_{Sol} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord.

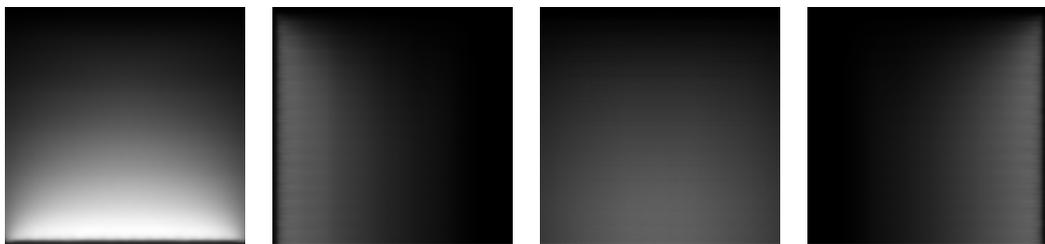


FIG. 5.27 – Simulation modèle sténopé sous ciel couvert E_{Ste} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord.

Éclairage d'un ciel couvert On constate sur les figures 5.26 et 5.27 que les éclairages couvert respectifs de Solene et du modèle sténopé sont proches. L'EQM entre les éclairages se situe entre 1,6 % et 2,9 % (fig. 5.30).

Éclairage d'un ciel clair Les figures 5.28 et 5.29 montrent que les différences entre les éclairages sous un ciel clair peuvent être plus importantes que sous un ciel couvert. En effet, si l'EQM sur les bords reste inférieure à 2%, l'EQM sur le sol dépasse les 5% et surtout sur le fond les 12% (fig. 5.30). Cependant, la forme de l'éclairage étant respectée sur le fond du volume, cette erreur ne devrait pas avoir un impact important sur la simulation inverse.



FIG. 5.28 – Simulation Solene sous ciel clair E_{Sol} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord.

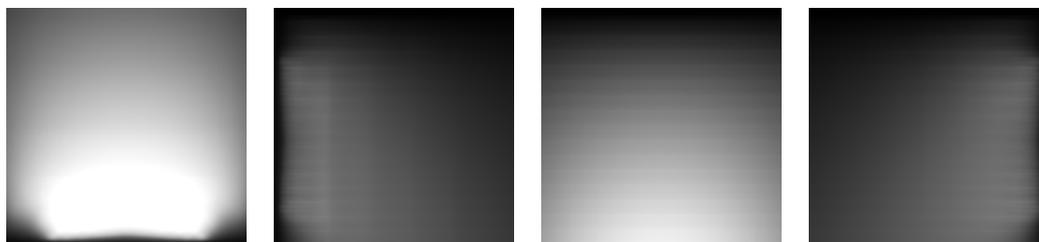


FIG. 5.29 – Simulation modèle sténopé sous ciel clair E_{Ste} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord.

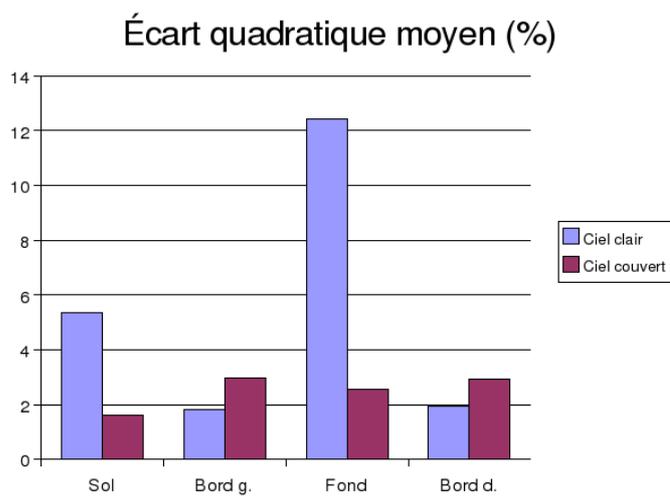


FIG. 5.30 – Écart quadratique moyen entre Solene et le modèle sténopé.

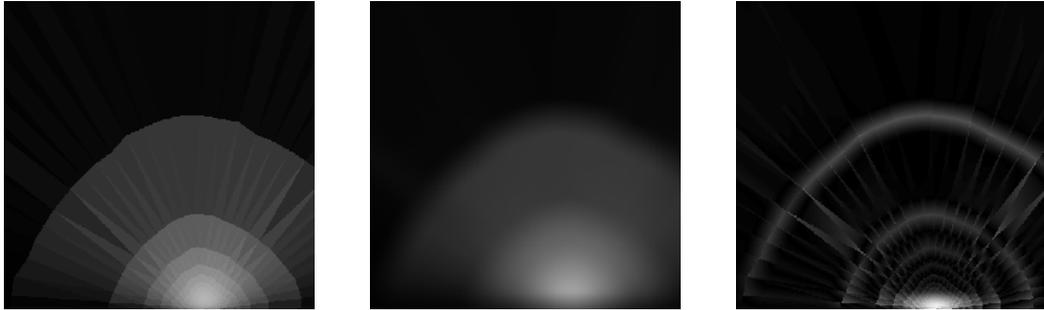


FIG. 5.31 – Effet de bord dû à la convolution (*de g. à d.*) avant, après, différence.

Analyse de l'erreur L'erreur est générée par l'approximation faite lors de la prise en compte de la taille des éléments d'ouverture. Cette erreur est perceptible sur le sol et les bords, où l'on constate une bordure sombre. La figure 5.31 montre, à gauche, l'éclairement généré par un élément d'ouverture avant la convolution, au centre, le même éclairement après la convolution, et à droite la différence entre deux images précédentes. On constate sur cette dernière image des différences importantes près du bord inférieur, dues au fait que l'opération de convolution utilisée produit un effet de bord qui assombrit l'image sur les bords.

5.2.2 Évaluation des sources

L'évaluation des sources de lumière, à savoir les éléments d'ouverture, détermine l'intérêt de l'apport lumineux d'un élément d'ouverture pour générer l'éclairage souhaité. Cette évaluation quantifie la pertinence d'un élément d'ouverture par une comparaison entre l'éclairage qu'il apporte et la description de l'intention d'ambiance lumineuse. Des descripteurs sont extraits de cette comparaison pour pouvoir générer une carte d'évaluation.

Distance d'éclairement

Les éclairagements sont représentés par la répartition de lumière sur une surface plane, et sont considérées comme des images. Nous donnons à cet ensemble d'images une métrique pour le transformer en espace métrique. La métrique d'image utilisée est basée sur l'erreur quadratique moyenne (EQM), ou écart quadratique moyen, entre l'éclairement souhaité et la contribution de chaque élément d'ouverture. L'EQM respecte les propriétés de symétrie, de séparation et d'inégalité triangulaire, et peut être utilisée pour définir une distance [Zhou *et al.*, 2002]. L'évaluation des éléments d'ouverture est basée sur une mesure de distance entre l'éclairement souhaité E^{int} et la contribution d'un élément d'ouverture E^{ouv} . L'erreur quadratique ΔE_f est calculée sur chaque face intérieure f (éq. 5.16).

$$\Delta E_f = \left| E_f^{int} - E_f^{ouv} \right|^2 \quad (5.16)$$

avec E_f^{int} l'éclairement souhaité sur la face f et E_f^{ouv} la contribution lumineuse d'un élément d'ouverture sur la face f .

Deux descripteurs sont extraits de l'histogramme de l'erreur quadratique : la moyenne $\overline{\Delta E}$ et l'écart type (ou déviation standard) $\sigma_{\Delta E}$. L'erreur quadratique

moyenne représente la différence de quantité d'éclairement tandis que l'écart type de l'erreur quadratique représente la différence entre les formes d'éclairement.

Pour un élément d'ouverture, les descripteurs de toutes les faces intérieures sont additionnés. Cette somme indique si l'éclairement d'un élément d'ouverture permet de s'approcher de l'éclairement souhaité. La distance entre les éclairagements souhaités sur toutes les faces E^{int} et les contributions lumineuses d'un élément d'ouverture sur toutes les faces E^{ouv} est donc :

$$d(E^{int}, E^{ouv}) = \sum_{f=0}^n p^f (a \cdot \overline{\Delta E_f} + b \cdot \sigma_{\Delta E_f}) \quad (5.17)$$

avec n le nombre de faces intérieures, p^f la pondération de la face f , ΔE_f l'image de l'erreur quadratique par rapport à la face f et a et b les coefficients de pondération respectifs de la moyenne $\overline{\Delta E_f}$ et de l'écart type $\sigma_{\Delta E_f}$. Les coefficients p^f sont peuvent être spécifiés par l'utilisateur selon l'importance qu'il donne à chaque face. La valeur des coefficients a et b est discutée dans les paragraphes suivants.

L'évaluation de la direction d'éclairement se fait en fonction de la position relative entre l'élément d'ouverture et la face intérieure. Si la direction principale d'éclairement donnée dans les intentions est contenue dans l'angle solide délimité entre le centre de l'élément d'ouverture et l'enveloppe de la face intérieure, alors l'élément d'ouverture améliore son évaluation par un coefficient de direction. Ce coefficient est calculé en fonction de la correspondance entre les limites du descripteur de direction et la répartition de l'éclairement. Le coefficient de direction dépend de la moyenne des valeurs d'éclairement contenues dans l'intersection entre le prolongement du descripteur de direction centré sur l'élément d'ouverture et la contribution d'éclairement de l'élément d'ouverture.

Les figures 5.32 et 5.33 montrent, à gauche, l'éclairement d'un élément d'ouverture, au milieu, l'éclairement voulu, et à droite la différence entre les

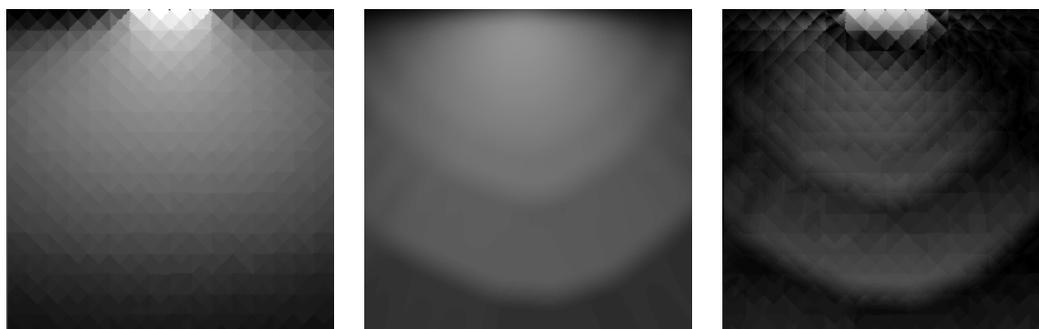


FIG. 5.32 – Comparaison des évaluations selon la moyenne et l'écart type (gauche) Ouverture originale (centre) Évaluation selon la moyenne (droite) Évaluation selon l'écart type.

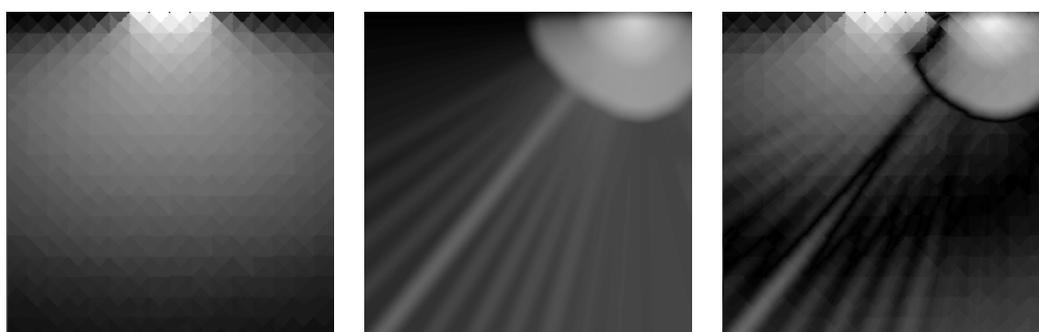


FIG. 5.33 – Comparaison des évaluations selon la moyenne et l'écart type (gauche) Ouverture originale (centre) Évaluation selon la moyenne (droite) Évaluation selon l'écart type.

deux. La figure 5.32 illustre une bonne évaluation car l'éclairement souhaité et la contribution sont proches, et l'image de différence a des valeurs très faibles. La figure 5.33, contrairement à la précédente, montre une mauvaise évaluation de la contribution d'éclairement.

Évaluation selon la moyenne

Lorsque l'erreur quadratique moyenne est utilisée pour évaluer l'apport de lumière des éléments, le résultat obtenu ne correspond pas à notre appréciation visuelle (fig. 5.34). L'EQM donne une mauvaise évaluation des éléments d'ouverture qui apportent un éclairement très diffus ou très faible. C'est une

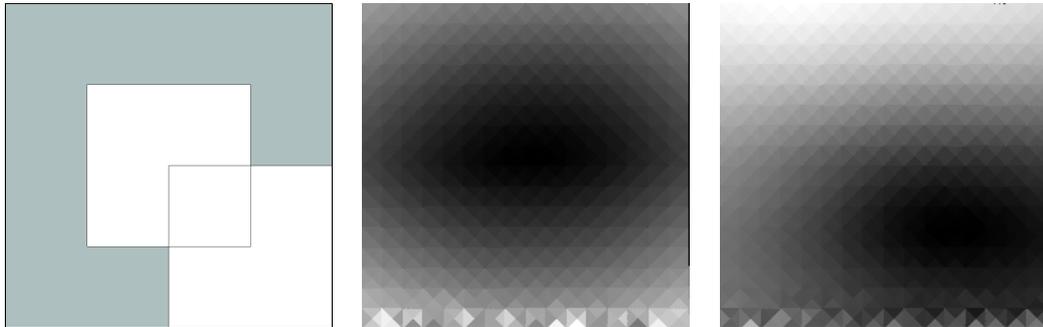


FIG. 5.34 – Comparaison des évaluations selon la moyenne et l'écart type (gauche) Ouverture originale (centre) Évaluation selon la moyenne (droite) Évaluation selon l'écart type.

bonne mesure de la différence de la valeur de l'éclairement. Étant donné que nous sommes plus intéressés par la forme de la répartition spatiale de cet éclairement, cette mesure de distance n'est pas adaptée à nos besoins.

Évaluation selon l'écart type

L'écart type de l'histogramme de l'image d'erreur quadratique ΔE , évalue la dispersion des valeurs. Cette mesure détecte donc les différences entre les pics d'éclairement, et donne une mesure satisfaisante de la distance entre les répartitions d'éclairement (fig. 5.34). En utilisant l'écart type de l'histogramme de ΔE pour évaluer les éléments, le résultat obtenu est nettement plus proche de nos attentes. Nous confirmons donc l'utilisation de l'écart type comme mesure de distance entre les éclairagements au détriment de la moyenne.

Évaluation individuelle d'un élément d'ouverture

L'évaluation individuelle mesure la distance entre l'apport lumineux d'un unique élément d'ouverture et l'éclairement souhaité. Cette différence est en quelque sorte une évaluation « absolue » de l'élément d'ouverture, et répond à

la question : si cet élément était le seul à apporter de la lumière, est-ce qu'il serait à même de reproduire l'éclairage souhaité ?

Il est donc évident que cette mesure est une évaluation très approximative par rapport à l'ouverture totale. Néanmoins, il est possible de procéder à une évaluation des éléments d'ouverture dans cette logique, et de considérer qu'un ensemble d'éléments qui ont une bonne évaluation individuelle, vont réussir à recréer l'éclairage souhaité. Par ailleurs, cette mesure donne une première évaluation, qui forme une base pour une évaluation plus précise.

Évaluation d'un ensemble d'éléments d'ouverture

Une ouverture étant un ensemble d'éléments d'ouverture, l'évaluation d'une ouverture serait plus précise avec l'évaluation d'un ensemble d'éléments d'ouverture plutôt que l'ensemble des évaluations individuelles de chaque élément d'ouverture. Nous pourrions adopter approche incrémentale pour évaluer les éléments d'ouverture. En partant d'un ensemble d'éléments d'ouverture déjà sélectionné, il peut être intéressant de prendre en compte cet ensemble dans l'évaluation d'un élément d'ouverture que l'on veut ajouter. Nous pourrions ainsi constater dans quelle mesure l'élément testé viendrait combler un manque pour réaliser l'intention ou au contraire éloigner un groupe d'éléments de l'intention.

Carte d'évaluation

Les valeurs issues de l'évaluation des éléments d'ouverture sont codées en niveaux de gris, et sont attribuées à chaque élément d'ouverture. L'ensemble des éléments d'ouverture associés à leurs valeurs forme la carte d'évaluation d'une face d'ouverture par rapport à une face intérieure portant un éclairage. Plus un élément d'ouverture est foncé, plus il a reçu une bonne évaluation, et il est donc plus approprié pour reproduire l'éclairage souhaité. Par exemple, dans la

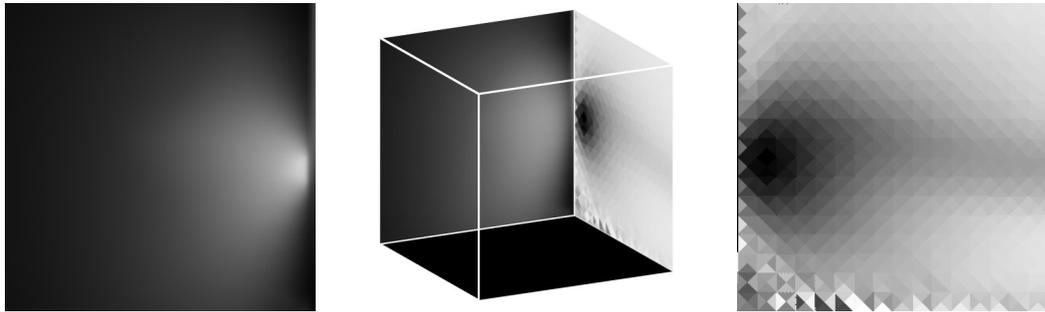


FIG. 5.35 – (*gauche*) Éclairement souhaité (*centre*) situation dans le volume (*droite*) carte d'évaluation.

figure 5.35, l'évaluation des éléments de la face d'ouverture, située à droite du volume, par rapport à un éclairement souhaité au fond du volume, produit la carte d'évaluation. Cette carte permet d'avoir une vue synthétique de l'ensemble des descripteurs des éléments d'ouverture sur la face d'ouverture, et peut constituer en soi un élément d'aide à la conception. Néanmoins, la carte d'évaluation est destinée à fournir les données pour l'étape de sélection des sources lumineuses, afin de construire une ouverture.

5.2.3 Sélection des sources

L'étape de sélection des sources de lumière détermine l'ensemble des éléments d'ouverture qui sont transparents et qui composent l'ouverture finale. Cette ouverture est une combinaison d'éléments unitaires qui laissent passer la lumière naturelle. Cette sélection est une segmentation binaire de la carte d'évaluation des sources lumineuses, et partitionne l'ensemble des éléments d'ouverture en deux catégories : opaques et transparents. La segmentation peut être effectuée interactivement ou automatiquement. La représentation de l'ensemble des éléments d'ouverture transparents donne des indications sur les propriétés géométriques de l'ouverture : position, taille et forme.

Sélection interactive

Nous cherchons un sous-ensemble d'éléments d'ouverture qui ont une valeur minimale de descripteur. Les cartes d'évaluation de la face d'ouverture par rapport aux faces intérieures (sol, bord, fond et plafond) sont affichées séparément. Le concepteur peut choisir la pondération de chacune de ces cartes pour composer la carte globale d'évaluation, à savoir les valeurs p^i de l'équation 5.17. Une sélection interactive permet de choisir sur la carte globale un sous-ensemble d'éléments d'ouverture dont le descripteur est inférieur à une valeur donnée. À partir de cette valeur, une segmentation binaire sur la carte d'évaluation est automatiquement calculée et affichée. Ainsi, le concepteur peut immédiatement constater l'ébauche d'une proposition d'ouverture et son éclairage associé. Cette méthode de sélection ne produit pas forcément une solution optimale, mais l'aspect interactif permet d'avoir une évolution dynamique des indications proposées (fig. 5.36).

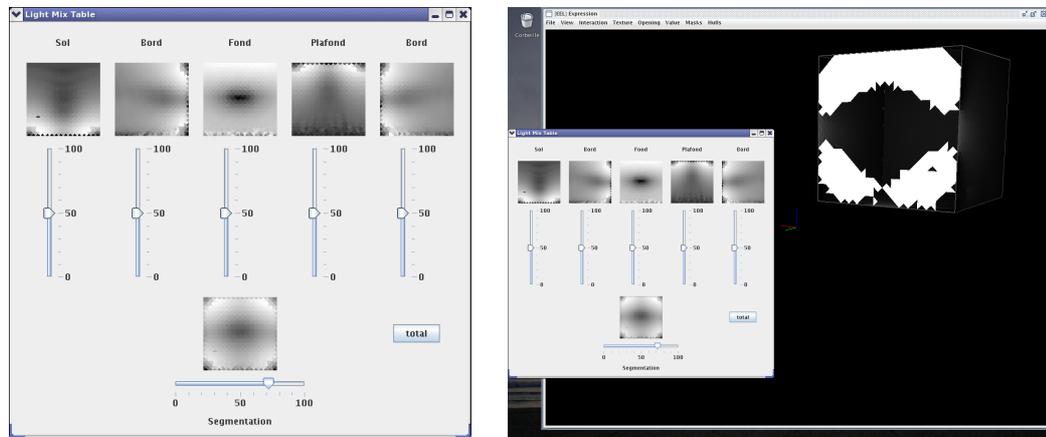


FIG. 5.36 – Interface de sélection interactive.

Sélection automatique

La sélection automatique est basée sur le principe de l'optimisation : prédiction-correction. La fonction objectif est donnée par l'intention d'ambiance. Cependant, l'optimisation reste une notion délicate à aborder car il n'existe pas à proprement parler de solution dite « optimale » en architecture. En conséquence, cette méthode de sélection doit être vue comme un outil d'exploration des propriétés de l'ouverture.

La sélection automatique propage une condition de sélection sur les voisins des éléments déjà sélectionnés. Cette propagation génère donc une ouverture avec des éléments d'ouverture connectés. Un élément d'ouverture ne sera pas sélectionné s'il est encerclé par des éléments dont les descripteurs ne satisfont pas la condition de sélection. L'objectif est de donner une préférence aux éléments d'ouverture désignés comme points de départ, et une propagation depuis ces éléments. Si aucun point de départ n'est indiqué par l'utilisateur, la méthode désigne les éléments d'ouverture qui ont les meilleurs descripteurs au regard des conditions de sélection. La condition de sélection est propagée par une méthode

récursive à partir des points de départ. Deux éléments d'ouverture sont considérés comme voisins s'ils ont une arête en commun.

La méthode de sélection automatique est résumée dans l'algorithme 5.2. La fonction $EvaluationIndividuelle(E, I)$ est l'évaluation individuelle de l'ensemble des éléments d'ouverture E par rapport à l'intention I . La fonction $EvaluationGroupe(C, S, I)$ est l'évaluation de l'ensemble des éléments d'ouverture C en tenant compte des éléments d'ouverture déjà sélectionnés S , par rapport à l'intention I .

Algorithme 5.2 : Sélection des sources.

Données : Ensemble des éléments d'ouverture E , Intention I

Résultat : Ensemble des éléments d'ouverture sélectionnés S

début

$C \leftarrow \emptyset;$

$S \leftarrow \emptyset;$

$Evolution \leftarrow 0;$

$E \leftarrow EvaluationIndividuelle(E, I);$

tant que $E \neq \emptyset$ **faire**

$C \leftarrow ChoixCandidats(E);$

$E \leftarrow E - C;$

$Evolution \leftarrow EvaluationGroupe(C, S, I);$

si $Evolution \geq 0$ **alors**

$S \leftarrow S + C;$

fin

$C \leftarrow \emptyset;$

fin

fin

Nous avons proposé dans ce chapitre un environnement de conception, contenant une interface d'expression des intentions d'ambiance lumineuses, par la description de la lumière incidente, et une méthode de simulation inverse, basée sur un modèle sténopé. Suite à l'implémentation d'un prototype, nous présentons les résultats obtenus au chapitre suivant.

Chapitre 6

Résultats

Sommaire

6.1	Reconstruction d'ouverture	170
6.1.1	Une pièce orientée au nord	172
6.1.2	Dimension Temporelle	178
6.2	Cas d'étude	184
6.2.1	Expression de l'intention d'ambiance lumineuse	184
6.2.2	Génération des sources	185
6.2.3	Évaluation des sources	186
6.2.4	Sélection des sources	186
6.2.5	Interprétation de la solution	188
6.3	Bilan	192
6.3.1	Expression des intentions d'ambiance lumineuse	192
6.3.2	Traitement des intentions d'ambiance lumineuse	193
6.3.3	Discussion	196

LES résultats présentés ici sont issus de notre prototype expérimental. Ce prototype est implémenté en JAVA avec les bibliothèques J3D, *Swing* et *Java Advanced Imaging (JAI)* pour gérer, respectivement, la partie 3d, l'interface et les opérations sur les images.

Le logiciel Solene est utilisé pour calculer les simulations lumineuses. Les rendus photoréalistes sont calculés avec *Sunflow* [Sun, 2007], un moteur de rendu basé sur un algorithme de lancer de rayons. Les tests sont faits sur un ordinateur équipé d'un processeur *Intel Core 2 Duo* cadencé à 2,13 GHz, de 2 Go de mémoire vive et d'une carte graphique Quadro FX 550.

Le principe d'inversion est testé par des reconstructions d'ouvertures. Les valeurs d'éclairement générées par une ouverture connue sont utilisées comme des intentions d'ambiance lumineuse sur les faces intérieures d'un volume donné. Ensuite, un cas d'étude présente l'utilisation de l'environnement de travail, depuis l'expression des intentions d'ambiance jusqu'à la génération des ouvertures.

6.1 Reconstruction d'ouverture

Ces tests montrent comment notre modèle de simulation inverse reconstruit une ouverture à partir d'une distribution lumineuse créée par une ouverture donnée. Nous pouvons ainsi évaluer la précision de l'étape d'évaluation et de sélection des éléments d'ouverture.

Une simulation lumineuse est calculée avec l'ouverture originale pour obtenir la distribution de lumière originale dans la pièce. Les distributions lumineuses sur les faces intérieures (sol, murs et plafond) sont entrées dans notre modèle de simulation inverse et considérées comme des intentions d'ambiance lumineuse. La forme de l'ouverture originale est comparée avec la carte d'évaluation obtenue à la phase d'évaluation et avec la forme obtenue à la phase de sélection. Le concepteur peut proposer une interprétation architecturale de cette forme reconstruite. Une simulation directe de l'éclairage naturel est calculée avec la forme interprétée pour comparer l'éclairage produit avec l'éclairage original. Le processus de reconstruction est résumé sur la figure 6.1.

La scène des tests de reconstruction (fig. 6.2) contient une face d'ouverture avec 1024 éléments d'ouverture, 5 faces intérieures et un environnement composé de 10000 facettes triangulaires (ciel et environnement). Les durées approximatives des étapes de génération et d'évaluation sont respectivement de 2 heures et de 40 minutes. La taille mémoire au cours de l'exécution est environ de 500 Mo, les images des projections d'éclairage prenant plus de 300 Mo.

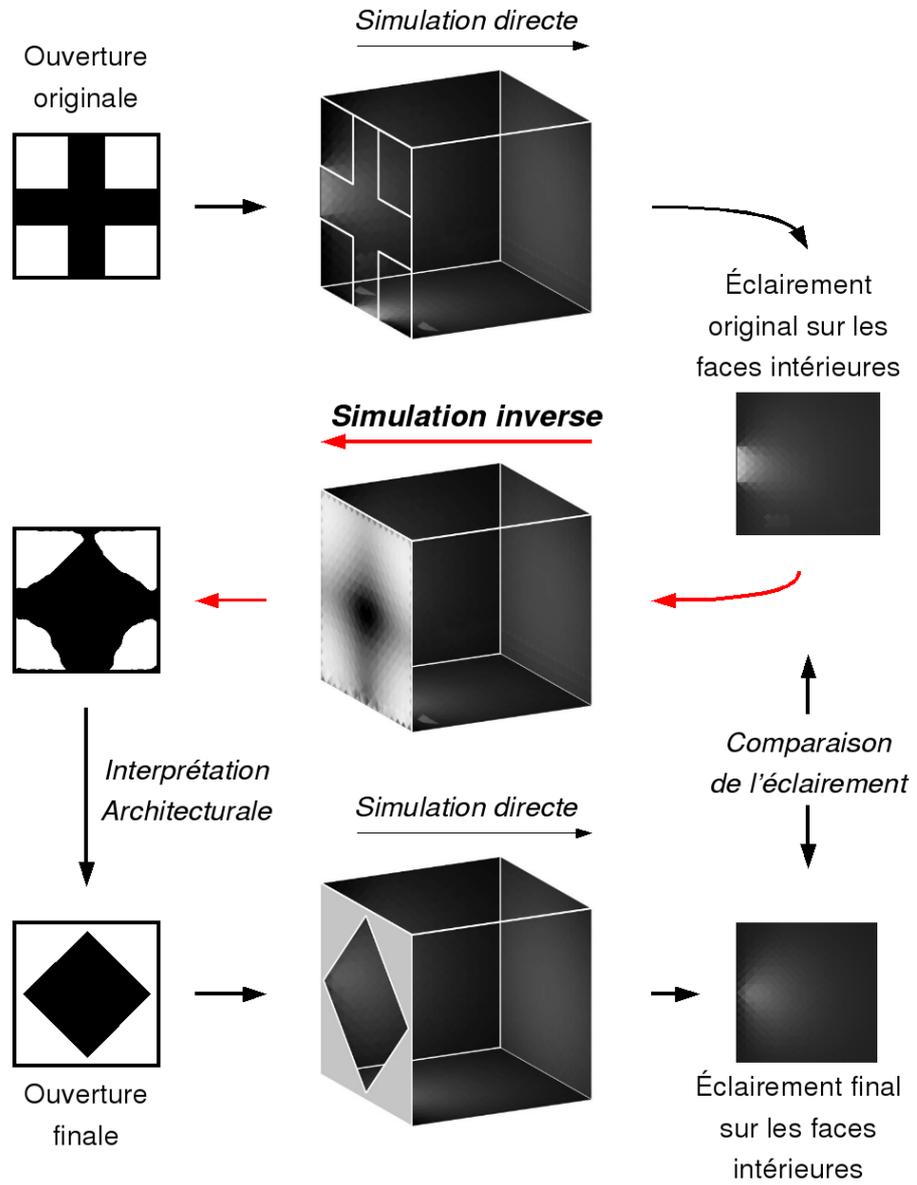


FIG. 6.1 – Processus de reconstruction d'ouverture.

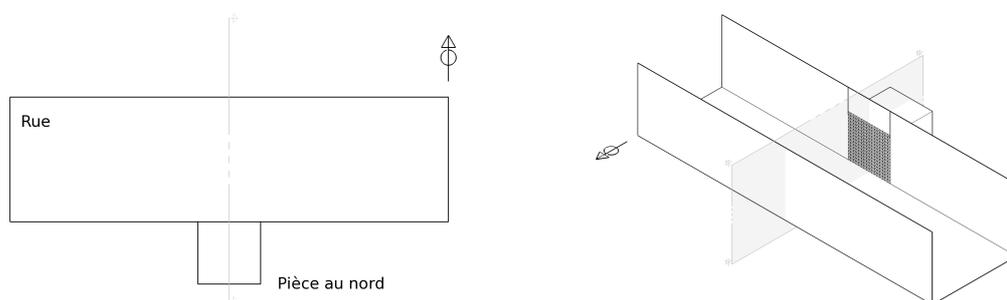


FIG. 6.2 – (gauche) Plan pièce au nord et rue. (droite) Axonométrie pièce au nord et rue.

6.1.1 Une pièce orientée au nord

Dans cette situation, une pièce de $10m * 10m * 10m$, orientée au nord, est située à 47° de latitude nord. La face d'ouverture donne sur une rue est-ouest de 20m de large sur 70m de long, avec des murs de 15m de haut (fig. 6.2). La rue et les murs ont un coefficient de réflexion diffus volontairement élevé de 0.8. La luminance du ciel correspond à la journée du 21 septembre sous un ciel clair ou un ciel couvert.

Une ouverture horizontale avec un ciel couvert

La reconstruction d'une ouverture horizontale avec l'éclairement du ciel E_C est proche de la forme, de la position et de la taille de l'ouverture originale (fig. 6.3). L'éclairement situé au fond du volume joue un rôle très important dans cette reconstruction. En effet, la carte d'évaluation due à la face du fond est quasiment identique à la carte d'évaluation finale. Nous pouvons donc déduire qu'une seule distribution d'éclairement située sur la face du fond peut nous permettre de reconstruire la forme de l'ouverture. La segmentation a bénéficié d'un lissage pour améliorer la lisibilité, cette opération reste optionnelle dans le processus de reconstruction.

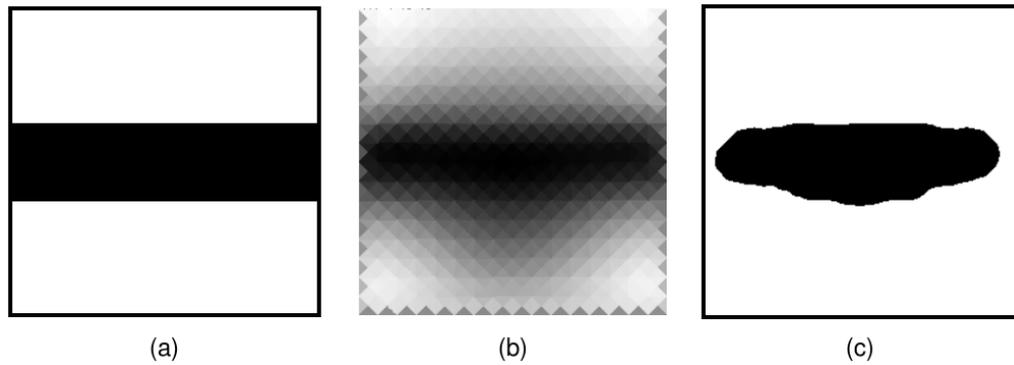


FIG. 6.3 – (a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement du ciel E_C .

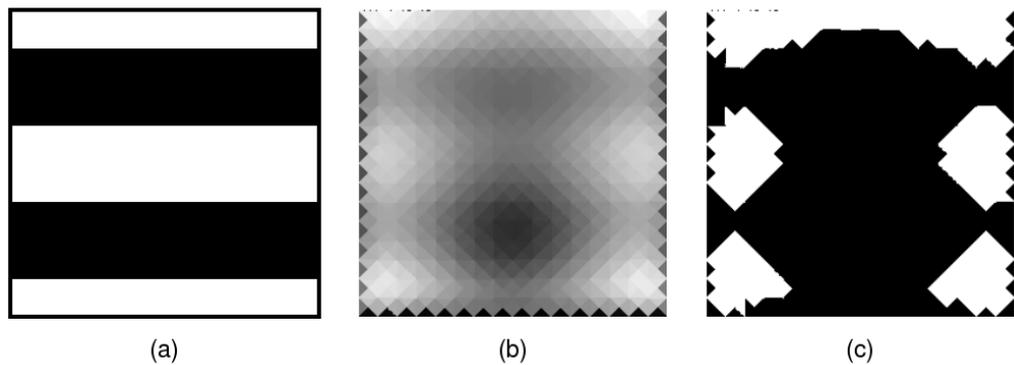


FIG. 6.4 – (a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement du ciel E_C .

Deux ouvertures horizontales avec un ciel couvert

La reconstruction de deux ouvertures horizontales avec l'éclairement du ciel E_C est loin de la forme, de la position et de la taille de l'ouverture originale (fig. 6.4).

L'éclairement situé au fond du volume joue aussi un rôle très important dans cette reconstruction. En comparant les cartes d'évaluation de l'ouverture par rapport à l'éclairement au sol et l'éclairement du fond, nous constatons que la carte d'évaluation par rapport au fond est nettement plus proche de l'ouverture

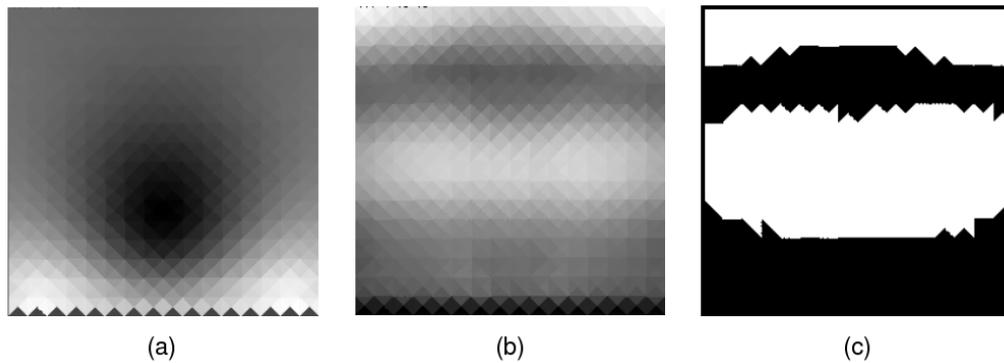


FIG. 6.5 – (a) Évaluation par rapport au sol (b) Évaluation par rapport au fond (c) Segmentation de la carte par rapport au fond.

originale que la carte d'évaluation par rapport au sol (fig. 6.5). Une segmentation sur la carte d'évaluation de la face du fond donne des formes d'ouvertures plus proches des ouvertures originales que la segmentation sur la carte d'évaluation totale, et confirme le rôle décisif de l'éclairage de la face du fond dans la simulation inverse sous un ciel couvert.

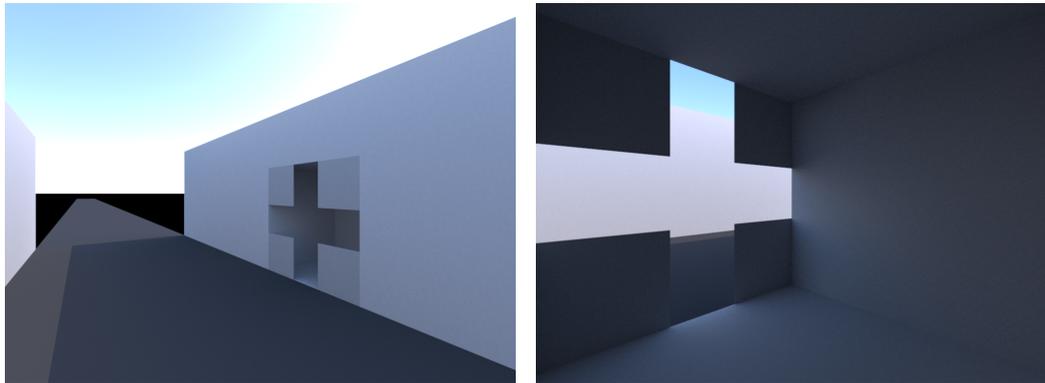


FIG. 6.6 – (gauche) Vue extérieure de la pièce avec une ouverture en croix . (droite) Vue intérieure.

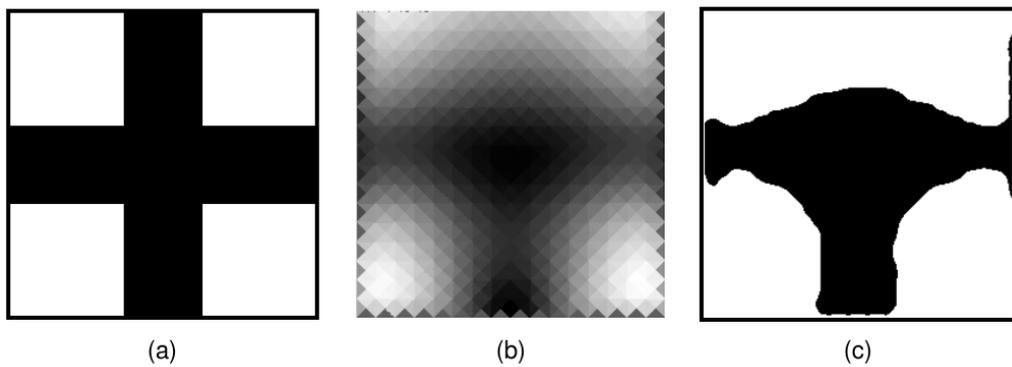


FIG. 6.7 – (a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement E_C .

Ouverture en croix avec un ciel clair

La figure 6.6 montre l'ouverture originale utilisée pour ce test. La reconstruction d'une ouverture en croix avec l'éclairement du ciel E_C retrouve la partie basse de la croix (Figure 6.7). Étant donné que le ciel est la seule source de lumière, le plafond n'est pas éclairé. La simulation inverse dépend des informations d'éclairement contenues sur les autres faces (sol et murs). La partie haute de l'ouverture apporte une lumière très diffuse sur ces faces, par conséquent cette partie est difficile à reconstruire

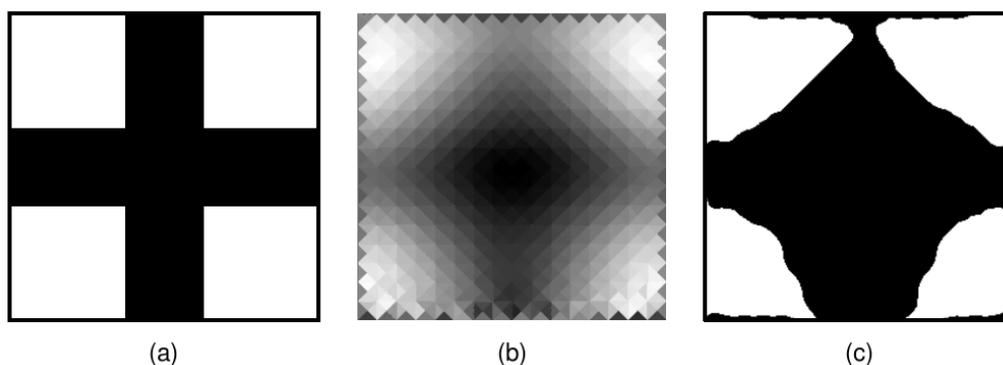


FIG. 6.8 – (a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement $E_C + E_E$.

Ouverture en croix avec un ciel clair et l'environnement

La reconstruction d'une ouverture avec l'éclairement du ciel E_C et de l'environnement E_E retrouve une forme de croix. La lumière provenant de l'environnement apporte donc une information utile à la reconstruction de l'intégralité de l'ouverture (Figure 6.8). Néanmoins, la carte d'évaluation issue de cette reconstruction est moins précise que précédemment. En effet, l'éclairement $E_C + E_E$ est plus diffus que l'éclairement du ciel E_C sur les faces intérieures.

La figure 6.9 montre un exemple d'interprétation de la reconstruction d'ouverture. Nous pouvons ainsi comparer l'éclairement produit par l'ouverture interprétée et l'éclairement souhaité. Nous constatons sur la figure 6.10 que les éclairagements sont relativement proches. La zone près de l'ouverture est certes moins éclairée qu'avec l'ouverture originale, mais sur le reste de la face, la forme de la répartition de la lumière est identique sur les deux éclairagements.

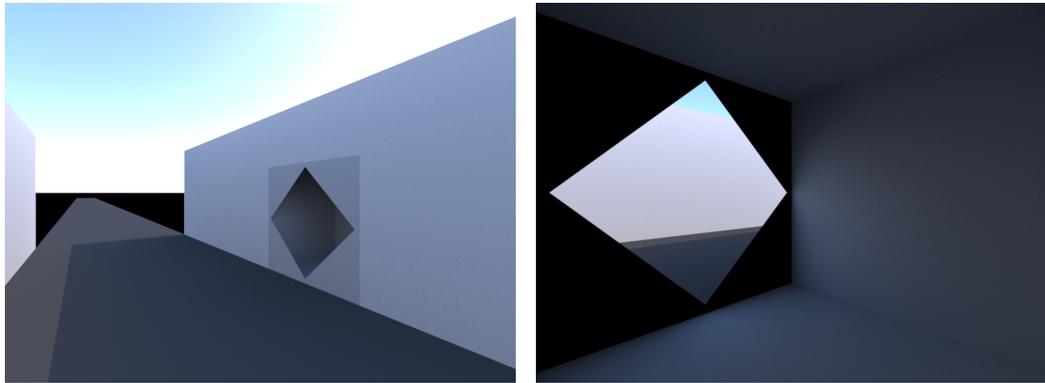


FIG. 6.9 – (gauche) Vue extérieure de la pièce avec une interprétation de la reconstruction (losange). (droite) Vue intérieure.

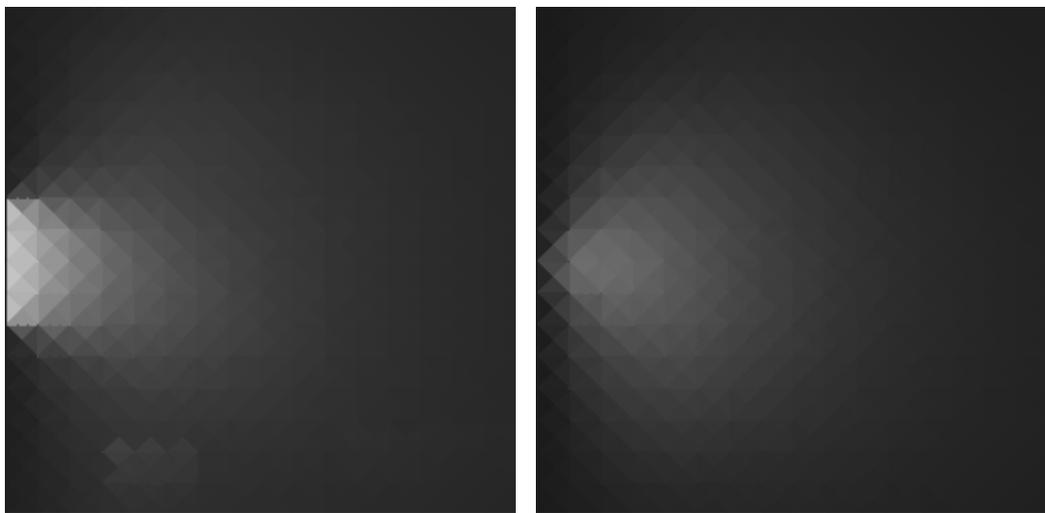


FIG. 6.10 – (gauche) Éclairement sur le mur avec l'ouverture en croix (droite) Éclairement sur le mur avec une interprétation de la reconstruction (losange).

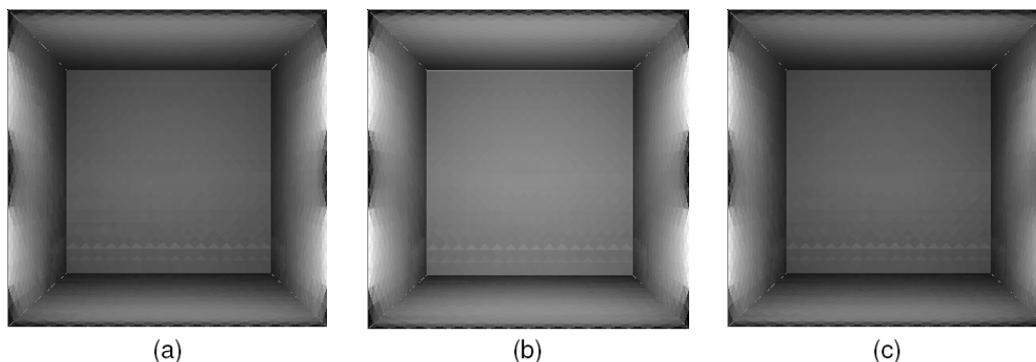


FIG. 6.11 – (a, b, c) Intentions à 08h00, 12h00, 16h00.

6.1.2 Dimension Temporelle

La dimension temporelle de l'éclairage naturel peut être prise en compte avec notre modèle. Le concepteur spécifie ses intentions d'éclairage à une date et des heures précises. Une simulation inverse est calculée pour chacune d'elles, produisant autant de cartes d'évaluation. La concaténation de ses dernières permet d'obtenir une carte d'évaluation finale, solution de la suite temporelle des intentions. Pour illustrer ce propos, une simulation inverse de l'éclairage est calculée pour la journée du 21 septembre, avec un pas de temps de quatre heures.

Intentions cohérentes

Afin de produire une suite temporelle d'intentions cohérentes, nous avons réalisé une première expérimentation dans laquelle les intentions d'éclairage ont été produites (par simulation directe) pour chaque pas de temps avec la même ouverture (fig. 6.11), en l'occurrence deux ouvertures horizontales (fig. 6.13 a).

Les cartes d'évaluation sont calculées à chaque pas de temps (fig. 6.12). La carte d'évaluation globale est obtenue par la moyenne des cartes précédentes (fig. 6.13 b). La carte globale est segmentée par l'utilisateur grâce à l'interface

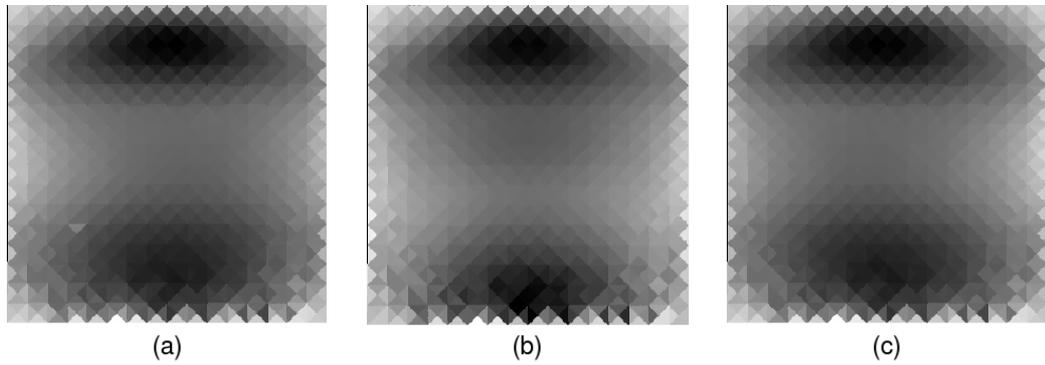


FIG. 6.12 – (a, b, c) Cartes d'évaluation à 08h00, 12h00, 16h00.

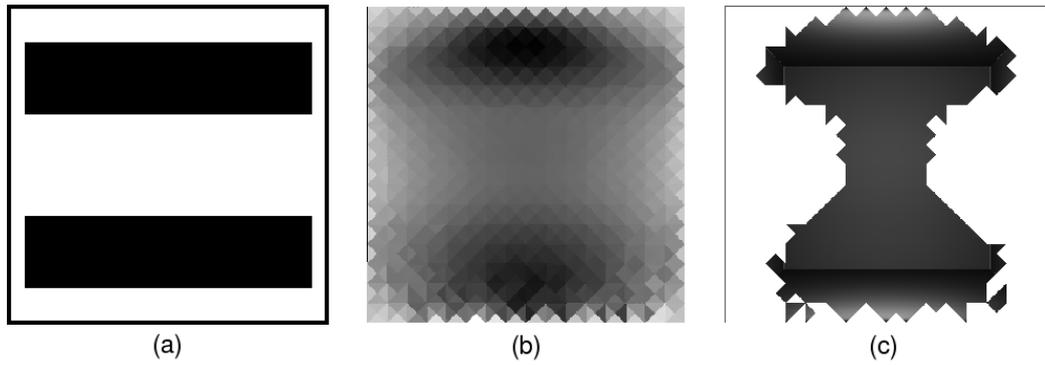


FIG. 6.13 – (a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation globale (c) Segmentation de la carte globale.

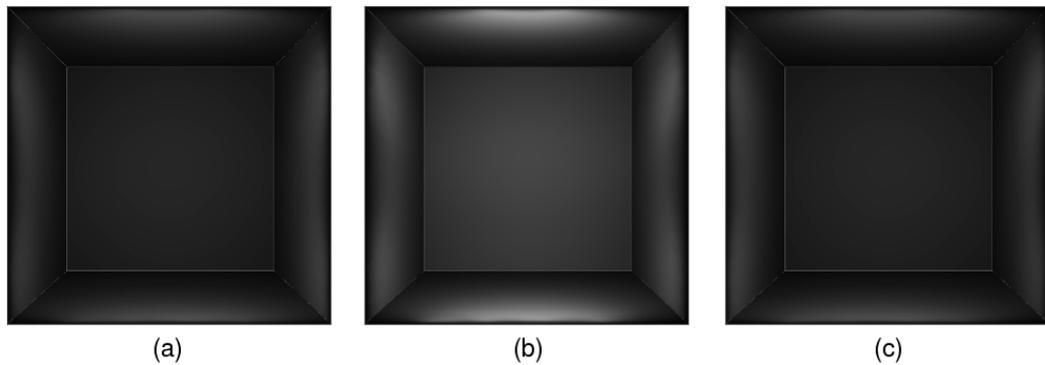


FIG. 6.14 – (a, b, c) Re-éclairage avec l'ouverture reconstruite à 08h00, 12h00 et 16h00.

de sélection interactive (fig. 6.13 c), et un re-éclairage immédiat est proposé pour avoir un aperçu de l'éclairage produit (fig. 6.14).

Intentions incohérentes

Dans une deuxième série d'expérimentations, chaque simulation inverse est associée à une intention d'éclairage provenant de l'éclairage produit par des ouvertures différentes aux horaires correspondants. Il n'y a donc, a priori, pas de cohérence dans l'évolution de l'intention d'éclairage. Par exemple, la simulation de 08h00 est associée à une intention d'éclairage produit par l'éclairage dû à une ouverture horizontale, la simulation de 12h00 est associée à une intention d'éclairage produit par l'éclairage dû à une ouverture en losange et la simulation de 16h00 est associée à une intention d'éclairage produit par l'éclairage dû à une ouverture croix (fig. 6.15).

Les cartes d'évaluation sont calculées (fig. 6.16), et leurs segmentations individuelles montrent que les formes d'ouverture sont différentes (fig. 6.17). Après avoir fait la moyenne des cartes d'évaluation (fig. 6.18 a), la segmentation produit une forme d'ouverture dans laquelle on retrouve quelques propriétés des formes précédentes (fig. 6.18 b) : forme horizontale et un élément en haut de la face d'ouverture. L'interface interactive permet alors de comparer le re-éclairage aux intentions et d'ajuster la valeur de segmentation (fig. 6.19).

Avec des intentions différentes, on s'éloigne bien évidemment des éclairagements demandés, mais on trouve une solution approchante en augmentant le seuil de tolérance, c'est-à-dire, la valeur de segmentation. Ce résultat, même s'il est éloigné de l'intention d'origine, est une solution réalisable proche de l'intention exprimée. À charge ensuite au concepteur de reformuler ses intentions pour qu'elle soient réalisables, lorsqu'il constate un écart trop important entre son intention et l'éclairage produit.

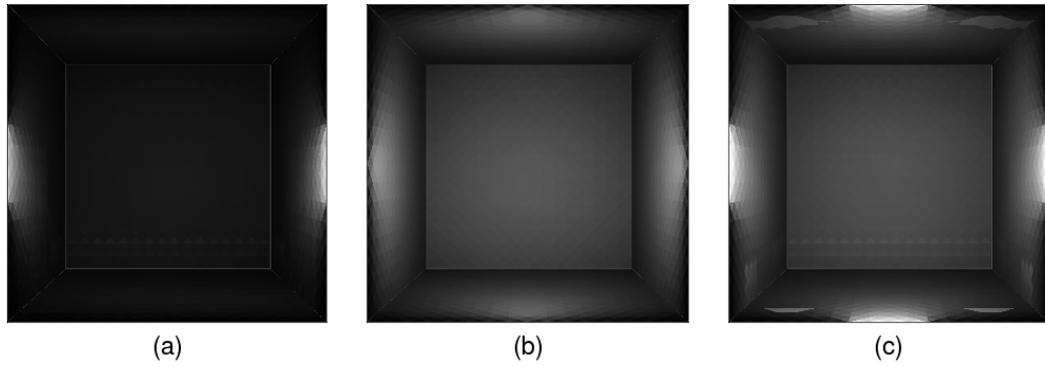


FIG. 6.15 – (a, b, c) Intentions à 08h00, 12h00, 16h00.

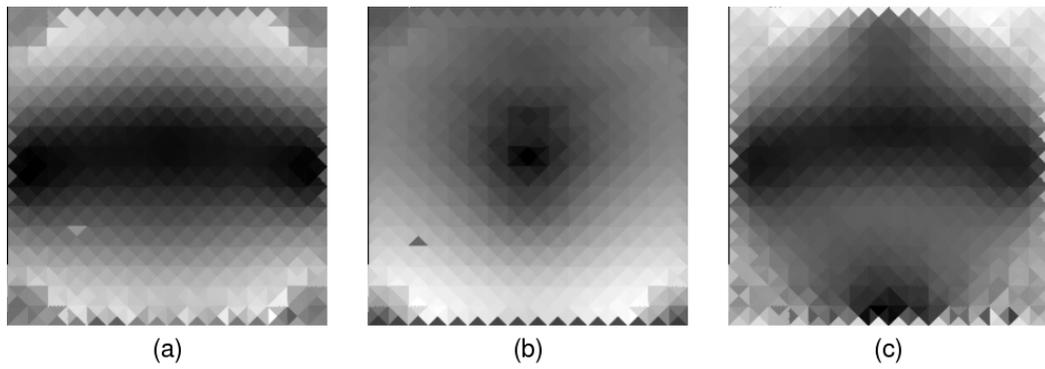


FIG. 6.16 – (a, b, c) Cartes d'évaluation à 08h00, 12h00, 16h00.

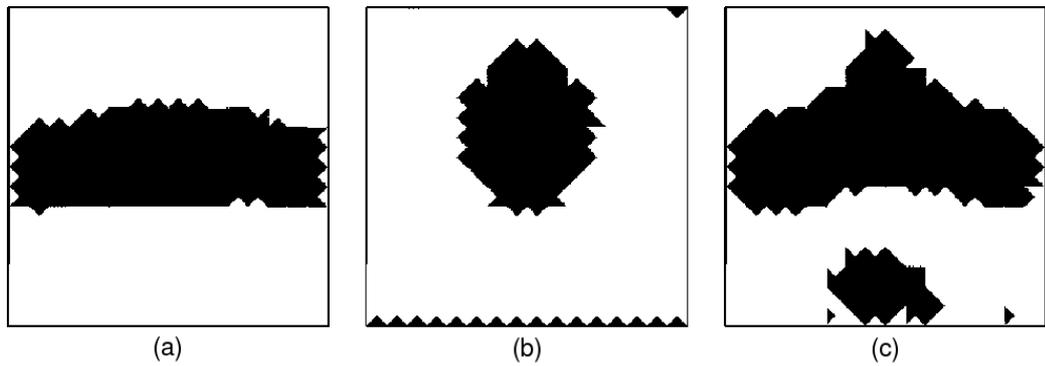


FIG. 6.17 – (a, b, c) Segmentation des cartes précédentes.



FIG. 6.18 – (a) Carte d'évaluation globale (b) Segmentation de la carte globale.

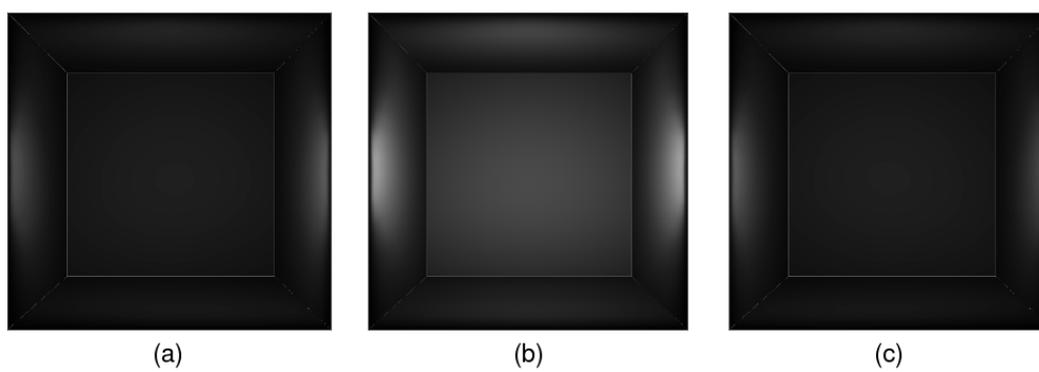
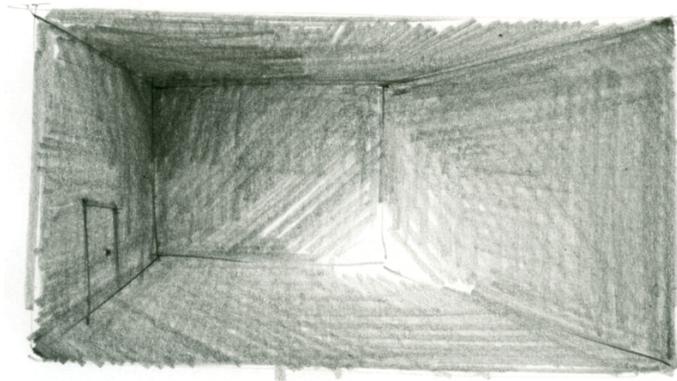


FIG. 6.19 – (a, b, c) Re-éclairage avec l'ouverture reconstruite à 08h00, 12h00 et 16h00.

Nous avons bien conscience que l'exploration des possibilités de notre modèle par rapport à la dimension temporelle n'est pas totalement achevée. Une étude paramétrique, à dates et heures variées et dans différentes conditions de test, permettrait d'étudier l'évolution des formes d'ouvertures en fonction de l'évolution des intentions.

Par ailleurs, nous avons utilisé la moyenne comme opérateur de concaténation des cartes d'évaluation, mais d'autres opérateurs sont envisageables. En effet, la moyenne permet de dégager une idée globale de l'intention d'éclairage, autrement dit elle lisse les extrêmes. Cet opérateur est particulièrement adapté à des intentions qui évoluent dans le temps. En revanche, un architecte peut exprimer une intention qui contient un élément constant dans le temps, par exemple une zone toujours très éclairée, ou au contraire, toujours peu éclairée. Nous aurons alors recours aux opérateurs *sup* ou *inf* pour bien indiquer au modèle que l'intention est une valeur minimale (*sup*) ou maximale (*inf*) d'éclairage. L'utilisation de ces opérateurs peut poser un problème relatif à la quantité de lumière pénétrant le volume étudié. Ce problème est résolu par la segmentation interactive qui permet à l'utilisateur de réguler cet apport de lumière.



un coin de lum. et un coin d'ombre.

FIG. 6.20 – Croquis d'intention : « un coin de lumière et un coin d'ombre ».

6.2 Cas d'étude

Nous présentons un cas d'étude pour étudier le comportement de notre modèle dans un exercice de conception. Nous avons demandé à un architecte d'exprimer des intentions d'ambiance lumineuse dans un volume simple, correspondant à la boîte nord de nos cas de test. Le modèle de simulation inverse a calculé les cartes d'évaluation et les a présentées à l'architecte. Ce dernier a alors interprété le résultat sous forme d'ouvertures, et nous comparons l'éclairage produit par ces ouvertures avec l'intention d'ambiance lumineuse.

6.2.1 Expression de l'intention d'ambiance lumineuse

Si l'interface a été bien acceptée par l'architecte pour visualiser la lumière, ce dernier a tout de même utilisé les outils traditionnels pour exprimer son intention : le crayon et le papier (fig. 6.20).

Une fois le croquis numérisé, il est découpé et anamorphosé manuellement pour créer des textures à intégrer dans le modèle (fig. 6.21 & 6.22). Ces textures

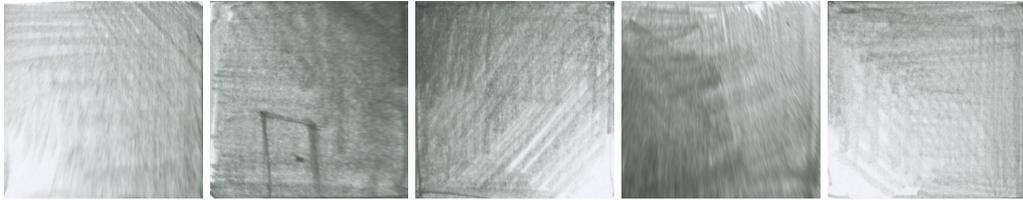


FIG. 6.21 – Le croquis transformé en textures.

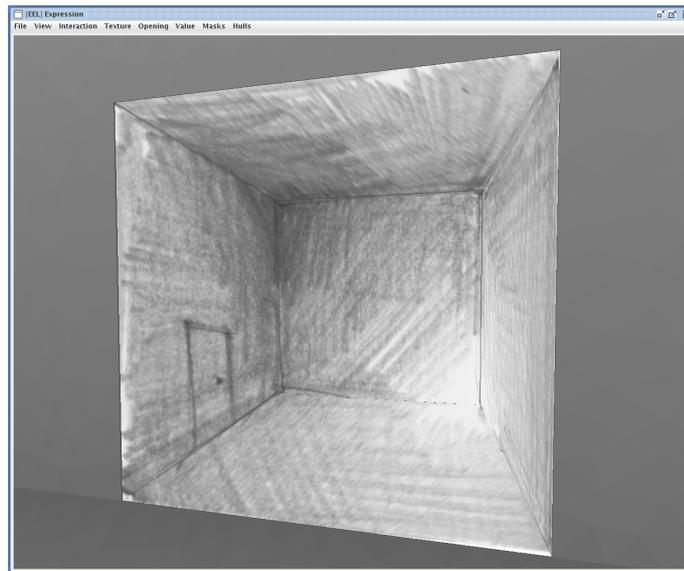


FIG. 6.22 – Intégration des textures dans la scène 3D à l'aide de l'interface.

sont considérées dans notre environnement de travail comme une répartition d'éclairément.

6.2.2 Génération des sources

La génération des sources lumineuses se fait avec un ciel clair. Étant donné que la scène dans laquelle nous avons intégré les intentions d'ambiance lumineuse est la même que dans les cas de reconstruction, l'étape de génération des sources lumineuses est identique à celle des cas de test avec la boîte nord.

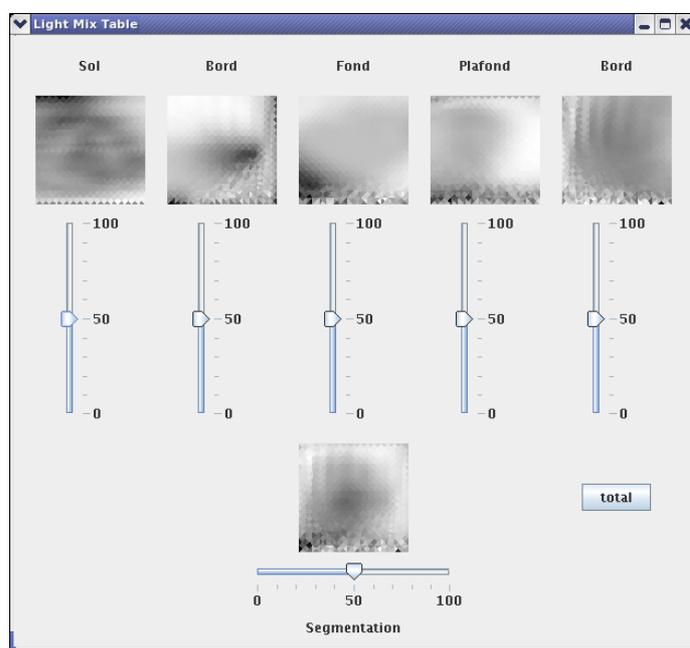


FIG. 6.23 – Évaluation de l'ouverture.

6.2.3 Évaluation des sources

Les évaluations individuelles de l'éclairage apporté par les éléments d'ouverture se font avec l'écart type $\sigma_{\Delta E}$. Les cartes d'évaluation relatives à chaque face intérieure (sol, bords, fond et plafond) sont calculées, puis sont affichées dans la fenêtre de sélection (fig. 6.23). Une carte d'évaluation globale est calculée avec une pondération équivalente pour toutes les faces intérieures. Nous constatons que les évaluations indépendantes des faces intérieures produisent des cartes d'évaluation très différentes. Il en résulte que la carte d'évaluation globale ne montre pas une forme d'ouverture identifiable au premier abord.

6.2.4 Sélection des sources

La sélection est faite en mode interactif par le curseur horizontal de segmentation de la carte d'évaluation (fig. 6.24). On constate, lorsque l'on déplace

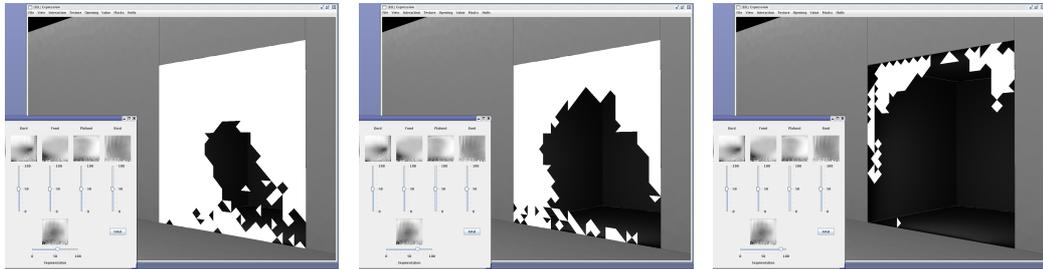


FIG. 6.24 – Sélection des éléments d'ouverture en mode interactif.

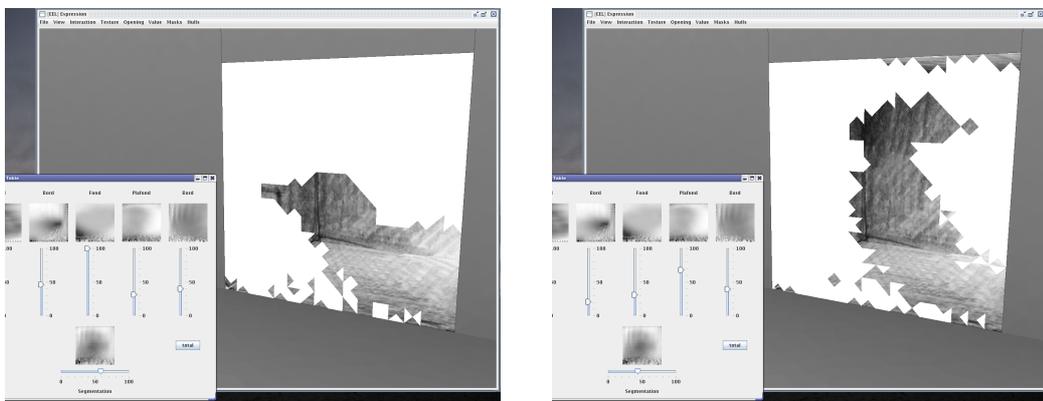


FIG. 6.25 – Variations de la sélection selon les pondérations des faces.

le curseur de la gauche vers la droite, que le nombre d'élément sélectionné est croissant, donc le niveau d'éclairage augmente, et que l'éclairage produit s'éloigne de l'intention originale.

La carte globale d'évaluation, et donc la sélection des sources, peuvent être modifiées en jouant sur les pondérations des faces intérieures. Par exemple une face ayant un poids plus important que les autres (fig. 6.25 *gauche* le fond du volume, *droite* le plafond) change le résultat de la sélection des éléments d'ouverture. La segmentation produit alors une forme différente qui peut servir de base à l'interprétation.

Avec une équipondération des faces intérieures, et en plaçant le curseur de segmentation sur la valeur 60, ce qui sélectionne les éléments d'ouverture ayant

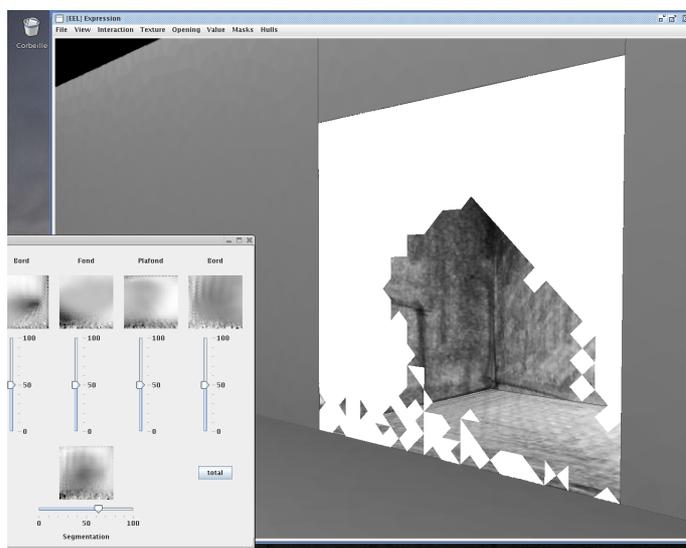


FIG. 6.26 – Choix de la forme d'ouverture à interpréter.

une évaluation inférieure ou égale à 60% de la plus mauvaise évaluation, nous constatons l'apparition d'une forme d'ouverture entre le coin en bas à droite et le centre de la face d'ouverture (fig. 6.26). Cette forme va servir de base pour l'interprétation de l'architecte. Précisons que l'effet d'inversion, que l'on remarque entre la carte d'évaluation et la sélection dans la scène 3d, est dû au fait que la carte est vue de l'intérieur.

6.2.5 Interprétation de la solution

Suite à l'étape de sélection des sources, une forme d'ouverture a commencé à se dessiner. Le concepteur intervient alors pour interpréter cette sélection selon sa sensibilité (fig. 6.27). Une simulation d'éclairage avec Solene permet de confronter la distribution de lumière incidente avec les distributions données en entrée du modèle de simulation inverse (fig. 6.28). Une simulation d'éclairage par lancer de rayon permet au concepteur de comparer le rendu photoréaliste de la scène avec ses attentes au niveau de l'éclairage du volume (fig. 6.29 & 6.31).

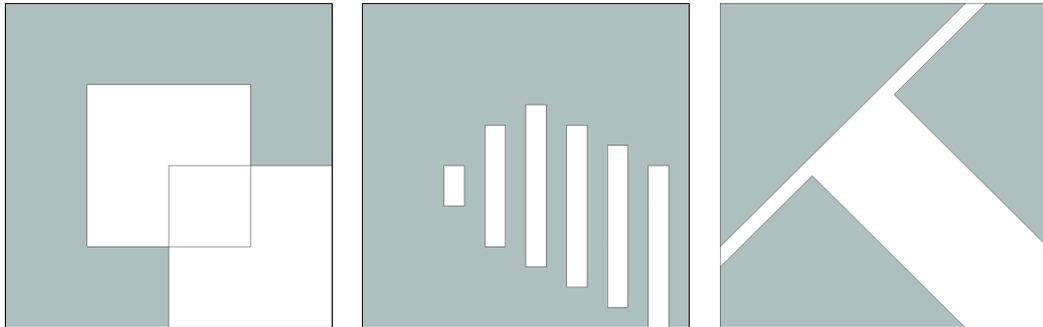


FIG. 6.27 – Interprétations architecturales de la sélection des ouvertures.

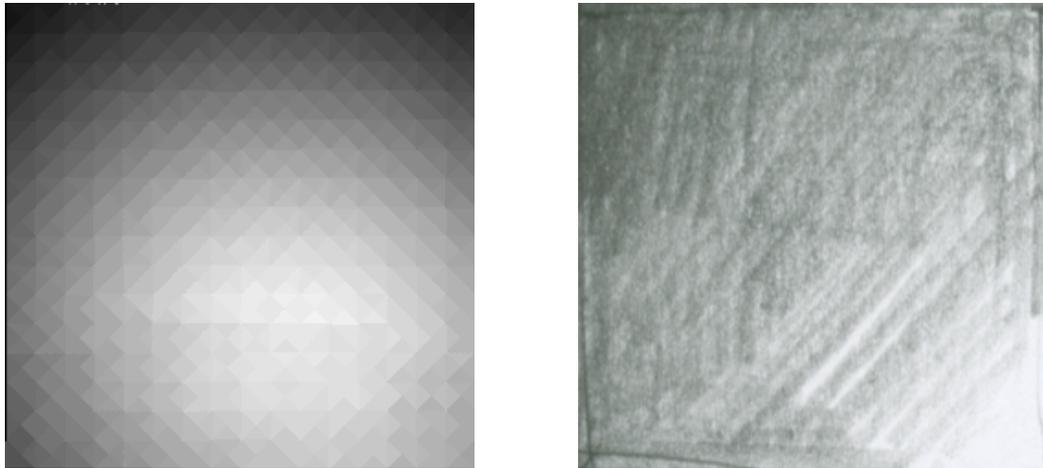


FIG. 6.28 – (gauche) Distribution d'éclairement au fond calculée avec Solène. (droite) Rappel de l'intention au fond.

Nous constatons que le sol de la pièce situé vers l'ouverture est bien évidemment plus éclairé que le coin supérieur droit. Il est très difficile avec une ouverture proche du sol d'obtenir la distribution souhaitée dans les intentions. Cependant, nous constatons que l'idée principale de l'intention, à savoir, « un coin de lumière et un coin d'ombre » de la figure 6.20, est respectée (fig. 6.30 & 6.32).

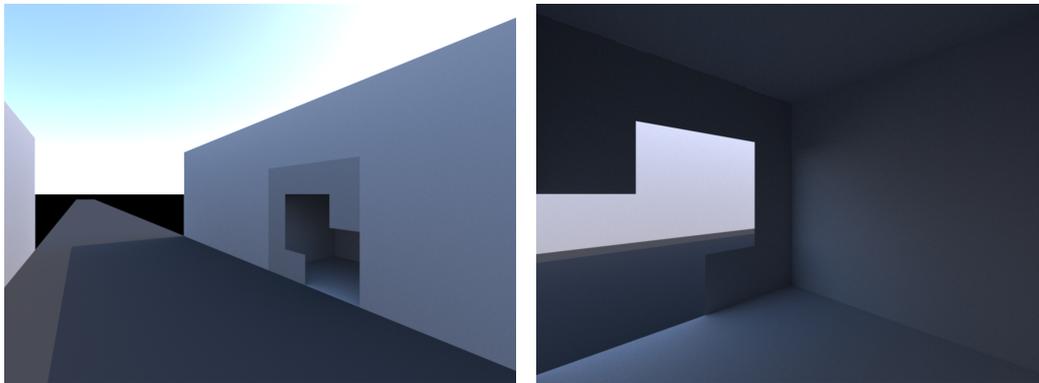


FIG. 6.29 – (gauche) Vue extérieure de la première interprétation. (droite) Vue intérieure.

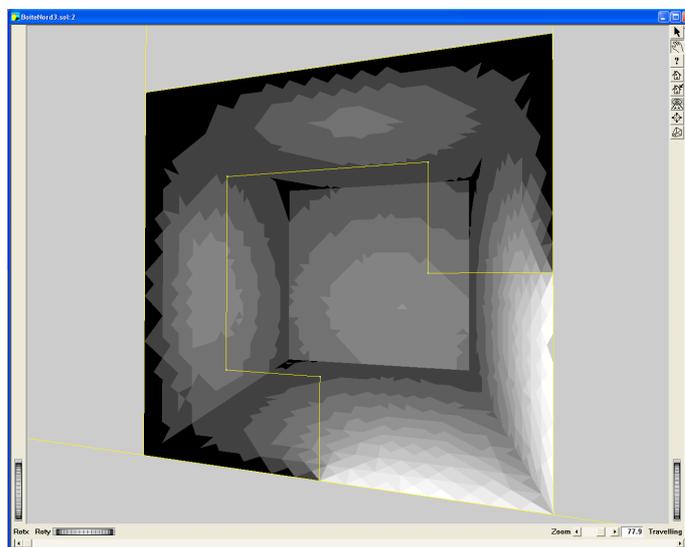


FIG. 6.30 – Simulation de l'éclairage dans Solene avec la première interprétation.

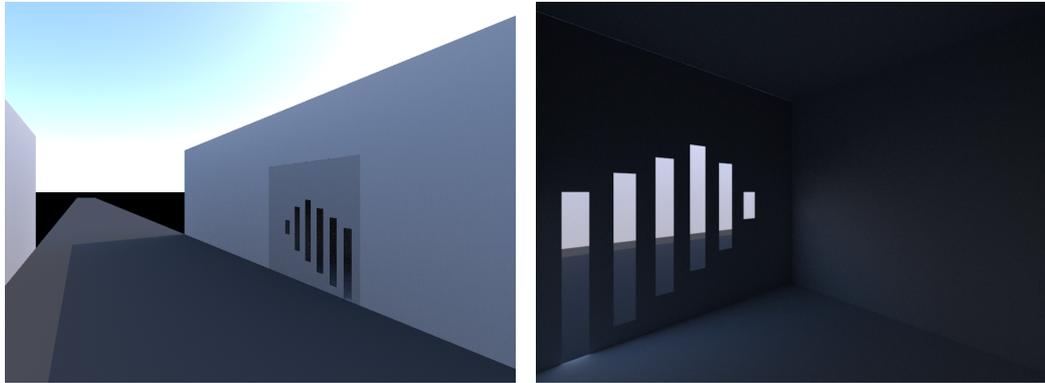


FIG. 6.31 – (gauche) Vue extérieure de la deuxième interprétation. (droite) Vue intérieure.

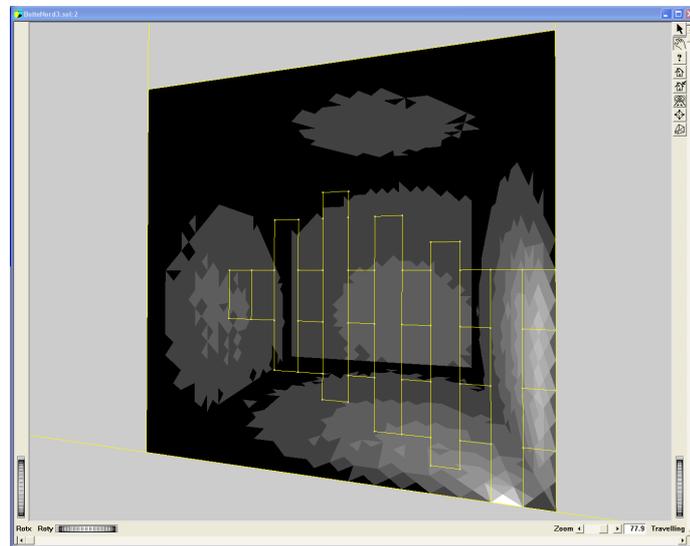


FIG. 6.32 – Simulation de l'éclairage dans Solene avec la deuxième interprétation.

6.3 Bilan

Nous avons proposé un environnement de conception qui met en œuvre le principe de la conception par l'intention d'ambiance lumineuse. Cet environnement contient un module d'expression des intentions d'ambiance lumineuse et un module de traitement des intentions d'ambiance lumineuse.

Nous voyons plus en détail le bilan des éléments de notre proposition.

6.3.1 Expression des intentions d'ambiance lumineuse

L'interface d'expression propose une méthode graphique pour décrire certaines propriétés de l'éclairage : l'éclairement des surfaces, la direction globale de provenance de l'éclairage et le contraste entre les faces. L'expression des intentions à travers l'éclairement des surfaces est principalement utilisée dans les tests et le cas d'étude. La représentation photométrique est facilement lisible et donne une bonne idée de l'éclairement. Le cas d'étude a été fait avec des dessins d'intentions d'ambiance lumineuse numérisés pour la répartition de la lumière.

Les paramètres de description de l'éclairage naturel comme le contraste ou la direction n'ont pas été exploités ni dans les tests, ni dans le cas d'étude. Nous avons constaté lors du cas d'étude que l'architecte auquel nous nous sommes adressés a préféré faire une description spatiale de l'éclairement, proche du dessin, sans utiliser des symboles abstraits. La direction est difficile à décorreler de l'espace étudié, et la notion de direction globale mal appréhendée. Le contraste n'a pas été utilisé en tant que tel, du à un manque de lisibilité de la représentation symbolique de cette propriété de l'éclairage. Les difficultés d'appropriation de l'interface de description par les concepteurs vient de la représentation trop peu explicite des paramètres non-perçus.

D'une manière générale, nous constatons aussi que la réaction trop lente de

l'interface pousse les concepteurs à exprimer leurs intentions avec des moyens traditionnels (crayon et papier) pour les intégrer ensuite dans le modèle.

6.3.2 Traitement des intentions d'ambiance lumineuse

Nous avons proposé une nouvelle méthode de simulation inverse de l'éclairage naturel, basée sur un modèle sténopé et une métrique d'image. Nous montrons qu'un problème de géométrie inverse relatif aux ouvertures d'un bâtiment peut être posé comme un problème de recherche d'émittance de sources. Notre méthode peut créer ou reconstruire des ouvertures, et constitue ainsi une aide à la conception architecturale. La faisabilité de la méthode est illustrée par la mise en œuvre et le test d'un environnement de conception. Le modèle remplit l'objectif principal, à savoir la prise en compte de la lumière incidente due à l'éclairage naturel. Le fait d'utiliser les informations liées à l'environnement rapproche cette méthode, qui est destinée à être intégrée dans un outil de CAAO, des systèmes d'information géographique. Dans cette optique, notre modèle devient un lien entre le projet architectural et le projet urbain.

Nous traitons simultanément les sources proches et les sources distantes, en assignant à chaque élément de l'environnement la valeur d'éclairement qu'il apporte dans le volume, puis en faisant une projection perspective pour obtenir la répartition de l'éclairement sur les faces intérieures. Nous montrons l'influence de l'environnement dans notre approche de la simulation inverse, à travers des tests de reconstruction d'ouvertures.

La prise en compte des propriétés photométriques des éléments d'ouverture lors de la simulation inverse n'est pas testée, mais ces propriétés sont intégrées dans le modèle théorique à travers le coefficient de transmission des éléments d'ouverture.

Cette méthode se décompose en trois étapes : génération des sources

anisotropiques, évaluation de leur contribution lumineuse et sélection des éléments d'ouverture.

Génération des sources

L'étape de génération des sources lumineuses intermédiaires calcule l'apport de lumière de chaque élément d'ouverture. Nous avons démontré que cette méthode constitue une simulation de l'éclairage incident qui s'approche des résultats obtenus avec notre simulation de référence.

Dans le calcul de l'évaluation de l'éclairement (éq. 5.7), la taille de l'élément d'ouverture est approximée par une convolution de la forme de l'élément d'ouverture sur l'éclairement. Cette opération est une prise en compte exacte de la taille de l'élément d'ouverture, si la face éclairée est parallèle à l'élément d'ouverture. Dans le cas contraire, cette convolution est une approximation, et l'erreur induite par cette approximation provoque des erreurs visibles dans la répartition de l'éclairement. Ces approximations génèrent des artefacts sur les bords du volume qui ont un impact critique sur la simulation inverse.

La représentation de l'éclairage par des images est peu efficace, tant au niveau de taille mémoire que de la rapidité d'exécution. Étant donné le caractère continu des répartitions d'éclairement, il serait nettement préférable d'opter pour une représentation par des fonctions en trois dimensions, comme une texture procédurale.

Le maillage de l'environnement fait apparaître des artefacts lors de la génération des sources. Un maillage adaptatif sur l'environnement améliorerait la génération des sources proches des bords du volume étudié.

Évaluation des sources

Nous avons préféré une évaluation basée sur l'écart type de l'erreur quadratique plutôt que sur l'erreur quadratique moyenne, car cette dernière ne répondait pas à nos attentes. L'évaluation des sources permet de distinguer les éléments d'ouverture qui apportent un éclairage au bon endroit, ceux qui n'apportent pas d'éclairage et ceux qui apportent un éclairage au mauvais endroit. Ce classement est suffisant pour produire une carte d'évaluation des éléments d'ouverture. Cette carte peut être un support pour la recherche graphique des formes d'ouverture, et de fait constitue à elle seule une aide à la conception.

Les tests de reconstruction avec la ou les bandes horizontales montrent qu'une description d'éclairage sur une seule face peut produire une évaluation proche de l'ouverture originale. Dans certaines conditions, notre méthode peut donc reconstruire une ouverture à partir de la description de l'éclairage sur une seule face.

Sélection des sources

Nous proposons d'une part une méthode de sélection interactive par une segmentation de la carte d'évaluation, et d'autre part une sélection automatique avec une mise à jour de la carte d'évaluation selon la sélection courante. La méthode interactive permet de proposer une méthode de résolution indirecte du problème de simulation inverse sans le principe prédiction-correction. Les éléments d'ouverture sont évalués une fois, puis sélectionnés, pour produire une solution d'ouverture interprétable. De plus, la méthode interactive a été jugée attrayante lors de notre cas d'étude.

Néanmoins, la sélection automatique reste une proposition théorique, qui aurait demandé une étude paramétrique pour être validée.

6.3.3 Discussion

Les méthodes qui prennent en compte l'éclairage naturel sont peu nombreuses. Seul le problème adressé par [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995] est proche de nos préoccupations, à savoir, un problème de géométrie inverse avec l'éclairage naturel. Nous reconnaissons que les solutions apportées par l'auteur sont précises et tiennent compte des réflexions internes. En revanche, nous sommes capables de proposer des formes d'ouvertures beaucoup plus variées que des rectangles. et nous ne sommes pas limités par un volume parallélépipédique. Bien que nous n'ayons pas montré un exemple pour illustrer ce fait, nous pouvons affirmer que notre méthode est valide pour tous les volumes convexes. En effet, l'orientation des surfaces intérieures par rapport à l'ouverture a une incidence sur la qualité de la génération des sources, et non sur le principe de simulation inverse.

Ce travail de recherche fait évoluer le projet de simulation inverse qui est à la base de notre démarche. À la prise en compte de l'ensoleillement proposée par [Siret, 1997] dans l'aide à la conception des ouvertures, nous ajoutons la lumière naturelle provenant du ciel et de l'environnement, à savoir des sources étendues, proches et distantes (soleil, ciel et environnement). Nous reconnaissons que notre gestion de la dimension temporelle par pas de temps est moins synthétique et précise que la méthode précédente. Cependant l'éclairage naturel n'autorise pas cette précision, surtout par ciel couvert. Une intégration de cette notion de continuité dans l'évolution du ciel pourrait permettre d'avoir aussi un aspect continu dans notre méthode. Une dimension urbaine est aussi ajoutée dans l'aide à la conception des ouvertures, par la prise en compte de l'environnement urbain dans le calcul d'éclairement. Cette notion rejoint la démarche de Nivet [Nivet, 1999] dans son travail sur la visibilité urbaine.

Nous pouvons aussi comparer notre méthode aux techniques de recherche d'émittance dans le cadre de l'illumination globale. Les méthodes citées dans

l'état de l'art [Schoeneman *et al.*, 1993, Marschner, 1998] utilisent un système d'équations linéaires pour modéliser le problème d'émittance inverse. Nous avons du mal à rivaliser avec ces méthodes sur l'aspect réaliste des résultats, car elles prennent en compte les réflexions intérieures. Toutefois, notre approche se distingue par le fait qu'elle gère les sources anisotropiques de lumière et qu'elle utilise le potentiel des cartes graphiques.

Enfin, nous pouvons discuter de la nature de l'aide que nous proposons aux architectes. Nous tentons de répondre au paradoxe évoqué par [Costa *et al.*, 1999a, Costa *et al.*, 1999b] sur le compromis à faire sur l'interface d'expression des intentions d'ambiance lumineuse, entre la facilité d'utilisation et la précision. L'idée d'une représentation photométrique pour représenter des propriétés non-perçues de la lumière est bien acceptée par les concepteurs. Cette représentation permet la révélation d'une partie de la structure sous-jacente du phénomène d'éclairage avec une approche graphique. Cependant nous remarquons que notre interface n'est pas très attractive pour les concepteurs qui préfèrent les outils graphiques traditionnels.

Nous avons évoqué la notion de qualité d'éclairage que nous n'avons pourtant pas traité dans notre modèle. Nous restons convaincus de l'importance de cet élément dans l'expression et le traitement des intentions. La méthode proposée par [Moeck, 2004] traite ce problème par la résolution d'un problème de satisfaction de contraintes. La validité de la méthode est démontrée avec l'éclairage d'un objet, et non l'éclairage d'un espace. L'auteur ne répond donc pas à la question de la conception architecturale, alors que c'est précisément au cours de la conception que la notion de qualité de l'éclairage pose problème. Dans notre approche, nous pourrions répondre à cette question par l'intégration de la lumière perçue dans l'expression des intentions d'ambiance lumineuse.

Conclusion

CETTE recherche constitue un lien entre une méthode traditionnelle, la conception par l'intention d'ambiance, et la CAAO, en utilisant des techniques issues de l'informatique graphique : la simulation inverse de l'éclairage. Notre principale contribution est un modèle de simulation inverse de l'éclairage qui tient compte de l'éclairage naturel intégrant la composante directe et la composante indirecte extérieure de la lumière naturelle.

Un problème

La notion de simulation occupe une place non négligeable dans le processus de conception architecturale. La simulation graphique est en effet utilisée lors de l'esquisse pour rechercher des solutions architecturales. La simulation de l'éclairage a donc toute sa légitimité dans ce processus, en tant que méthode d'aide à la conception. Néanmoins, si l'architecture adopte la démarche de la conception par l'intention d'ambiance, un problème survient lors de l'utilisation de la simulation de l'éclairage. En effet, la simulation de l'éclairage nécessite une définition du bâtiment, volume et matériaux, pour générer l'éclairage. Or, cet éclairage est justement la base du raisonnement de la conception par l'intention d'ambiance, et c'est lui qui conditionne les autres éléments du bâtiment.

La simulation inverse de l'éclairage est une réponse à ce problème, afin de bénéficier des avantages de la simulation lumineuse dans la démarche de

conception par l'intention d'ambiance. La simulation inverse de l'éclairage permet d'exprimer des intentions d'ambiance lumineuse sous la forme d'un éclairage souhaité, et de traduire cet éclairage en configuration spatiale.

Une proposition

Dans ce cadre, nous proposons un modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel, pour aider la définition des ouvertures du bâtiment. Les ouvertures ayant une influence déterminante sur la lumière incidente, nous focalisons notre recherche sur la composante directe et la composante indirecte extérieure de l'éclairage naturel. Ce modèle est défini et mis en œuvre dans un environnement de travail permettant l'expression des intentions d'ambiance lumineuse relatives à la lumière incidente, et la production de solutions interprétables.

La pertinence et les limites de notre modèle sont évaluées à travers des cas de test et un cas d'étude. Nous sommes en mesure de reconstruire des ouvertures à partir d'une distribution spatiale hétérogène de l'éclairement provenant d'une simulation directe. Nous montrons donc qu'un modèle sténopé associé à une métrique d'image constitue une méthode de simulation inverse de l'éclairage naturel. Ce modèle tient compte simultanément du ciel, source lumineuse distante, et de l'environnement du bâtiment, source lumineuse proche. C'est à notre connaissance le seul modèle capable de gérer simultanément ces deux types de source, proche et distante.

Des perspectives

Nous distinguons les perspectives à court terme qui vont venir compléter et renforcer la méthode proposée, des perspectives à long terme destinées à ouvrir notre modèle sur des thèmes de recherche connexes.

L'interface d'expression des intentions d'ambiance lumineuse, et en particulier les aspects concernant la visualisation d'information et l'ergonomie, nécessite plus de recherche pour être vraiment adaptée à la conception architecturale. Par exemple, une simulation de la lumière dans un milieu participant serait une possibilité pour représenter la direction d'éclairage.

Nous avons vu que l'étape de génération des sources anisotropiques souffrait d'une approximation lors de la convolution, destinée à prendre en compte la taille de l'élément d'ouverture. Pour remédier à cette situation, il est nécessaire d'intégrer une convolution adaptative, dont l'élément de convolution évoluerait selon la distance entre la zone éclairée et l'élément d'ouverture.

Nous utilisons l'erreur quadratique pour mesurer la distance entre les éclairagements. L'exploration d'autres métriques d'images est tout à fait envisageable pour affiner l'évaluation des éléments d'ouverture. Par exemple, la prise en compte de la sensibilité de l'œil au contraste spatial ou temporel pourrait donner plus de pertinence à l'évaluation des éléments d'ouverture.

En ce qui concerne l'étape de sélection des éléments d'ouverture, il apparaît qu'une méthode de sélection interactive avec une mise à jour de la carte d'évaluation serait préférable. La mise en place d'une telle solution nécessite d'éprouver la méthode de sélection automatique, pour l'intégrer dans la méthode de sélection interactive. L'introduction de méthodes combinatoires efficaces, associées à une étape d'évaluation optimisée, est une évolution possible pour mettre en place cette solution.

La notion de filtre-connecteur, que nous avons présenté dans le contexte de cette recherche, peut être approfondie. L'ouverture est un élément de liaison car elle apporte la lumière naturelle, mais aussi un élément de transformation, car elle pose sa marque sur cette lumière naturelle à travers les dispositifs de régulation de l'éclairage. Nous pouvons, par exemple, utiliser la notion de

CONCLUSION

direction de provenance de l'éclairage, pour définir plus précisément les propriétés photométriques des éléments d'ouverture. L'ouverture pourrait alors laisser passer la lumière dans certaines directions, et nous serions en mesure de produire des résultats sous forme de persiennes ou de rideaux. De plus, en considérant que chaque élément d'ouverture est indépendant, une ouverture peut filtrer la lumière dans différentes directions, selon la zone d'impact des rayons incidents, comme dans le cas des étagères à lumière. Le développement de la notion de filtre permettrait donc de couvrir un large panel d'ouvertures, et de se rapprocher des possibilités offertes aux architectes en termes de gestion de l'éclairage naturel.

Une méthode intégrant la notion de qualité d'éclairage, à travers la couleur ou le confort, peut venir compléter notre approche, et permettrait ainsi de proposer un environnement complet de conception par l'intention d'ambiance lumineuse. La méthode de [Moeck, 2004] serait compatible avec notre proposition pour intégrer les réflexions et les qualités de lumière dans l'interface d'expression. L'utilisation du lancer de rayons, comme méthode de propagation, peut aussi permettre l'intégration des réflexions, et donc de la composante indirecte intérieure de l'éclairage naturel. Nous pensons en particulier à une méthode de lancer de rayons qui utilise des surfaces virtuelles comme récepteurs et émetteurs de lumière [Fradin *et al.*, 2006].

Pour terminer ce mémoire, nous évoquons quelques perspectives à plus long terme pour étendre la portée de notre recherche.

Suite à l'amélioration de la robustesse de cette méthode par les évolutions citées précédemment, nous pourrions envisager la finalisation d'un outil de CAAO, afin d'évaluer cette méthode auprès des concepteurs, dans des situations réelles de conception. L'utilisation de cette méthode permettrait au concepteur de réaliser une véritable expérience de la conception par l'intention d'ambiance avec une méthode numérique. Ce dernier pourrait explorer ses propres solutions

architecturales à partir des solutions théoriques proposées par le modèle de simulation inverse. Par ailleurs, le couplage de ce modèle avec la simulation inverse de phénomènes physiques comme la thermique, par exemple, permettrait de compléter les possibilités de la méthode proposée.

Nous considérons dans cette recherche que les intentions d'ambiance lumineuse étaient présentes à l'esprit du concepteur, et que ce dernier voulait les exprimer. Mais qu'en est-il de la conception de cette intention d'ambiance lumineuse ? La conception par l'intention d'ambiance est basée sur le vécu, mais elle peut aussi se baser sur des références architecturales. L'accès à des références architecturales peut être une aide pour exprimer une intention d'ambiance lumineuse. La présence d'une base de données des bâtiments de référence, accessible lors de l'expression des intentions d'ambiance lumineuse, peut amorcer une aide à l'expression des intentions. Cette aide peut se concrétiser en donnant la possibilité d'intégrer directement certaines propriétés des bâtiments de références dans le modèle 3d, et ainsi faire un lien entre l'idée du concepteur et la géométrie du bâtiment.

Troisième partie

Annexes

Annexe A

Perception Visuelle

La perception visuelle est une chaîne complexe composée d'éléments physiques et psychologiques permettant d'acquérir et de traiter les informations visuelles. La représentation physique de la lumière est la base théorique permettant de décrire les sources lumineuses et la propagation de la lumière. Cette lumière est reçue par des capteurs sensoriels, qui sont des générateurs de sensations et le support de la perception visuelle. L'aspect psychologique de la perception concerne les traitements cognitifs que l'information subit le long de la chaîne de perception. Ces connaissances sur la perception visuelle sont appliquées en informatique graphique par le biais de la visualisation d'information.

A.1 Lumière

La représentation physique de la lumière, par des modèles et des phénomènes optiques, est le résultat de plus de vingt siècles d'interrogations. La définition de la lumière à l'heure actuelle peut se résumer à :

Lumière : n. f. Ensemble des rayonnements électromagnétiques visibles, c'est-à-dire susceptible d'être perçus directement par un œil

humain, dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 400 *nm* et 780 *nm*.

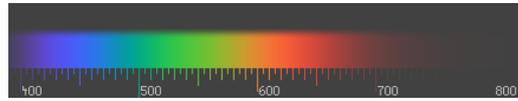
Modèles optiques

La nature de la lumière a été l'objet de nombreuses spéculations, essentiellement dues à la dualité onde-corpuscule de la lumière.

Optique géométrique Dans l'optique géométrique, la lumière est un ensemble de rayons formés de particules qui se déplacent en ligne droite. Les changements de directions sont calculés suivant des règles géométriques. Le modèle de l'optique géométrique repose sur deux lois fondamentales : le principe de la propagation rectiligne dans un milieu transparent, homogène et isotrope, et le principe du retour inverse. Les lois de Descartes, associées à ce modèle, permettent de décrire les phénomènes de réflexion et de réfraction. C'est le modèle utilisé en informatique graphique, quelle que soit la méthode employée pour simuler la lumière.

Optique ondulatoire Dans l'optique ondulatoire, la lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans le vide avec une vitesse finie. La lumière visible est caractérisée par une longueur d'onde entre 400 *nm* et 780 *nm*. Cet intervalle correspond aux couleurs du spectre visible (fig. A.1). Le modèle de l'onde scalaire (Huygens-Fresnel) permet d'interpréter les phénomènes de diffraction et d'interférences. Ce modèle a été ensuite amélioré par la mise en évidence de la nature électromagnétique de la lumière (Maxwell) pour prendre en compte les phénomènes de polarisation et de dispersion.

Optique quantique L'optique quantique est une reformulation de l'optique ondulatoire dans laquelle le champ électromagnétique est quantifié : la lumière

FIG. A.1 – Spectre visible (*Wikipedia*).

apparaît comme un flux discontinu de photons. L'optique quantique permet de modéliser de manière générale les interactions entre la lumière et la matière (émission, absorption). Cette théorie permet de concilier les aspects ondulatoires (phénomènes d'interférence, de diffraction, etc.) et corpusculaires (effet photoélectrique, émission spontanée, etc.) de la lumière.

Phénomènes optiques

Les phénomènes optiques sont des manifestations de la lumière, qui expliquent son comportement, et sont décrits par les modèles précédents.

Propagation Dans le modèle géométrique, la propagation de la lumière peut être vue au niveau macroscopique comme des particules se déplaçant en ligne droite. Ces lignes sont des rayons lumineux, qui forment des faisceaux lumineux lorsqu'ils sont regroupés.

Dans le modèle ondulatoire, la propagation de la lumière est une propagation d'onde dont la vitesse ($c = 299\,792\,458\text{ m/s}$) est une constante universelle. La polarisation est une propriété des ondes vectorielles, comme la lumière, et caractérise l'orientation de ses vecteurs autour de l'axe de propagation de l'onde (fig. A.2). Les phénomènes de réflexion et de réfraction peuvent transformer la polarisation de la lumière.

Interactions Lorsque la lumière rencontre un obstacle, des interactions apparaissent entre la lumière et la matière. De nombreux effets sont mis en

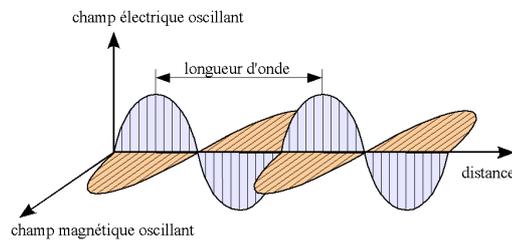


FIG. A.2 – Onde électromagnétique (*Wikipedia*).

évidence selon que la lumière est renvoyée, transmise, absorbée et selon la taille de l'objet rencontré. Ces interactions, qui transforment la lumière, nous permettent de voir les objets : lorsque les effets provoqués par un phénomène optique sont perceptibles, ils participent à la composition des effets visuels.

Réflexion La réflexion, en optique géométrique, suit les lois de Descartes. C'est la déviation d'un rayon par une surface parfaitement lisse qui renvoie ce rayon selon un angle égal à l'angle d'incidence .

Réfraction La réfraction suit aussi les lois de Descartes et caractérise le changement de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre. La déformation de l'aspect des objets dû à ce phénomène est à l'origine du mot réfraction (fracture).

Diffraction Le phénomène de diffraction est créé par la déviation des ondes lumineuses lorsqu'elles rencontrent un obstacle. Chaque point de l'obstacle diffuse l'onde qu'il reçoit, et la densité de l'onde n'est pas conservée selon les lois de l'optique géométrique. La diffraction d'une onde lumineuse dépend du rapport entre sa longueur d'onde et la taille de l'obstacle.

Absorption L'absorption correspond à la capture de photons par la matière. Ce qui peut se traduire par l'échauffement d'une masse de matière ou par la production d'un courant électrique. Par exemple, l'effet photoélectrique, mesuré en volt, est l'émission d'électrons par un matériau lorsque celui-ci est exposé à la lumière.

Émission L'émission de lumière est une libération d'énergie sous la forme de photons. On observe divers phénomènes d'incandescence ou de luminescence, suivant la nature de l'excitation qui apporte l'énergie nécessaire à la libération de photons.

A.2 Physiologie

Les composants biologiques du système visuel humain forment une chaîne de traitement de l'information lumineuse. Cette mécanique biologique permet d'appréhender les notions de distance, de perspective, de clarté ou de couleur [Hall, 1981, Ninio, 1991]. L'importance de la perception visuelle chez l'être humain a été démontrée par des arguments physiologiques, et plus précisément par l'évolution de la position des yeux dans la boîte crânienne et le développement des performances de l'œil [Gibson, 1986].

L'œil

Alhazen (956-1038) utilise déjà un modèle proche du modèle sténopé pour représenter l'œil. La preuve de cette idée est apportée par Scheiner en 1625, qui observe la formation de l'image rétinienne et démontre que l'œil est comparable à une chambre noire. Si l'on considère une modélisation simple de l'œil, l'iris joue le rôle de régulateur d'intensité, et le cristallin celui de lentille convergente.

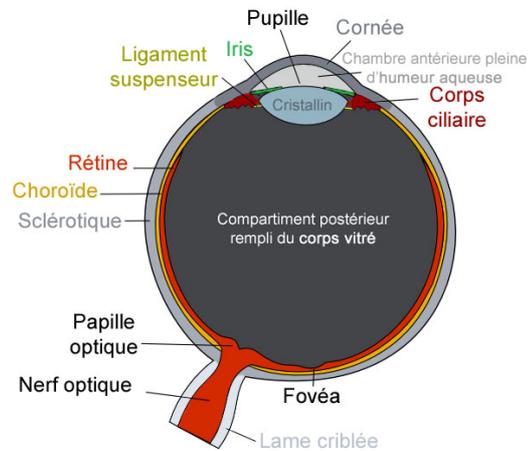


FIG. A.3 – Biologie de l'œil (*Wikipedia*).

Le cristallin adapte la mise au point entre deux distances (*punctum proximum* et *punctum remotum*) par sa déformation. La rétine est l'écran sur lequel l'image est projetée (fig. A.3).

Les photorécepteurs

Les caractéristiques de la rétine, récepteur de la lumière, conditionnent la transformation de l'énergie lumineuse en signal nerveux. La rétine opère une sélection des propriétés du signal selon la nature et la densité des photorécepteurs qui la composent. Ces photorécepteurs sont de deux sortes : les cônes et les bâtonnets. Les bâtonnets sont très sensibles à l'intensité lumineuse et à la totalité du spectre visible, ils sont répartis uniformément sur la rétine et permettent une vision nocturne en niveau de gris. Les cônes sont sensibles à de fortes intensités lumineuses, sur une partie du spectre visible (rouge, vert ou bleu) et permettent une vision diurne en couleur. La concentration des cônes est beaucoup plus importante dans la fovéa, zone de la rétine située en face du cristallin. La taille

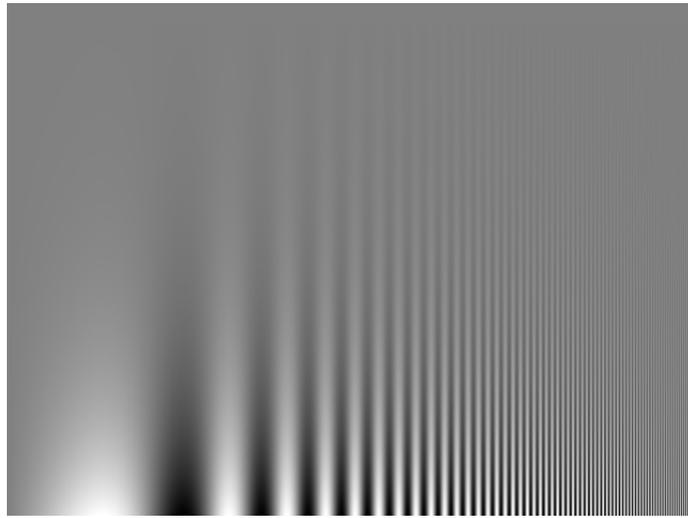


FIG. A.4 – Fonction de sensibilité au contraste spatial [Vis, 2007].

et la densité des cônes de la fovéa conditionnent la distribution de l'acuité du champ visuel.

Les photorécepteurs conditionnent aussi notre sensibilité aux contrastes, temporel et spatial. Les variations d'intensités temporelles très rapides perturbent le phénomène d'accommodation naturelle et peuvent créer un stress visuel. Les variations d'intensités spatiales sont détectées puis relayées aux éléments suivants dans la chaîne de traitement de la vision. Cette sensibilité au contraste spatial est illustrée par la charte de Robson-Campbell (fig. A.4).

Le cortex

Après le codage des signaux captés par l'œil, les informations lumineuses représentent des données brutes. C'est une grande masse d'informations qui est traitée par le cortex. Les lobes frontaux et pariétaux vont croiser, trier et compresser les informations venant des deux yeux. Certains éléments visuels sont directement révélés à ce niveau de la chaîne perceptive, comme la texture ou le mouvement. Certains mécanismes de vision demandent un apprentissage pour être

traité à ce niveau, par exemple : les relations apparence-matière, la permanence, la différenciation ou la relation distance-taille [Ware, 2004].

La condensation de la masse d'informations résulte en un nombre moins important d'informations qui sont spécialisées pour définir des sensations. Par exemple, l'éblouissement est dû à une trop forte intensité lumineuse à laquelle l'œil n'a pas pu s'adapter pour filtrer le surplus de lumière. La persistance rétinienne vient d'un « effet retard » des photorécepteurs qui transmettent des signaux en fonction de la lumière reçue précédemment. Nous avons évoqué auparavant les sensations de contrastes spatial et temporel, à ne pas confondre avec l'effet de contraste dont nous parlerons dans la partie Psychologie (A.3).

Photométrie

La photométrie a été créée en 1760 par Pierre Bouguer, bien avant que les mécanismes de vision soient décrits. C'est la mesure psychophysique de la sensation visuelle produite par le spectre électromagnétique. Les valeurs photométriques tiennent compte de la réponse visuelle de l'observateur.

Le flux lumineux F_λ d'un rayonnement monochromatique est lié au flux énergétique Φ_λ et à la perception des couleurs

$$F_\lambda = K_\lambda \cdot \Phi_\lambda \quad (\text{A.1})$$

K_λ est le facteur de visibilité spectral, il atteint sa valeur maximale pour $\lambda \approx 0,555\mu\text{m}$.

$$K_{0,555} = 680 \text{ lm/W} \quad (\text{A.2})$$

$$K_\lambda = K_{0,555} \cdot V_\lambda \quad (\text{A.3})$$

V_λ est le coefficient d'efficacité lumineuse spectrale de la radiation de longueur d'onde λ .

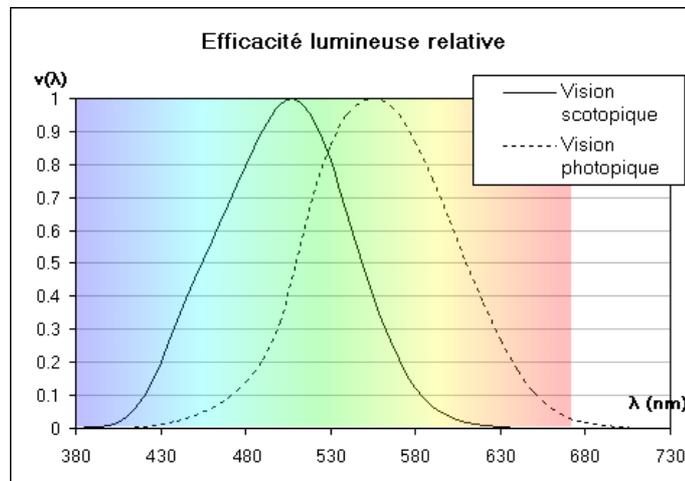


FIG. A.5 – Courbe de visibilité relative (Wikipedia).

La courbe de visibilité relative de l'œil (fig. A.5) représente la variation de l'efficacité lumineuse V_λ en fonction de la longueur d'onde λ . Le maximum de la fonction est situé vers $0,555\mu\text{m}$ en éclairage photopique (diurne), et aux environs de $0,5\mu\text{m}$ en éclairage scotopique (nocturne).

A.3 Psychologie

La perception est une sélection aussi bien physique que mentale des informations suivant leur intérêt. Cette sélection peut se faire par la concentration de l'attention sur des éléments particuliers de l'environnement. Une complétion des lacunes visuelles, par la mémoire ou l'expérience, vient s'ajouter à l'acquisition et au décodage d'informations : « *C'est le cerveau qui voit* » [Mueller et Rudolph, 1966]. L'aspect psychologique de la perception est expliqué par différentes théories, liées à la philosophie, à la théorie de la connaissance et à la biologie.

Psychophysique

Selon la loi de Weber (Weber, 1834) : des incréments relativement égaux de stimuli sont proportionnels à des incréments relativement égaux de sensations. Le modèle psychophysique de Fechner (1860) propose de formaliser la loi de Weber pour valider son hypothèse sur la relation fonctionnelle entre le corps et l'esprit. À l'opposé de Descartes qui comprend le corps comme une machine commandée par l'esprit, Fechner a une théorie monistique¹, et considère que le corps et l'esprit sont la représentation d'une même existence. Fechner a eu besoin d'établir une méthode pour mesurer l'intensité du travail intellectuel. Ses recherches ont abouti à l'élaboration de méthodes de mesures basées sur trois lois : la loi de Weber, la loi de Herbart et une loi logarithmique. La loi de Herbart affirme qu'il existe un seuil minimal de sensation. La loi logarithmique dans le modèle de Fechner indique que l'intensité de la réponse à une sensation est proportionnelle au logarithme de l'intensité du stimulus.

Phénoménologie

La « psychologie en acte » proposée par Brentano en 1874 est l'étude des phénomènes psychologiques et non du contenu des consciences. Les phénomènes psychologiques sont considérés comme des actes qui se rapportent à un objet, et qui sont liés à des intentions. Brentano est considéré comme le précurseur de la phénoménologie.

La phénoménologie [Husserl, 2000] est l'étude des phénomènes psychologiques : la conscience a connaissance d'elle-même et du monde et n'est pas seulement le récepteur des représentations de la réalité. Merleau-Ponty [Merleau-Ponty, 1945] se consacre à l'aspect perceptif de la phénoménologie, et

¹ Monisme : Doctrine selon laquelle tout ce qui est se ramène, sous les apparences de la multiplicité, à une seule réalité fondamentale, par opposition à dualisme, pluralisme. (Larousse)

en particulier aux phénomènes perceptifs qui sont en relation avec la création artistique.

Gestalttheorie

Littéralement, le terme *Gestalttheorie* signifie psychologie de la forme (M. Wertheimer 1912, W. Köhler 1929 et K. Koffka 1935, Guillaume 1979). C'est une théorie de la perception visuelle inspirée de la phénoménologie. Elle a une conception holistique des contenus de la conscience, et rejette le mécanisme associationniste qui décompose les contenus de la conscience.

Les notions de figure et de fond sont des notions fondamentales de la Gestalttheorie. La figure est l'objet sur lequel se focalise notre attention, alors que le fond est une sorte de support perceptif. La relation entre la figure et le fond, leur contraste et leur différence de couleur ou de texture, influencent directement les phénomènes perceptifs.

Écologie de la perception visuelle

Dans « L'approche écologique de la perception visuelle » [Gibson, 1986], la perception visuelle est un tout qu'on ne peut atomiser. Cette perception est simultanée et globale, et une approche fractionnaire ne donnera jamais un résultat satisfaisant. L'évaluation d'un environnement est dépendante du potentiel d'interaction, supposé ou connu : l'affordance.

La théorie des affordances de Gibson confirme le fait que notre perception est influencée par notre action potentielle.

A.4 Visualisation d'informations

Le terme visualisation est défini comme la représentation des informations sous forme graphique ou alphanumérique. Cette représentation est destinée à faire comprendre des phénomènes physiques, des abstractions mathématiques ou des objets numériques qui sont invisibles à nos yeux. Aussi la signification donnée à ce terme dans ce mémoire sera plus proche du mot anglais « visualization » qui peut se traduire par « comprendre par la vision ». En effet, une représentation n'a d'utilité que si les informations sont présentées de manière particulière afin d'en faire émerger du sens.

La visualisation d'informations est une discipline qui croise les champs de la biologie, de la psychologie et de l'informatique graphique. Elle peut être vue comme faisant partie des sciences cognitives.

Interaction

Pour reproduire la notion d'affordance dans un environnement numérique, la représentation d'informations doit indiquer implicitement l'idée d'interaction, d'action ou de mouvement. L'affordance participe au sentiment de présence qui fait que l'on se sent présent dans un lieu [Tahrani, 2006, Fuchs *et al.*, 2003].

Annexe B

Unités de la lumière

B.1 Valeurs d'éclairage

Les valeurs liées à l'éclairage sont exprimées par des unités photométriques (Physiologie A.2). Elles sont toutes basées sur le flux d'une onde électromagnétique (flux lumineux F), et ont leur équivalent radiométrique (Lumière A.1). Ces valeurs représentent la lumière reçue ou envoyée, par un élément de surface ou un point, dans une direction ou un ensemble de directions (Tab. B.1).

Grandeur	Unité SI	Équivalent radiométrie
Flux lumineux (F)	<i>lumen</i> (lm)	Flux énergétique
Intensité lumineuse (I)	<i>candela</i> ($cd = lm.sr^{-1}$)	Intensité énergétique
Éclairement (E)	<i>lux</i> ($lm.m^{-2}$)	Éclairement énergétique
Émittance (M)	$lm.m^{-2}$	Émittance énergétique
Luminance (L)	$cd.m^{-2}$	Luminance énergétique

TAB. B.1 – Unités photométriques SI

Intensité lumineuse I La candela (cd) est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 Hz et dont l'intensité énergétique est de $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$.

Flux lumineux F Le lumen (lm) est le flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme, placée au sommet de l'angle solide, et ayant une intensité lumineuse de 1 candela.

Éclairement E Le lux (lx) est l'éclairement d'une surface qui reçoit un flux lumineux de 1 lumen par mètre carré, d'une manière uniformément répartie.

Émittance M Le lumen par mètre carré ($lm\cdot m^{-2}$) est l'émittance d'une surface de 1 mètre carré qui émet un flux de 1 lumen. L'émittance énergétique est aussi appelée exitance.

Luminance L La luminance s'exprime en candela par mètre carré ($cd\cdot m^{-2}$). C'est la lumière émise dans une direction donnée par une surface dont l'aire apparente est de 1 mètre carré, et dont l'intensité est de 1 candela. La luminance est la seule grandeur perceptible par l'œil.

Bibliographie

- [Ble, 2007] Blender. Blender Foundation. <http://www.blender.org/>, Consulté le 26/06/2007.
- [Com, 2007] Commission internationale de l'Éclairage. <http://www.cie.co.at/>, Consulté le 27/06/2007.
- [Dee, 2007] Deeppaint3d. Right Hemisphere. <http://www.righthemisphere.com/>, Consulté le 26/06/2007.
- [Dia, 2007] Dial-europe. Estia SA - École Polytechnique Fédérale de Lausanne. <http://www.estia.ch/DIAL-EuropeE.html>, Consulté le 17/06/2007.
- [Ske, 2007] Sketchup. @Last Software. <http://fr.sketchup.com/>, Consulté le 26/06/2007.
- [Sun, 2007] Sunflow rendering system. <http://sunflow.sourceforge.net/>, Consulté le 02/08/2007.
- [Vis, 2007] Visual neuroscience laboratory (ohzawa lab). <http://ohzawa-lab.bpe.es.osaka-u.ac.jp/index-e.html>, Consulté le 16/07/2007.
- [Arvo, 1993] ARVO, J. (1993). Linear operators and integral equations in global illumination. *In Global Illumination, SIGGRAPH '93 Course Notes*, volume 42.

BIBLIOGRAPHIE

- [Augoyard, 1998] AUGOYARD, J.-F. (1998). Éléments pour une théorie des ambiances architecturales et urbaines. *Cahiers de la Recherche Architecturale (les)*, 42/43(42–43):13–23.
- [Augoyard et Torgue, 1995] AUGOYARD, J.-F. et TORGUE, H. (1995). *À l'écoute de l'environnement : répertoire des effets sonores*. Parenthèses.
- [Baker et Steemers, 2001] BAKER, N. V. et STEEMERS, K. A. (2001). *Daylight design in building*. James and James Publisher.
- [Bonhomme, 2005] BONHOMME, B. (2005). La poésie et le lieu. *Noesis*, 7. <http://revel.unice.fr/noesis/document.html?id=29>.
- [Chelkoff et Thibaud, 1992] CHELKOFF, G. et THIBAUD, J.-P. (1992). Les mises en vue de l'espace public. Rapport technique, Centre de recherche sur l'espace sonore et l'espace construit, École d'architecture de Grenoble.
- [Cohen et Wallace, 1993] COHEN, M. F. et WALLACE, J. R. (1993). *Radiosity and Realistic Image Synthesis*. Academic Press Professionnal.
- [Contensin, 2000] CONTENSIN, M. (2000). *Problème inverse d'éclairément en radiosité*. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée.
- [Contensin, 2002] CONTENSIN, M. (2002). Inverse lighting problem in radiosity. *Journal of Inverse Problems in Engineering*, 10(2):131–152.
- [Costa et al., 1999a] COSTA, A. C., SOUSA, A. A. et FERREIRA, F. N. (1999a). Lighting design : A goal based approach using optimization. *In Rendering Techniques*, pages 317–328.
- [Costa et al., 1999b] COSTA, A. C., SOUSA, A. A. et FERREIRA, F. N. (1999b). Optimisation and lighting design. *In WSCG'99 Proceedings*, pages 29–36.
- [Enrech-Xena, 1999] ENRECH-XENA, C. (1999). *Simulation de la lumière naturelle par des sources artificielles : enjeux architecturaux*. Thèse

- de doctorat, ISITEM (Institut des Sciences de l'Ingénieur en Thermique-Energétique et Matériaux) : Lash (Laboratoire des sciences de l'habitat).
- [Faucher et Nivet, 1998] FAUCHER, D. et NIVET, M.-L. (1998). Playing with design intents : Integrating physical and urban constraints in cad. *In ACADIA 98 proceedings : Do Computers Make a Difference in Design Studio ?*, pages 118–137.
- [Fontoynt, 1998] FONTOYNONT, M. (1998). *Daylight performance of buildings*. James and James Publisher.
- [Fournier, 1995] FOURNIER, A. (1995). From local to global illumination and back. *In Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering*, pages 127–136, Dublin, Ireland.
- [Fradin *et al.*, 2006] FRADIN, D., MENEVEAUX, D. et LIENHARDT, P. (2006). A hierarchical topology-based model for handling complex indoor scenes. *Computer Graphics Forum*, 25(2):149–162.
- [Fuchs *et al.*, 2003] FUCHS, P., MOREAU, G., ARNALDI, B., BURKHART, J. M., CHAUFFAUT, A., COQUILLART, S., DUVAL, T., DONIKIAN, S., D'HUART, D. M., PALJIC, A., PAPIN, J.-P., STERGIOPOULOS, P., TISSEAU, J. et VIAUDELMON, I. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 1 Fondements et interfaces comportementales - Volume 2 Création des environnements virtuels & applications*. Sciences Mathématiques et Informatique. Ecole des Mines de Paris, Paris.
- [Gardner, 1998] GARDNER, B. M. (1998). The grid sketcher : An autocad based tool for conceptual design processes. *In ACADIA 98 proceedings : Do Computers Make a Difference in Design Studio ?*, pages 222–237.
- [Gibson, 1986] GIBSON, J. J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates.

BIBLIOGRAPHIE

- [Glaser *et al.*, 2003] GLASER, D., VOUNG, J., XIAO, L., BONNIE TAI, M. S. U., CANNY, J. et DO, E. Y.-L. (2003). Lightsketch : A sketch-modeling program for lighting analysis. In *CAAD Futures 2003 Conference Proceedings*, pages 371–382. Kluwer Publisher.
- [Granvilliers et Benhamou, 2006] GRANVILLIERS, L. et BENHAMOU, F. (2006). Algorithm 852 : RealPaver : An interval solver using constraint satisfaction techniques. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 32(1).
- [Guéna et Untersteller, 2006] GUÉNA, F. et UNTERSTELLER, L.-P. (2006). Towards a sketching tool for architect : 3d reconstruction of polyhedrons. In BOURDAKIS, V. et CHARITOS, D., éditeurs : *24th eCAADe Conference Proceedings : Communicating Space(s)*. Education in Computer Aided Architectural Design in Europe and School of Engineering, University of Thessaly.
- [Ha et Olivier, 2006a] HA, H. N. et OLIVIER, P. (2006a). Explorations in declarative lighting design. In *Sixth International Symposium on Smart Graphics*, volume 4073.
- [Ha et Olivier, 2006b] HA, H. N. et OLIVIER, P. (2006b). Perception-based lighting design. In *Theory and Practice of Computer Graphics 2006*, pages 63–69.
- [Halin *et al.*, 2003] HALIN, G., BIGNON, J.-C., SCALETSKY, C., NAKAPAN, W. et KACHER, S. (2003). Three approaches of the use of image to assist architectural design. In *CAADRIA 2003 Proceedings*.
- [Hall, 1981] HALL, E. T. (1981). *La dimension cachée (The Hidden Dimension)*. Éditions du Seuil. Première édition 1978.
- [Hanrahan *et al.*, 1991] HANRAHAN, D., SALZMAN, P. et AUPPERLE, L. (1991). A rapid hierarchical radiosity algorithm. In *Computer graphics proceedings :*

- SIGGRAPH'91*, pages 197–207.
- [Harzallah, 2002] HARZALLAH, A. (2002). Les ambiances thermo-aérauliques de la villa baizeau à carthage, de hule corbusier. Mémoire de D.E.A., CERMA.
- [Heidegger, 1980] HEIDEGGER, M. (1980). *Essais et Conférences*. Gallimard. Première édition 1958.
- [Houpert, 2003] HOUPERT, S. (2003). *Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.
- [Huot et al., 2004] HUOT, S., DUMAS, C. et HÉGRON, G. (2004). Svalabard : Une table à dessin virtuelle pour la modélisation 3D. *In Actes de la 16ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM 2004*, pages 85–92, New York, NY, USA. AFIHM, ACM Press.
- [Husserl, 2000] HUSSERL, E. (2000). *L'idée de la phénoménologie - Cinq leçons*. Presses Universitaires de France. Première édition 1957.
- [Jensen, 2001] JENSEN, H. W. (2001). *Realistic image synthesis using photon mapping*. A K Peters, Ltd., Wellesley (USA).
- [Jolivet et al., 2002] JOLIVET, V., PLEMENOS, D. et POULINGEAS, P. (2002). Inverse direct lighting with a monte carlo method and declarative modelling. *In International Conference on Computational Science (2)*, pages 3–12.
- [Jung et al., 2003] JUNG, T., GROSS, M. D. et DO, E. Y.-L. (2003). Light pen – sketching light in 3d. *In CAAD Futures 2003 Conference Proceedings*, pages 327–338. Kluwer Publisher.
- [Kawai et al., 1993] KAWAI, J. K., PAINTER, J. S. et COHEN, M. F. (1993). Radioptimization - goal based rendering. *In Proc. of SIGGRAPH-93 : Computer Graphics*, pages 147–154, Anaheim, CA.

BIBLIOGRAPHIE

- [Kolarevic et Malkawi, 2005] KOLAREVIC, B. et MALKAWI, A. M., éditeurs (2005). *Performative architecture - Beyond instrumentality*. Spon Press.
- [La Greca et Daniel, 2006] LA GRECA, R. et DANIEL, M. (2006). A declarative system to design preliminary surfaces. *In WSCG'2006 Full Papers proceedings*, volume 80-86943-03-8, pages 17-24.
- [Latek, 2000] LATEK, I. (2000). Instruments et intentions du projet architectural. *In PAOLI, G. D. et TIDAFI, T., éditeurs : Modélisation architecturale et outils informatiques entre cultures de la représentation et du savoir-faire*, pages 9-16. Acfas.
- [Lebahar, 1983] LEBAHAR, J.-C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Parenthèses.
- [Madrazo, 1998] MADRAZO, L. (1998). Computers in architectural design : Going beyond the tool. *In ACADIA 98 proceedings : Do Computers Make a Difference in Design Studio ?*, pages 44-57.
- [Mahdavi et Berberidou-Kallikova, 1995] MAHDAVI, A. et BERBERIDOU-KALLIKOVA, L. (1995). A generative simulation tool for architectural lighting. *In MITCHELL, J. et BECKMAN, W. A., éditeurs : 4th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*, pages 395-402.
- [Marks et al., 1997] MARKS, J., ADALAMAN, B., BEARDSLEY, P. A., FREEMAN, W., GIBSON, S., HODGINS, J. K., KANG, T., MIRTICH, B., PFISTER, H., RUMML, W., RYALL, K., SEIMS, J. et SHIEBER, S. M. (1997). Design galleries : A general approach to setting parameters for computer and animation. *In SIGGRAPH'97 Conference Proceedings*, pages 389-400. Addison Wesley.
- [Marpillero, 2006] MARPILLERO, S. (2006). *JAMES CARPENTER : Environmental Refractions*. Princeton Architectural Press.

- [Marschner, 1998] MARSCHNER, S. R. (1998). *Inverse rendering in computer graphics*. Thèse de doctorat, Cornell University.
- [Marschner et Greenberg, 1997] MARSCHNER, S. R. et GREENBERG, D. P. (1997). Inverse lighting for photography. *In Proceedings of the Fifth Color Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology*, pages 262–265.
- [Martin, 1990] MARTIN, J.-Y. (1990). *Synthèse d'images à l'aide d'automates cellulaires*. Thèse de doctorat, Université de Rennes.
- [Merleau-Ponty, 1945] MERLEAU-PONTY, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard. 2003.
- [Miguet, 2000] MIGUET, F. (2000). *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.
- [Miguet et Groleau, 2002] MIGUET, F. et GROLEAU, D. (2002). A daylight simulation tool for urban and architectural spaces : Application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and Environment*, 37(8-9):833–843.
- [Millet, 1996] MILLET, M. S. (1996). *Light revealing architecture*. John Wiley and Sons. 351 pages.
- [Moeck, 2004] MOECK, M. (2004). Constraint satisfaction software for architectural lighting design : A case study. *Leukos*, 1(1):101–127.
- [Moles et Rohmer, 2006] MOLES, A. et ROHMER, E. (2006). *Psychosociologie de l'espace*. L'Harmattan, Condé-sur-Noireau (France). Première édition 1998.

BIBLIOGRAPHIE

- [Mudri, 1996] MUDRI, L. (1996). Aide à la conception de l'éclairage naturel dans la phase d'esquisse architecturale et son impact sur l'énergétique du bâtiment. Rapport technique.
- [Mueller et Rudolph, 1966] MUELLER, C. G. et RUDOLPH, M. (1966). *Light and Vision*. Time, inc., New-York.
- [Ninio, 1991] NINIO, J. (1991). *L'empreinte des sens : Perception, mémoire, langage*. Éditions Odile Jacob, Paris (France).
- [Nivet, 1999] NIVET, M.-L. (1999). *De Visu : un logiciel pour la prise en compte de l'accessibilité visuelle dans le projet architectural, urbain et paysager*. Thèse de doctorat, Université de Nantes. École d'architecture de Nantes.
- [Norberg-Schulz, 1997] NORBERG-SCHULZ, C. (1997). *L'Art du lieu : architecture et paysage, permanence et mutations*. Le Moniteur.
- [Nussaume, 2000] NUSSAUME, Y. (2000). *Tadao Ando et la question du milieu*. Le Moniteur.
- [Patow et Pueyo, 2002] PATOW, G. et PUEYO, X. (2002). A survey of inverse surface design from light transport behaviour specification. Rapport technique, Universitat de Girona, Institut d'Informàtica i Applications.
- [Patow et al., 2004] PATOW, G., PUEYO, X. et VINACUA, A. (2004). Reflector design from radiance distributions. *International Journal of Shape Modelling*, 10(2):211–235.
- [Poulin et Fournier, 1992] POULIN, P. et FOURNIER, A. (1992). Lights from highlights and shadows. *In Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 31–38.
- [Poulingeas, 2004] POULINGEAS, P. (2004). *Spécification déclarative de l'ambiance d'une scène*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, Faculté des sciences et techniques.

- [Quintrand *et al.*, 1985] QUINTRAND, P., AUTRAN, J., FLORENZANO, M., FREGIER, M. et ZOLLER, J. (1985). *La conception assistée par ordinateur en architecture*. Traité des Nouvelles Technologies Série - Assistance par ordinateur. Hermes, Paris.
- [Ramamoorthi et Hanrahan, 2001a] RAMAMOORTHI, R. et HANRAHAN, P. (2001a). Analysis of planar light fields from homogeneous convex curved surfaces under distant illumination. *In SPIE Photonics West : Human Vision and Electronic Imaging VI*, pages 195–208.
- [Ramamoorthi et Hanrahan, 2001b] RAMAMOORTHI, R. et HANRAHAN, P. (2001b). An efficient representation for irradiance environment maps. *In FIUME, E., éditeur : SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings*, pages 497–500.
- [Ramamoorthi et Hanrahan, 2001c] RAMAMOORTHI, R. et HANRAHAN, P. (2001c). A signal-processing framework for inverse rendering. *In FIUME, E., éditeur : SIGGRAPH 2001 Computer Graphics Proceedings*, pages 117–128. ACM Press / ACM SIGGRAPH.
- [Roy, 2000] ROY, G. G. (2000). A comparative study of lighting simulation packages suitable for use in architectural design. Rapport technique, School of Engineering, Murdoch University.
- [Sarradin, 2004] SARRADIN, F. (2004). *Analyse Morphologique des espaces ouverts urbains le long de parcours*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes.
- [Schoeneman *et al.*, 1993] SCHOENEMAN, C., DORSEY, J., SMITH, B., ARVO, J. et GRENNBERG, D. (1993). Painting with light. *In Proceedings of the 20th annual ACM Conference on Computer graphics and interactive Techniques (SIGGRAPH)*, pages 143–146. ACM Press.

BIBLIOGRAPHIE

- [Seitz *et al.*, 2005] SEITZ, S. M., MATSUSHITA, Y. et KUTULAKOS, K. N. (2005). A theory of inverse light transport. *In In Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV)*, volume 2, pages 1440–1447.
- [Shacked et Lischinski, 2001] SHACKED, R. et LISCHINSKI, D. (2001). Automatic lighting design using a perceptual quality metric. *Computer Graphics Forum*, 20(3):215–226.
- [Siret, 1997] SIRET, D. (1997). *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, ISITEM.
- [Sosnov *et al.*, 2002] SOSNOV, A., MACÉ, P. et HÉGRON, G. (2002). Semi-metric formal 3d reconstruction from perspective sketches. *In International Conference on Computational Science (2)*, pages 285–294.
- [Stannord, 1998] STANNORD, S. (1998). Computer in design : Exploring light and time. *In ACADIA 98 proceedings : Do Computers Make a Difference in Design Studio ?*, pages 26–35.
- [Tahrani, 2006] TAHRANI, S. (2006). *Vers un outil de réalité virtuelle pour l'analyse et la communication des ambiances lumineuses dans le projet urbain*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes.
- [Tanizaki, 1993] TANIZAKI, J. (1993). *Éloge de l'ombre*. Publ. orientalistes de France. Traduction René Sieffert, première édition 1933.
- [Tourre *et al.*, 2005] TOURRE, V., MARTIN, J.-Y. et HÉGRON, G. (2005). Représentation des intentions d'ambiance lumineuse architecturale dans les outils d'aide à l'esquisse. *In SCAN'05 : Role de l'esquisse architecturale dans les outils numériques*, pages 121–130. École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Val-de-Seine.

- [Tourre *et al.*, 2006a] TOURRE, V., MARTIN, J.-Y. et HÉGRON, G. (2006a). Architectural lighting ambience intentions for inverse rendering. In PLEMENOS, D., éditeur : *3IA'06 : Computer graphics and artificial intelligence*, pages 211–218.
- [Tourre *et al.*, 2006b] TOURRE, V., MARTIN, J.-Y. et HÉGRON, G. (2006b). Expression of luminous ambience intention in caad. In BOURDAKIS, V. et CHARITOS, D., éditeurs : *24th eCAADe Conference Proceedings : Communicating Space(s)*, pages 650–655. Education in Computer Aided Architectural Design in Europe and School of Engineering, University of Thessaly.
- [Tourre *et al.*, 2007] TOURRE, V., MARTIN, J.-Y. et HÉGRON, G. (2007). Inverse daylighting for opening design. In PAOLI, G. D., ZREIK, K. et BEHESHI, R., éditeurs : *Digital Thinking in architecture, civil engineering, archaeology, urban planning and design : finding the ways : Proceedings of EuropIA'11*, pages 343–351.
- [Vitruve, 1995] VITRUVÉ (1995). *Les dix livres de l'architecture*. Pierre Mardaga éditeur. Corrigés et traduit par Claude Perrault (1684).
- [Ward, 1994] WARD, G. J. (1994). The radiance lighting simulation and rendering system. In *ACM Siggraph'94 conference proceedings*.
- [Ware, 2004] WARE, C. (2004). *Information visualization : Perception for design*. Elsevier Publishing Company Limited, San Francisco.
- [Weinstock et Stathopoulos, 2006] WEINSTOCK, M. et STATHOPOULOS, N. (2006). Advanced simulation in design. *Architectural Design*, 76(2):54–59.
- [Yu *et al.*, 1999] YU, Y., DEBEVEC, P., MALIK, J. et HAWKINS, T. (1999). Inverse global illumination : Recovering reflectance models of real scenes

BIBLIOGRAPHIE

from photographs from. *In* ROCKWOOD, A., éditeur : *Siggraph99, Annual Conference Series*, pages 215–224, Los Angeles. Addison Wesley Longman.

[Yu et Malik, 1998] YU, Y. et MALIK, J. (1998). Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series):207–217.

[Zhou *et al.*, 2002] ZHOU, H., CHEN, M. et WEBSTER, M. F. (2002). Comparative evaluation of visualization and experimental results using image comparison metrics. *In* *VIS '02 : Proceedings of the conference on Visualization '02*, pages 315–322, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

Table des matières

Introduction	1
I Présentation du problème de simulation inverse de l'éclairage naturel	7
1 Contexte de la CAAO	9
1.1 Architecture et ambiance	11
1.1.1 Objet architectural	12
1.1.2 Éclairage naturel	15
1.1.3 Ambiance lumineuse	18
1.2 Conception architecturale	26
1.2.1 Le projet architectural	26
1.2.2 Outils de la conception architecturale	29
1.2.3 Ambiance et conception	38
2 Problématique	41
2.1 Aide à la conception	43
2.1.1 Nature de l'aide	43
2.1.2 Application à l'ambiance lumineuse	49
2.2 Questionnement	56

TABLE DES MATIÈRES

2.2.1	Expression de l'intention	56
2.2.2	Traitement de l'intention	60
2.2.3	Présentation des solutions	64
2.3	Objectifs	65
2.3.1	Conception par l'intention	65
2.3.2	Simulation inverse	66
3	État de l'art	67
3.1	Description de l'éclairage	70
3.1.1	Propriétés de l'éclairage	70
3.1.2	Interface de description	75
3.2	Simulation inverse de la lumière	82
3.2.1	Modélisation de la lumière	82
3.2.2	Types de problèmes inverses	86
3.3	Bilan de l'état de l'art	92
3.3.1	Description de l'éclairage naturel	92
3.3.2	Simulation inverse pour la conception architecturale . . .	93
3.3.3	Présentation des solutions	94
II	Une méthode d'éclairage inverse pour la conception architecturale	97
4	Positionnement	99
4.1	De l'intention à l'ouverture	102
4.1.1	Matérialisation des intentions d'ambiance lumineuse . . .	103
4.1.2	Aide à la conception des ouvertures	107
4.1.3	Application du principe de simulation inverse	111
4.2	Hypothèses	115

4.2.1	Visualisation des intentions d’ambiance lumineuse	116
4.2.2	Simulation inverse de l’éclairage naturel	119
4.3	Conclusion	122
5	Réalisation	123
5.1	Expression des intentions	127
5.1.1	Paramètres de description	128
5.1.2	Interface graphique	131
5.1.3	Descripteurs	134
5.1.4	Conclusion	138
5.2	Traitement des intentions	139
5.2.1	Génération des sources anisotropiques	141
5.2.2	Évaluation des sources	156
5.2.3	Sélection des sources	162
6	Résultats	167
6.1	Reconstruction d’ouverture	170
6.1.1	Une pièce orientée au nord	172
6.1.2	Dimension Temporelle	178
6.2	Cas d’étude	184
6.2.1	Expression de l’intention d’ambiance lumineuse	184
6.2.2	Génération des sources	185
6.2.3	Évaluation des sources	186
6.2.4	Sélection des sources	186
6.2.5	Interprétation de la solution	188
6.3	Bilan	192
6.3.1	Expression des intentions d’ambiance lumineuse	192
6.3.2	Traitement des intentions d’ambiance lumineuse	193

TABLE DES MATIÈRES

6.3.3 Discussion	196
Conclusion	199
III Annexes	205
A Perception Visuelle	207
A.1 Lumière	207
A.2 Physiologie	211
A.3 Psychologie	215
A.4 Visualisation d'informations	218
B Unités de la lumière	219
B.1 Valeurs d'éclairage	219
Bibliographie	221

Table des figures

1	L'intention d'ambiance dans l'esquisse.	2
2	La conception des ouvertures par l'éclairage.	5
1.1	Le phénomène physique d'éclairage naturel.	12
1.2	<i>Glass house</i> (1949) par Philip Johnson à New Canaan, États-Unis (Connecticut).	14
1.3	<i>London City Hall</i> (1998) par Norman Foster à Londres, Royaume-Uni.	15
1.4	Facteur de lumière du jour (<i>Wikipedia</i>).	16
1.5	Modalités d'un phénomène d'ambiance <i>in situ</i> [Augoyard, 1998]	20
1.6	<i>Church of light</i> (1989) par Tadao Ando à Osaka, Japon.	21
1.7	(<i>gauche</i>) Chapelle Notre-Dame du Haut (1950) par Le Corbusier à Ronchamp, France. (<i>droite</i>) Église Myyrmaki (1980) par Juha Leiviska à Vantaa, Finlande.	25
1.8	Couvent de la Tourette (1958) par Le Corbusier à Éveux, France.	25
1.9	Martyr de Saint Mathieu (1599 - 1600) par Le Caravage, Huile sur toile, 323 x 343 cm - Chapelle Contarelli, San Luigi dei Francesi, Rome (<i>Wikipedia</i>).	31
1.10	<i>Casa Batllò</i> (1904) par Antoni Gaudí à Barcelone, Espagne.	38
2.1	La conception par l'intention d'ambiance.	45
2.2	La simulation inverse de l'éclairage naturel dans la conception architecturale.	55
2.3	L'éclairage naturel en architecture.	61
2.4	Position de l'interface homme-machine dans la conception architecturale.	61

TABLE DES FIGURES

3.1	Composantes de l'éclairage naturel : directe (1), indirecte extérieure (2), indirecte intérieure (3).	71
3.2	Le rendu non-photoréaliste au cinéma : <i>Renaissance</i> (Copyright : ©Onyx Films / Millimages / Luxanimation / Timefirm Ltd / France 2 Cinema).	79
4.1	<i>Periscope window</i> [Marpillero, 2006] de James Carpenter (1995) à Minneapolis, États-Unis (Minnesota).	110
4.2	L'apport des éléments d'ouverture sur les face intérieures.	121
5.1	Étapes de l'environnement de conception.	125
5.2	Expression des intentions.	127
5.3	Croquis sur la répartition de lumière.	128
5.4	Croquis sur la direction d'éclairage.	129
5.5	Étude d'éclairage d'Alvar Aalto.	130
5.6	Aperçu de l'interface graphique.	131
5.7	Représentation de la direction globale d'éclairage.	132
5.8	Principe de représentation de la matrice temporelle.	133
5.9	Dessin de l'éclairage intégré dans la scène.	134
5.10	Représentation photométrique de l'éclairage.	135
5.11	Contrainte de contraste.	136
5.12	Graphe de contraste.	137
5.13	Traitement des intentions.	139
5.14	Principe de la simulation inverse.	140
5.15	Étapes de l'éclairage inverse.	141
5.16	Le modèle sténopé appliqué à l'éclairage intérieur.	142
5.17	Un élément d'ouverture sélectionné sur un maillage régulier.	143
5.18	Contribution lumineuse d'une facette du ciel à travers un élément d'ouverture.	144
5.19	Illustration de l'équation 5.8.	146

TABLE DES FIGURES

5.20	Illustration de l'équation 5.9.	147
5.21	Projection des facettes de l'environnement sur les faces intérieures.	147
5.22	Affectation des valeurs d'éclairément sur l'environnement.	148
5.23	Principe de génération des sources.	152
5.24	Projection sur le sol.	152
5.25	Projection sur le bord.	152
5.26	Simulation Solene sous ciel couvert E_{Sol} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord. . . .	153
5.27	Simulation modèle sténopé sous ciel couvert E_{Ste} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord.	153
5.28	Simulation Solene sous ciel clair E_{Sol} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord. . . .	154
5.29	Simulation modèle sténopé sous ciel clair E_{Ste} (de g. à d.) sol, bord, fond, bord.	154
5.30	Écart quadratique moyen entre Solene et le modèle sténopé.	154
5.31	Effet de bord dû à la convolution (de g. à d.) avant, après, différence.	155
5.32	Comparaison des évaluations selon la moyenne et l'écart type (gauche) Ouverture originale (centre) Évaluation selon la moyenne (droite) Évaluation selon l'écart type.	158
5.33	Comparaison des évaluations selon la moyenne et l'écart type (gauche) Ouverture originale (centre) Évaluation selon la moyenne (droite) Évaluation selon l'écart type.	158
5.34	Comparaison des évaluations selon la moyenne et l'écart type (gauche) Ouverture originale (centre) Évaluation selon la moyenne (droite) Évaluation selon l'écart type.	159
5.35	(gauche) Éclairément souhaité (centre) situation dans le volume (droite) carte d'évaluation.	161
5.36	Interface de sélection interactive.	163
6.1	Processus de reconstruction d'ouverture.	171
6.2	(gauche) Plan pièce au nord et rue. (droite) Axonométrie pièce au nord et rue. .	172

TABLE DES FIGURES

6.3	(a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement du ciel E_C .	173
6.4	(a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement du ciel E_C .	173
6.5	(a) Évaluation par rapport au sol (b) Évaluation par rapport au fond (c) Segmentation de la carte par rapport au fond.	174
6.6	(gauche) Vue extérieure de la pièce avec une ouverture en croix (droite) Vue intérieure.	175
6.7	(a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement E_C .	175
6.8	(a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation (c) Reconstruction avec l'éclairement $E_C + E_E$.	176
6.9	(gauche) Vue extérieure de la pièce avec une interprétation de la reconstruction (losange). (droite) Vue intérieure.	177
6.10	(gauche) Éclairement sur le mur avec l'ouverture en croix (droite) Éclairement sur le mur avec une interprétation de la reconstruction (losange).	177
6.11	(a, b, c) Intentions à 08h00, 12h00, 16h00.	178
6.12	(a, b, c) Cartes d'évaluation à 08h00, 12h00, 16h00.	179
6.13	(a) Ouverture originale (b) Carte d'évaluation globale (c) Segmentation de la carte globale.	179
6.14	(a, b, c) Re-éclairage avec l'ouverture reconstruite à 08h00, 12h00 et 16h00.	179
6.15	(a, b, c) Intentions à 08h00, 12h00, 16h00.	181
6.16	(a, b, c) Cartes d'évaluation à 08h00, 12h00, 16h00.	181
6.17	(a, b, c) Segmentation des cartes précédentes.	181
6.18	(a) Carte d'évaluation globale (b) Segmentation de la carte globale.	182
6.19	(a, b, c) Re-éclairage avec l'ouverture reconstruite à 08h00, 12h00 et 16h00.	182
6.20	Croquis d'intention : « un coin de lumière et un coin d'ombre ».	184

TABLE DES FIGURES

6.21	Le croquis transformé en textures.	185
6.22	Intégration des textures dans la scène 3D à l'aide de l'interface.	185
6.23	Évaluation de l'ouverture.	186
6.24	Sélection des éléments d'ouverture en mode interactif.	187
6.25	Variations de la sélection selon les pondérations des faces.	187
6.26	Choix de la forme d'ouverture à interpréter.	188
6.27	Interprétations architecturales de la sélection des ouvertures.	189
6.28	(gauche) Distribution d'éclairage au fond calculée avec Solène. (droite) Rappel de l'intention au fond.	189
6.29	(gauche) Vue extérieure de la première interprétation. (droite) Vue intérieure. .	190
6.30	Simulation de l'éclairage dans Solene avec la première interprétation. . . .	190
6.31	(gauche) Vue extérieure de la deuxième interprétation. (droite) Vue intérieure. .	191
6.32	Simulation de l'éclairage dans Solene avec la deuxième interprétation. . . .	191
A.1	Spectre visible (<i>Wikipedia</i>).	209
A.2	Onde électromagnétique (<i>Wikipedia</i>).	210
A.3	Biologie de l'œil (<i>Wikipedia</i>).	212
A.4	Fonction de sensibilité au contraste spatial [Vis, 2007].	213
A.5	Courbe de visibilité relative (<i>Wikipedia</i>).	215

TABLE DES FIGURES

Liste des Algorithmes

5.1	Génération des sources anisotropiques	149
5.2	Sélection des sources.	164

Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural

Ce travail de recherche concerne un modèle de simulation inverse de l'éclairage permettant la prise en compte de la lumière naturelle dans le projet architectural. Notre objectif est de développer une méthode numérique d'aide à la « conception par l'intention d'ambiance » qui s'apparente à la conception paramétrique. Cette recherche est focalisée sur la lumière incidente provenant de la voûte céleste et de l'environnement urbain.

Nous proposons une méthode qui concrétise les intentions d'ambiance lumineuse, par la production des propriétés géométriques et photométriques des ouvertures. Cette méthode s'attache tout d'abord à matérialiser les intentions d'ambiance lumineuse dans une scène 3d, par un rendu photométrique et des descripteurs graphiques. L'action sur ces descripteurs permet au concepteur d'exprimer ses intentions d'ambiance lumineuse à travers les paramètres physiques de l'éclairage.

Un modèle de simulation inverse de l'éclairage utilise ensuite ces paramètres physiques pour calculer les ouvertures. Le problème de la simulation inverse est posé comme une recherche d'émission de sources. Une comparaison d'images entre l'apport des sources lumineuses et l'éclairage souhaité, permet d'évaluer les propriétés des éléments d'ouverture, et par conséquent, de définir les ouvertures du bâtiment. Le modèle est validé par des tests de reconstruction d'ouverture. La confrontation à une situation réelle montre les possibilités d'intégration de cette méthode dans la conception architecturale.

Mots-clés : Éclairage inverse, éclairage naturel, CAO.

Inverse daylighting simulation for architectural design

This research project deals with an inverse lighting model taking into account daylighting in architectural project. Our goal is to propose a digital method to assist “design by ambience intention” which is close from parametric design. Our work focuses on incident light coming from sky vault and urban surroundings into the designed space.

We propose a method which concretizes lighting ambience intentions, by producing geometrical properties of openings. In first place, our method materializes lighting ambience intentions in a digital scene, with a photometric rendering and graphic descriptors. By using these descriptors, the designer is allowed to express his lighting ambience intentions through physical lighting parameters.

An inverse lighting model uses these physical parameters to compute opening shape and size. Inverse lighting problem is seen as a source emission research problem. An image comparison between source lighting and intended lighting allows to evaluate sources properties, and therefore to define building openings. This model is checked through opening reconstruction in test cases. Confrontation to real situations shows integration possibilities of our model in architectural design.

Keywords : Inverse lighting, daylighting, CAD.

Auteur : Vincent Tourre

Discipline : Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Architecture

N°ED : 0367-296