

# OUTILS INFORMATIQUES EN LUMIERE NATURELLE

Programme interdisciplinaire LUMEN

"Lumière naturelle et énergétique du bâtiment"

Projet NEFF 435.2



UNIVERSITÉ DE GENÈVE



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

# OUTILS INFORMATIQUES EN LUMIERE NATURELLE

Programme interdisciplinaire LUMEN  
"Lumière naturelle et énergétique du bâtiment"

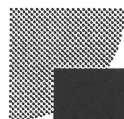
Projet NEFF 435.2

Prof. J.-L. Scartezzini	(CUEPE)	responsable du projet
R. Compagnon	(LESO-PB)	physicien
G. Ward	(LESO-PB)	informaticien
B. Paule	(CUEPE)	architecte

CENTRE UNIVERSITAIRE D'ETUDE  
DES PROBLEMES DE L'

**ENERGIE**

Ch. de Conches 4, CH-1231 GENEVE  
TEL: +41 22 789 1311 FAX: +41 22 789 25 38



**LESO**

Laboratoire d'Energie Solaire  
et de Physique du Bâtiment  
EPFL  
CH-1015 LAUSANNE  
TEL: +41 21 693 4545  
FAX: +41 21 693 2722

## RESUME

Ce projet a pour but d'élaborer des outils informatiques permettant de concevoir, d'étudier et d'évaluer des systèmes de gestion de lumière naturelle. Il s'inscrit dans le cadre du programme de recherche interdisciplinaire LUMEN, visant à une utilisation optimale de la lumière naturelle dans les bâtiments afin de réduire la consommation d'énergie électrique de ces derniers.

Dans le cadre de ce projet, un ensemble intégré de programmes de calcul d'éclairage naturel a été élaboré. Ce progiciel, dénommé ADELINÉ (Advanced Daylighting and Electric Lighting New Environment), a été mis sur pied dans le but de faciliter la tâche du concepteur en éclairage dans la pratique. Il a été adopté, comme plate-forme informatique sur le plan international (Agence Internationale de l'Energie), en vue de l'intégration d'autres programmes d'éclairage.

Le progiciel ADELINÉ permet de saisir les données géométriques d'un bâtiment à l'aide d'un programme de Conception Assistée sur Ordinateur (programme SCRIBE-Modeller). Une base de données, comprenant plus de 250 matériaux et revêtements différents, permet d'attribuer des propriétés photométriques aux surfaces du modèle de bâtiment.

Un programme simplifié de calcul d'éclairage, basé sur la méthode de radiosité (programme SUPERLITE), a été intégré à ADELINÉ. Gr ce à l'environnement informatique mis sur pied dans le cadre du projet, les données, décrivant le modèle de bâtiment, peuvent être automatiquement saisies par le programme. Les niveaux d'éclairément à l'intérieur de locaux de géométrie simple, ainsi qu'une visualisation de ces derniers, peuvent ainsi être obtenus.

L'effort principal de recherche a été consacré à l'adaptation d'un programme détaillé de calcul d'éclairage au problème de la lumière naturelle (programme RADIANCE). Ce programme, basé sur la technique du lancer de rayons, permet de visualiser les ambiances lumineuses à l'intérieur de bâtiments à l'aide d'images de synthèse. Il permet, par ailleurs, de calculer les performances lumineuses de systèmes de lumière naturelle sous la forme de :

- profils de facteur de lumière du jour
- indicatrices d'intensité
- diagrammes de transmission lumineuse bidirectionnelle
- fraction annuelle d'autonomie en éclairage naturel.

L'évaluation de l'inconfort visuel dans des conditions d'éclairage naturel peut aussi être réalisée à l'aide de ce programme; des routines de calcul d'indices d'éblouissement (CIE Glare Index par ex.) et de la fraction probable d'insatisfaits ont été intégrées à ce dernier. L'identification des sources potentielles d'éblouissement est effectuée au préalable par le programme.

# TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 Buts du projet.....	1
1.2 Démarche adoptée.....	1
<b>2. MODELISATION NUMERIQUE EN ECLAIRAGE NATUREL</b>	<b>4</b>
2.1 Problématique de la modélisation.....	4
2.2 Outils informatiques actuels.....	5
2.3 Structure du progiciel ADELINÉ.....	7
<b>3. MODELISATION DU BATIMENT</b>	<b>10</b>
3.1 Données géométriques.....	10
3.1.1 Fichiers d'entrée.....	10
3.1.2 Génération des fichiers d'entrée.....	11
3.1.3 Convertisseur de données géométriques.....	12
3.2 Données photométriques.....	18
3.2.1 Base de données.....	18
3.2.2 Attribution des données.....	20
3.3 Données climatiques.....	21
3.3.1 Définition du climat lumineux.....	21
3.3.2 Sélection des données.....	24
<b>4. PROGRAMME DE CONCEPTION ET DE DIMENSIONNEMENT</b>	<b>25</b>
4.1 Méthode de la radiosité.....	25
4.1.1 Principes de la méthode.....	25
4.1.2 Equations et algorithmes numériques.....	26
4.2 Développements numériques.....	32
4.2.1 Détermination des obstructions intérieures.....	32
4.2.2 Interface de sortie graphique.....	38
4.3 Calculs énergétiques.....	42
4.4 Validation.....	44
<b>5. PROGRAMME D'ETUDE ET D'ANALYSE</b>	<b>49</b>
5.1 Technique du lancer de rayons.....	49
5.1.1 Principes de base.....	49
5.1.2 Equations et algorithmes numériques.....	52

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Buts du projet

Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme de recherche interdisciplinaire LUMEN, visant à une utilisation optimale de la lumière naturelle dans les bâtiments [LUM89]; ce dernier repose sur la collaboration de trois disciplines :

- la physique du bâtiment
- l'ergonomie visuelle
- l'architecture

Il s'agit, grâce à une meilleure utilisation de la lumière naturelle, de réduire la consommation d'énergie électrique des bâtiments, tout en assurant les conditions de confort requises et en améliorant la qualité architecturale des espaces intérieurs.

Le but du projet est d'élaborer des outils informatiques permettant de concevoir, d'étudier et d'évaluer des systèmes de gestion de lumière naturelle; ceux-ci ont fait, jusqu'à aujourd'hui, cruellement défaut en Suisse, tant en recherche que dans la pratique.

Le projet s'articule autour de deux objectifs :

- mettre sur pied des programmes de calcul d'éclairage naturel (un programme simplifié et un programme détaillé);
- élaborer le 'lay-out' d'un troisième.

Ces logiciels, destinés principalement à assister le concepteur dans le cadre de la réalisation de systèmes de lumière naturelle, sont les suivants :

- programme de conception et de dimensionnement (programme simplifié);
- programme d'étude et d'analyse (programme détaillé);
- logiciel de transfert de connaissances (lay-out du programme).

Ce rapport présente l'ensemble des travaux informatiques, menés à bien dans le cadre de ce projet. Un second document fait état des travaux effectués pour développer parallèlement des outils expérimentaux de conception et de dimensionnement en éclairage naturel (Laboratoire de lumière naturelle) [Sca93b].

### 1.2 Démarche adoptée

Pour être efficace, l'utilisation d'outils de conception, d'étude et de dimensionnement en éclairage naturel doit intervenir au cours des

Une structure cohérente, réunissant les programmes de calcul d'éclairage naturel développé dans ce cadre, a été élaborée [Com91]. Cet ensemble intégré de logiciels, dénommé ADELINÉ (Advanced Daylighting and Electric Lighting New Environment), a été proposé au niveau international (Agence Internationale de l'Energie), comme plate-forme pour d'autres programmes de calcul d'éclairage. Des logiciels, développés par d'autres groupes de recherche (Allemagne, Danemark, Etats-Unis) ont ainsi été intégrés à ce dernier.

Ce rapport présente de façon détaillée, l'ensemble des travaux de développements numériques, menés à bien sur le plan suisse dans le cadre de ce projet. Un aperçu des travaux complémentaires, réalisés dans le cadre de la collaboration internationale (IEA SHC Task 12 : "Building Energy Analysis and Design Tools"), en ce qui concerne ADELINÉ, est donné dans ce document.

Le deuxième chapitre du rapport présente la structure de ce progiciel; une description des programmes, intégrés à ce dernier et élaborés dans le cadre du projet, est donnée aux chapitres 3, 4 et 5. Le chapitre 7 est consacré à la présentation du logiciel de transfert de connaissances en éclairage naturel (lay-out du programme).

Ces outils informatiques ont été appliqués, en particulier, à la conception et à l'évaluation des systèmes complexes de lumière naturelle suivants :

- les dispositifs prismatiques;
- les dispositifs anidoliques.

Le premier type de système est disponible dans la pratique sous forme de produits commerciaux; leurs performances lumineuses sont encore mal connues. Le second type constitue un concept d'éclairage naturel nouveau, proposé dans le cadre de ce projet, faisant appel à une technique optique utilisée pour les capteurs solaires à concentration [Win91]. Une présentation de ces systèmes fait l'objet du chapitre 6.

La liste des publications scientifiques issues du projet, ainsi que celle relative aux travaux complémentaires menés dans le cadre de la collaboration internationale, sont donnés à la fin de ce document.

complexe : elle nécessite une certaine expertise. Ces derniers sont nombreux et variés; ils comprennent en particulier :

- les caractéristiques du site d'implantation, comprenant le "gisement lumineux" (types de ciel, fréquences d'occurrence) et les obstructions environnantes (relief, bâtiments voisins);
- les données du projet architectural, décrivant l'affectation du bâtiment et ses principales caractéristiques (surfaces vitrées, volume des locaux);
- les contraintes liées aux usagers, comprenant les prescriptions en matière d'éclairage (fonction de l'affectation) et sur le plan du confort visuel (contraste de luminances);
- les propriétés physiques des composants du système (verres, miroirs, panneaux prismatiques) et des parois du local (coefficient de réflexion), influençant la propagation de la lumière.

Afin de rendre la conception et le dimensionnement de systèmes d'éclairage naturel possibles dans la pratique, l'élaboration d'un environnement informatique, permettant de faciliter la prise en compte de ces paramètres dans la modélisation (représentation du bâtiment, distribution de luminances du ciel, photométrie des matériaux, etc.), est indispensable. Il a pour principal avantage de permettre de ramener le niveau d'expertise, nécessaire à la réalisation de simulations numériques, à un degré acceptable par les concepteurs en éclairage.

## 2.2 Outils informatiques actuels

L'accroissement constant des performances des ordinateurs, ainsi que la chute de leur prix, ont favorisé l'utilisation de l'informatique dans le secteur de la construction. Le domaine de l'éclairagisme n'échappe pas à cette tendance : on recense un nombre important de logiciels de calcul d'éclairage [Sta92], une vingtaine de programmes étant disponibles en Suisse [Sca93a].

La plupart de ces programmes ne tiennent en aucune manière compte de l'éclairage naturel, ne serait-ce qu'au travers des vitrages. Une fraction infime de ceux-ci offre de réelles possibilités d'études de systèmes complexes d'éclairage naturel (panneaux prismatiques, déviateurs, etc.) [Sca90]. Ils sont, par ailleurs, inaccessibles aux praticiens, dans la mesure où :

- leur utilisation est, pour certains, strictement limitée à la recherche (institutions publiques);
- leur accès est, pour d'autres, strictement réservé à leurs auteurs (entreprises privées).

les données issues d'outils de CAO dans les formats requis par les programmes d'éclairage, s'avère donc plus intéressante en prévision d'une diffusion du progiciel dans la pratique.

La seconde approche a été adoptée lors de l'élaboration d'ADELINÉ; sa description fait l'objet du paragraphe suivant.

### 2.3 Structure du progiciel ADELINÉ

La structure du progiciel ADELINÉ est illustrée à la figure 2.2. Ce dernier est composé des logiciels suivants :

- un programme de Conception Assistée sur Ordinateur (Scribe-Modeller);
- un convertisseur de données (PLINK);
- une base de données photométriques (revêtements, matériaux);
- un programme simplifié de calcul d'éclairage naturel (SUPERLITE);
- un programme détaillé de calcul d'éclairage naturel (RADIANCE);
- un programme de liaison avec la simulation thermique (SUPERLINK).

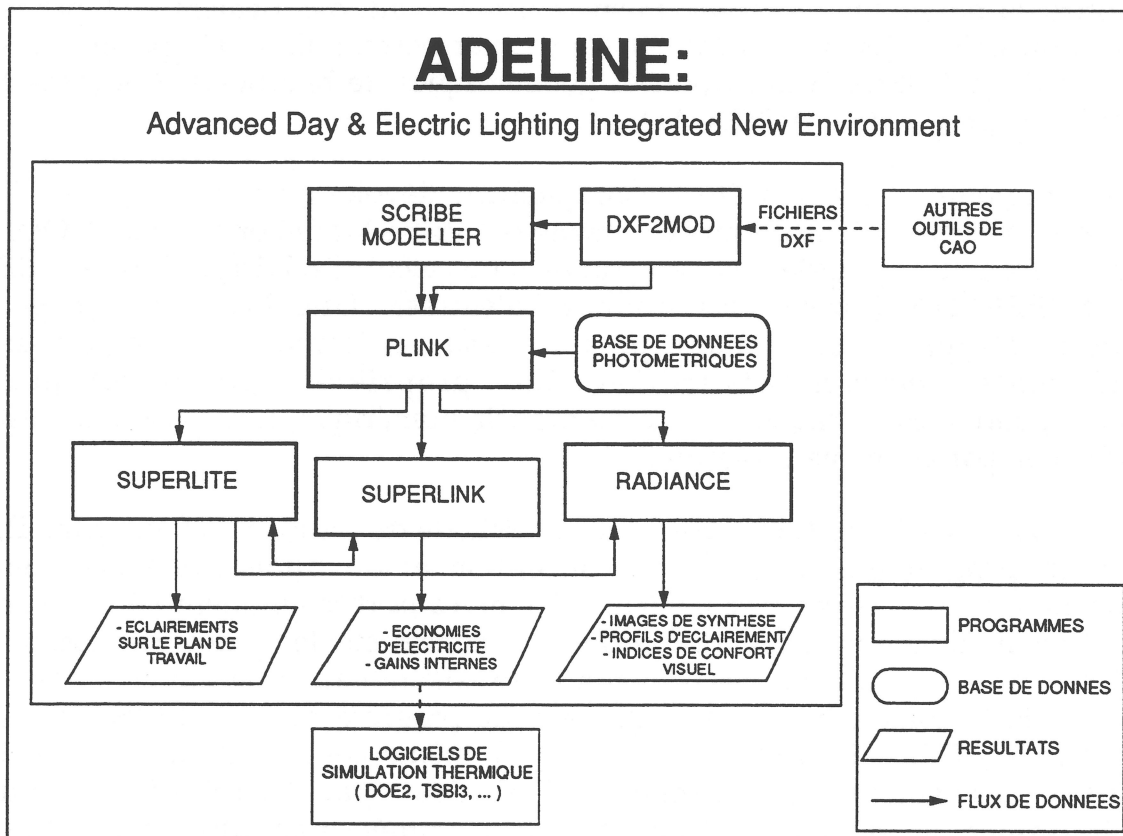


Figure 2.2 : Structure du progiciel ADELINÉ.



afin de mener à bien l'analyse énergétique détaillée du bâtiment (chaleur et électricité).

Le programme RADIANCE, qui fait appel à la technique du lancer de rayons (cf. chapitre 5), est un programme infographique avancé, qui permet de réaliser des études et des analyses détaillées en éclairage naturel. Ce programme permet d'obtenir des images de synthèse des locaux considérés (ambiances lumineuses), ainsi que des profils de facteurs de lumière du jour (grandeurs quantitatives). Une évaluation du confort visuel peut être obtenue par ailleurs.

L'ensemble du progiciel ADELIN est disponible dans une version pour ordinateurs personnels (PC), très répandus auprès des praticiens. Il est diffusé par l'intermédiaire de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) dans l'ensemble des pays-membres de l'organisation (collaboration internationale). Pour les besoins de la recherche, les programmes de calcul SUPERLITE et RADIANCE sont également disponibles sur stations de travail UNIX.

```

2 1 5 1 1
5 0 0 7 1 1 1
-0.068 0.145 3.865 1.07 0.0 1.07 ...
-1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 0 1 11 0 -1 -1
1 1.0 0.81 0.13 0
-0.068 0.145 4.928 1.07 0.0 1.07 ...
-1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 0 1 11 0 -1 -1
1 1.0 0.81 0.13 0
-0.647 1.387 3.865 1.07 0.0 1.07 ...
-1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 0 1 11 0 -1 -1
1 1.0 0.81 0.13 0
-0.647 1.387 4.928 1.07 0.0 1.07 ...
-1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 0 1 11 0 -1 -1
1 1.0 0.81 0.13 0
-1.251 2.683 3.865 2.21 0.0 2.21 ...
-1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 0 1 11 0 -1 -1
1 1.0 0.81 0.13 0
2.654 7.086 3.0 5.3 0.0 5.3 ...

0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 -1 1 11
-2.24 4.803 3.0 5.4 0.0 5.4 ...
0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 -1 1 11
4.894 2.28 3.0 5.4 0.0 5.4 ...
0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 -1 1 11
0.0 0.0 5.55 5.3 0.0 5.3 ...
...

void brightfunc parquet
2 0.6*rand(floor(Px/0.1+1))...
0
0
parquet plastic floor
0
5 0.309 0.165 0.083 0.03 0.1
# sloping plane edges
floor polygon poly1/70
0
0
12 0 0 0
5 0 0
5 7 0
0 7 0
# vertical window or wall
walls polygon vertical_plane1/20
0
0
12 0.001 0 0
0.001 7 0
0.001 7 3
0.001 0 3
...

```

**Figure 3.1 :** Portions de fichiers d'entrée pour SUPERLITE (à gauche) et RADIANCE (à droite).

Comme le montre la figure 3.1, le grand nombre de paramètres numériques, nécessaires pour décrire un modèle, rend cette tâche difficile et astreignante à effectuer à l'aide d'un éditeur de texte. A moins de disposer d'une certaine expérience, l'élaboration manuelle des fichiers d'entrée se limite généralement aux cas géométriquement simples (locaux rectangulaires, etc.); il y a donc une réelle nécessité d'élaborer d'autres techniques d'introduction de données d'entrée.

### 3.1.2 Génération des fichiers d'entrée

Il est communément admis, que l'utilisation d'outils de simulation numérique dans le domaine du bâtiment (thermique, aéraulique, éclairagisme), est fortement limitée par le niveau d'expertise nécessaire à l'introduction des données. Dès lors, si l'on veut favoriser l'emploi de ces outils, un meilleur interface avec l'utilisateur apparaît comme indispensable.

L'utilisation des possibilités graphiques interactives des ordinateurs actuels permet de développer des interfaces utilisateurs, appropriées à l'introduction de données géométriques complexes. Au moyen du clavier et/ou de la souris, l'utilisateur peut ainsi tracer son modèle et le visualiser en permanence à l'écran.

Deux approches ont été envisagées dans le cadre de ce projet :

- programmation d'une application dédiée au programme de calcul
- réalisation d'un convertisseur de données entre un outil de conception assistée par ordinateur (CAO) existant et le programme de calcul.

C'est finalement le format associé au programme de CAO Scribe-Modeller [Gre89] (format MOD), qui a été choisi. Son principal avantage réside dans sa simplicité, puisqu'il ne comprend qu'une seule entité élémentaire : la ligne. D'autre part, des attributs non géométriques (caractérisant par exemple des propriétés physiques) peuvent facilement être spécifiés pour chaque ligne au moyen de numéros de code.

Plusieurs liens ont déjà été réalisés entre Scribe-Modeller et d'autres programmes de simulations tirant ainsi profit de cet avantage :

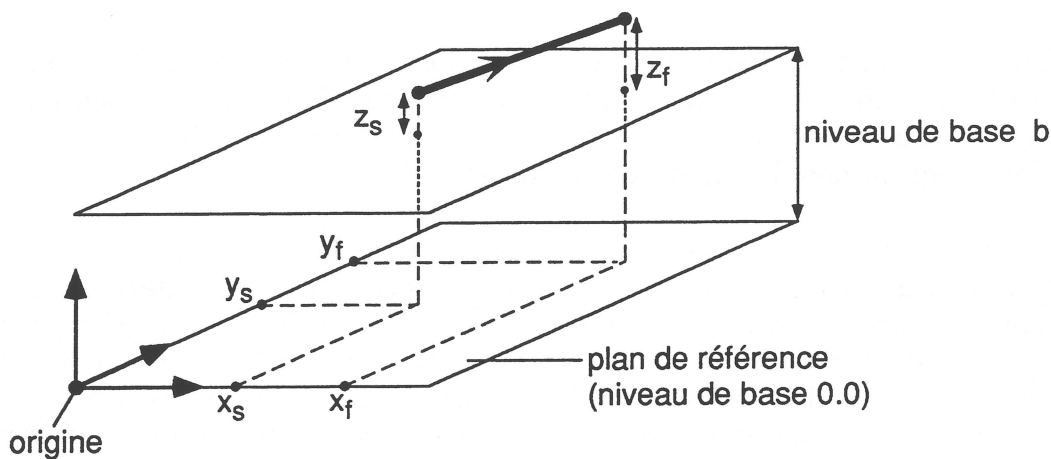
- SERI - RES (simulations thermiques)
- MODLUX (éclairage naturel)
- SPIEL (simulation thermique)

A chaque lien correspond un programme de conversion, qui interprète et traduit les données en format MOD, selon des conventions particulières.

### *Caractérisation d'une ligne*

Dans le format MOD une ligne est définie par les huit paramètres illustrés à la figure 3.2 :

- un numéro de code  $c$  (entier), identifiant un type d'objet et permettant d'y associer des propriétés physiques;
- un niveau de base  $b$  (réel), permettant de subdiviser les lignes du modèle en couches spatiales ou logiques;
- les coordonnées  $x_s$   $y_s$   $x_f$   $y_f$  (réels) du début et de fin de la ligne;
- les coordonnées  $z_s$   $z_f$  (réel) du début et de fin de la ligne, mesurées relativement au niveau de base.



**Figure 3.2 :** Paramètres géométriques définissant une ligne dans le format MOD. La flèche indique le sens dans lequel la ligne a été tracée.

En format MOD, des objets géométriques complexes tels que des cylindres, des cônes, des sphères peuvent être modélisés approximativement grâce à une décomposition en facettes polygonales. Etant donné que le programme RADIANCE permet de prendre en compte des objets géométriques de cette nature, des conventions supplémentaires ont été établies, afin de pouvoir décrire ces derniers dans le format MOD sans faire appel à une décomposition en facettes (nécessairement approximative). Ces conventions (cf. figure 3.4) portent sur les numéros de code à attribuer à certaines lignes caractérisant entièrement ces objets complexes (rayon d'une sphère, axe et rayon d'un cylindre par exemple). Le programme Scribe-Modeller ne permet malheureusement pas à l'utilisateur de visualiser de façon fidèle les objets géométriques en question, puisque dans le format MOD, ces derniers sont représentés uniquement à l'aide de lignes caractéristiques (rayon d'une sphère par exemple). L'inconvénient qui en résulte est mineur, puisque ce type d'objet n'est que rarement employé lors de modélisation de bâtiments.

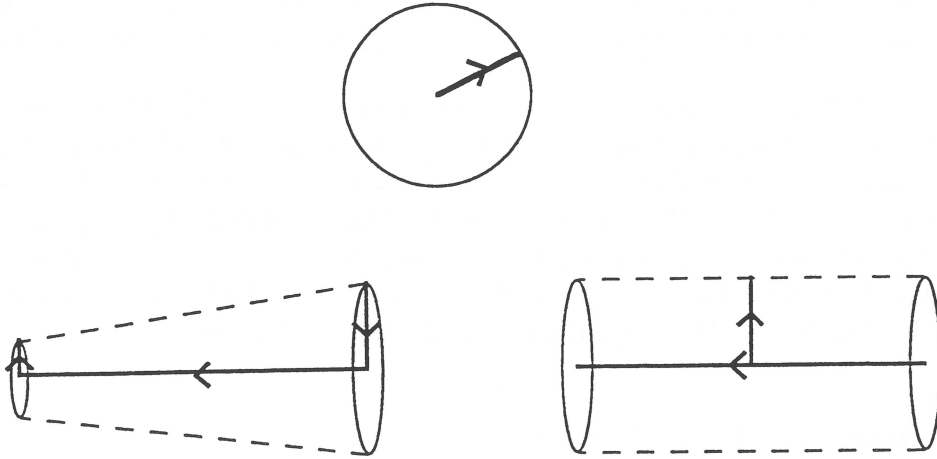


Figure 3.4 : Conventions adoptées pour définir des objets géométriques tridimensionnels complexes à l'aide de lignes caractéristiques.

*Point et direction de vue*

Pour réaliser des images de synthèse (programme RADIANCE), il est nécessaire de connaître les coordonnées du point et de la direction de vue de la "scène" que l'on désire visualiser par infographie. De façon à pouvoir introduire ces paramètres plus aisément, deux conventions ont été définies. Elles sont basées elles aussi sur l'utilisation d'un numéro de code particulier; la figure 3.5 illustre ces dernières.

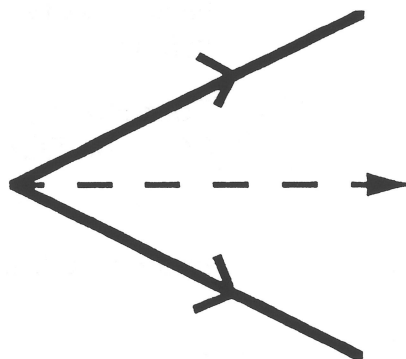
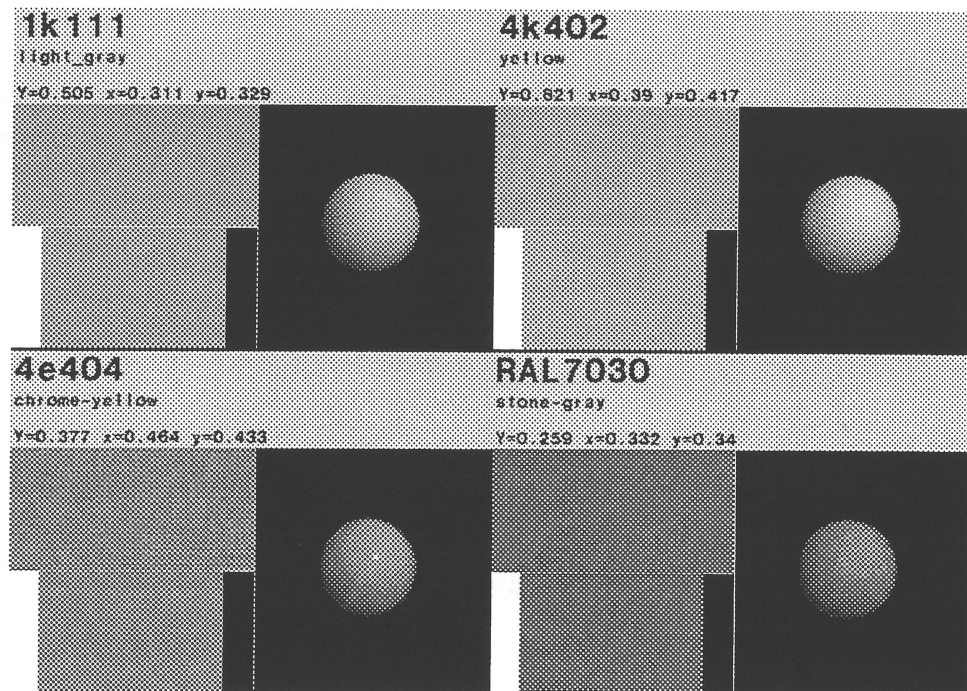


Figure 3.5 : Définition du point de vue, de la direction et de l'angle d'ouverture horizontal de vision à l'aide de lignes caractéristiques.

Afin de faciliter l'introduction de ces données par l'utilisateur, une base de données photométriques, décrivant les caractéristiques des revêtements et matériaux de construction les plus courants, a été élaborée. Cette base de données a été constituée à partir :

- d'un échantillon de couleurs pour peintures à la dispersion (nuancier pour peintures d'intérieur);
- d'une sélection de couleurs pour métaux et machines (nuancier pour peintures industrielles);
- d'une sélection de matériaux bruts (briques, tuiles, tôles métalliques, verres, etc.).

Cette base de données, comprenant près de 270 revêtements et matériaux différents est donnée à l'Annexe B. Elle est illustrée à la figure 3.6, représentant un échantillon de cette base de données. Le code, correspondant à la désignation VSLF (Union Suisse des Fabricants de Vernis et de Peintures) et RAL (désignation allemande), est indiqué pour chacune de ces couleurs (1 K111 désigne par exemple un gris pâle dans le code VSLF).



**Figure 3.6:** Échantillon du nuancier des couleurs de revêtement disponibles dans la base de données photométriques.

Ces données ont été établies à partir de mesures photométriques, effectuées sur des échantillons des différents revêtements et matériaux. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un chromamètre Minolta CR-210; la base de données est disponible en français, allemand et anglais.

### 3.3 Données climatiques

#### 3.3.1 Définition du climat lumineux

Pour simuler un espace éclairé par la lumière naturelle, il est nécessaire de connaître la répartition de luminances de la voûte céleste. Celle-ci dépend fortement des conditions météorologiques du moment (présence de masses nuageuses); l'utilisation de ciels de référence, représentatifs des situations météorologiques courantes (ciel couvert, ciel serein), est donc indispensable.

Différents modèles de ciel peuvent être pris en compte, aussi bien par SUPERLITE que par RADIANCE. La plupart d'entre eux sont des modèles théoriques, définis par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE); ces ciels de référence sont les suivants :

- ciel couvert isotrope (luminance constante);
- ciel couvert CIE (Moon et Spencer [Moo73]);
- ciel serein CIE (avec ou sans soleil [Cie73]).

Les figures 3.8 et 3.9 illustrent les deux ciels de référence, définis par la CIE, utilisés généralement dans les programmes d'éclairage naturel. Une présentation succincte des caractéristiques de ces ciels est donnée dans [Sca93b]; un exposé détaillé est donné dans les publications originales [Moo73], [Cie73].

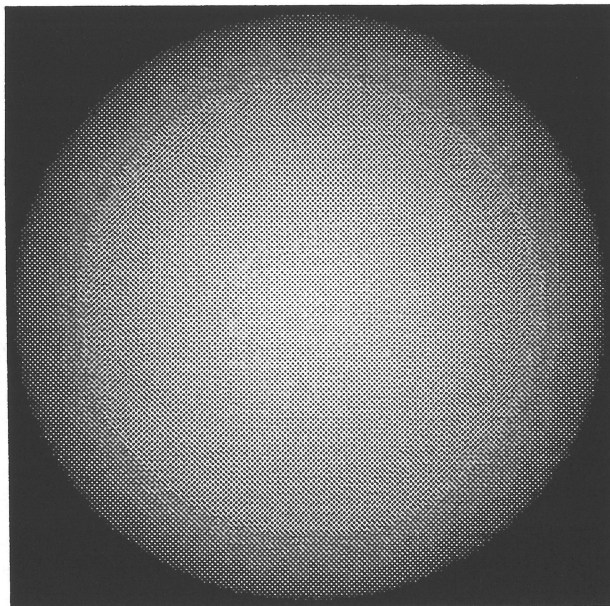


Figure 3.8 : Vue hémisphérique du ciel couvert CIE.  
La luminance du zénith  $L_z$  est trois fois plus élevée que celle de l'horizon.

Les relations, implantées dans les programmes et exprimant la luminance zénithale  $L_z$  sont les suivantes :

- SUPERLITE :

$$L_z = (1.34 \cdot T - 3.46) \cdot \tan h + 0.1T + 0.38 \quad [\text{cd/m}^2]$$

- RADIANCE :

$$L_z = (1.376 \cdot T - 1.81) \cdot \tan h + 0.38 \quad [\text{cd/m}^2]$$

avec  $T$  : coefficient de turbidité de l'atmosphère [-]

L'éclairement direct  $E_s$  fait intervenir la masse d'air optique  $m$  [-], dépendant essentiellement de la hauteur  $h$  du soleil sur l'horizon, ainsi que l'éclairement extraterrestre  $E_{se}$  ( $127 \pm 2$  klx) et le coefficient de turbidité  $T$  [Nav84]. Les expressions suivantes sont utilisées dans les deux programmes :

- SUPERLITE :

$$E_s = E_{se} \cdot \exp(-\alpha_R \cdot m(h) \cdot T) \quad [\text{lx}]$$

- RADIANCE :

$$E_s = E_{se} \cdot (1.147 - 0.147 / \sin h) \quad [\text{lx}]$$

### *Ciels statiques*

Le programme RADIANCE permet de prendre en compte n'importe quel type de ciel, du moment qu'un modèle numérique ou que des mesures sont disponibles à son sujet. C'est le cas des ciels statistiques, provenant de mesures de luminances du ciel (145 éléments circulaires répartis sur la voûte), effectuées à Genève dans le cadre du International Daylighting Measurement Programme (IDMP) [Mol93].

La figure 3.10 illustre deux ciels statistiques, reproduits à l'aide du programme, à partir de ces mesures. D'autres ciels statistiques peuvent être simulés (ciels mensuels moyens, dynamique journalière).



#### 4. PROGRAMME DE CONCEPTION ET DE DIMENSIONNEMENT

Un programme de conception et de dimensionnement en éclairage naturel doit pouvoir être mis à profit par le concepteur dans les phases initiales du projet. Pour atteindre cet objectif, ce programme doit être adapté aux solutions architecturales courantes (locaux de forme rectangulaire), facile d'utilisation (pas d'apprentissage fastidieux) et compatible avec le matériel informatique usuel (ordinateur personnel).

Un certain nombre de programmes, satisfaisant ces critères, ont été recensés pour ce qui concerne l'éclairage artificiel [SLG93]. La situation des programmes de calcul d'éclairage naturel est beaucoup plus défavorable : le nombre d'outils informatiques est restreint, peu d'entre eux sont disponibles au niveau européen.

Dans le but de corriger cette situation, et compte tenu des efforts importants consentis dans ce domaine aux Etats-Unis [LBL85], il a été décidé de poursuivre le développement d'un logiciel, issu d'un laboratoire scientifique national et considéré comme le plus performant du moment [SUP93]. Ce programme (SUPERLITE) fait appel à une technique de calcul numérique, issue du domaine de la thermique : la méthode de la radiativité. Une description de cette méthode et des développements réalisés en ce qui concerne ce programme est donnée ci-après.

##### 4.1 Méthode de la radiativité

###### 4.1.1 Principes de la méthode

La méthode de la radiativité traite des échanges radiatifs entre surfaces parfaitement diffusantes, formant un espace clos. Cette méthode, datant des années 1950, a été développée initialement dans le domaine de l'ingénierie thermique, pour le calcul des échanges de chaleur par rayonnement infrarouge. Le système d'équations résultant, pouvant se traduire en un réseau électrique résistif équivalent [Opp56], il était déjà possible de résoudre des cas comprenant de nombreuses surfaces au moyen de simulateurs analogiques.

Le programme SUPERLITE a été conçu au début des années 80 [Mod82], dans le cadre des programmes de recherche spatiale américains (problème de l'éclairage du laboratoire SPACELAB par le soleil). Adapté au calcul de l'éclairage naturel dans le bâtiment, il a été élaboré à partir de la radiativité, appliquée à la partie visible du rayonnement [Sca93].

Par rapport aux programmes de calcul d'éclairage existants (éclairage artificiel principalement), cette méthode offre de nombreux avantages : elle permet de calculer rigoureusement la composante de l'éclairage provenant des multiples interrélaxions de la lumière sur les parois d'un local (en lieu et place d'évaluations empiriques). Elle semble même s'imposer aujourd'hui dans le domaine de l'infographie [Gor84].

$g(\vec{x}_1, \vec{x}_2)$  est un terme géométrique dépendant de la présence éventuelle d'une obstruction entre les points  $\vec{x}_1$  et  $\vec{x}_2$

$$g(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \begin{cases} 0 & \text{en cas d'obstruction entre } \vec{x}_1 \text{ et } \vec{x}_2 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Examinons maintenant la radiance quittant l'élément  $dA_2$  dans la direction  $\vec{w}$ . En toute généralité celle-ci est composée de deux termes :

- une part émise par l'élément  $dA_2$ , traduisant son rayonnement propre;
- une part réfléchie, due à la présence de la facette  $A_1$ .

En utilisant la fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de réflexion (cf. annexe C), on peut donc écrire :

$$L_2(\vec{x}_2, \vec{w}) = \underbrace{L_2^e(\vec{x}_2, \vec{w})}_{\text{partie émise}} + \underbrace{\int_{A_1} f_{r2}(\vec{x}_2, -\vec{v}, \vec{w}) \cdot \frac{d\phi(\vec{x}_1, \vec{x}_2)}{dA_2}}_{\text{partie réfléchie}}$$

Dans cette dernière expression, l'effet global de la facette  $A_1$  est pris en compte par l'intégrale sur  $A_1$ . La radiance émise par l'élément  $dA_2$  est notée  $L_2^e$ .

On peut déterminer la radiance moyenne  $\bar{L}_2$  [ $W/m^2 \cdot sr$ ] quittant  $A_2$  dans la direction  $\vec{w}$  grâce à l'équation :

$$\begin{aligned} \bar{L}_2(\vec{w}) &= \frac{1}{A_2} \int_{A_2} L_2(\vec{x}_2, \vec{w}) dA_2 \\ &= \frac{1}{A_2} \int_{A_2} L_2^e(\vec{x}_2, \vec{w}) dA_2 \\ &\quad + \frac{1}{A_2} \int_{A_2} \int_{A_1} f_{r2}(\vec{x}_2, -\vec{v}_2, \vec{w}) \cdot d\phi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) \end{aligned}$$

On remarquera que le facteur de forme possède la propriété de symétrie suivante :

$$A_2 \cdot F_{21} = A_1 \cdot F_{12}$$

Pour un ensemble de N facettes  $A_i$  on obtient finalement le système d'équations linéaires suivant :

$$B_i = B_i^e + \rho_{di} \sum_{j=1}^N F_{ij} g(\vec{x}_j, \vec{x}_i) B_j$$

où  $B_i^e$  [W/m<sup>2</sup>] est l'exittance due à l'émission propre de la facette  $A_i$ , le second membre correspondant à la réflexion par cette facette de l'ensemble des flux d'énergie émis par les autres facettes reçu par  $A_i$ .

Sous forme matricielle ce système s'écrit :

$$\vec{B} = \vec{B}^e + \mathbf{A} \cdot \vec{B}$$

qui a pour solution formelle :

$$\vec{B} = (\mathbf{1} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \vec{B}^e$$

Des algorithmes numériques permettent de déterminer efficacement cette solution à l'aide de l'ordinateur [Sta90].

#### *Passage des unités radiométriques aux unités photométriques*

Toutes les équations ont été jusqu'ici exprimées en unités radiométriques; elles ne sont applicables, pour un intervalle de longueur d'ondes donné, que si les facteurs de réflexion diffuse sont constants sur ce dernier. Pour convertir ces équations en unités photométriques, telles qu'utilisées par le programme SUPERLITE, ces équations doivent être réécrites en termes spectrales, dépendant de la longueur d'onde et intégrées sur la plage des longueurs d'onde visibles (380 à 780 nanomètres). Une grandeur spectrique  $X_\lambda$  n'est rien d'autre qu'une grandeur radiométrique  $X$ , exprimée pour une longueur d'onde donnée  $\lambda$ .

*Algorithmes numériques*

La répartition de l'éclairement dans un local peut être déterminée à partir du vecteur solution  $\vec{B}$ . Un certain nombre d'étapes sont nécessaires pour calculer ce dernier; une description détaillée de ces étapes est donnée dans [Mod82], elles sont décrites brièvement à la table suivante.

Etape	Opération
1.	<p>Décomposition des surfaces du local en un nombre approprié de facettes, tel que les grandeurs photométriques soient uniformes sur ces dernières.</p> <p><i>Des facettes carrées de 0.1 à 0.5 m de côté sont généralement suffisantes.</i></p>
2.	<p>Calcul du vecteur <math>\vec{B}^e</math>, dont les composantes sont données dans le cas de la facette <math>A_i</math>, par l'équation :</p> $B_i^e = \rho_{di} (E_{ciel,i} + E_{soleil,i} + E_{obst,i})$ <p><math>\rho_{di}</math> = facteur de réflexion diffuse de la facette <math>i</math>  <math>E_{ciel,i}</math> = éclairement dû au ciel, incident sur la facette <math>i</math>  <math>E_{soleil,i}</math> = éclairement solaire direct, incident sur la facette <math>i</math>  <math>E_{obst,i}</math> = éclairement dû aux obstructions extérieures, incident sur la facette <math>i</math>.</p> <p><i>L'éclairement incident est calculé par lancer de rayons depuis chaque facette en direction des fenêtres et du soleil.</i></p>
3.	<p>Calcul des facteurs de forme <math>F_{ij}</math> et des facteurs d'obstruction <math>g(\vec{x}_i, \vec{x}_j)</math>.</p> <p><math>g(\vec{x}_i, \vec{x}_j)</math> est déterminé à l'aide du lancer d'un rayon axé sur le vecteur <math>\vec{x}_j - \vec{x}_i</math></p>
4.	<p>Calcul du vecteur solution <math>\vec{B}</math> par résolution du système d'équations linéaires.</p> <p><i>La résolution est obtenue par la méthode itérative de Gauss-Seidel</i></p>
5.	<p>Calcul des éclairements sur le plan de travail, décomposé en plusieurs facettes <math>A_w</math>, à partir de l'équation :</p> $E_w = E_{ciel,w} + E_{soleil,w} + E_{obst,w} + \sum_j F_{wj} B_j$ <p><i>Les éclairements incidents et les facteurs de forme sont calculés de la même manière que pour les facettes composant les surfaces du local.</i></p>

**Table 4.2:** Algorithmes numériques de calcul de l'éclairage naturel du programme SUPERLITE.

### Considérations générales

La figure 4.2 illustre les différentes possibilités d'obstruction entre des surfaces composant un modèle.

On relèvera tout d'abord que, si deux surfaces A et B se voient mutuellement, l'ensemble des obstructions potentielles entre ces surfaces n'est pas identique, si l'on considère le flux lumineux allant de A vers B, ou celui allant de B vers A. Cela provient du fait que chaque surface possède, pour SUPERLITE, une orientation bien définie : ainsi entre les surfaces A et B de la figure 4.2, la surface 1 appartient à l'ensemble des obstructions potentielles pour les flux allant de A vers B, exprimés par le terme  $g(\vec{x}_A, \vec{x}_B)$ . La surface 1 n'appartient pas à l'ensemble des obstructions comprises dans le terme  $g(\vec{x}_B, \vec{x}_A)$ , la surface n'étant pas visible de la surface B (elle est cachée par la surface 2). Un mur de partition doit, par conséquent, toujours être décrit au moyen de deux surfaces distinctes, pratiquement confondues mais orientées de façon opposée.

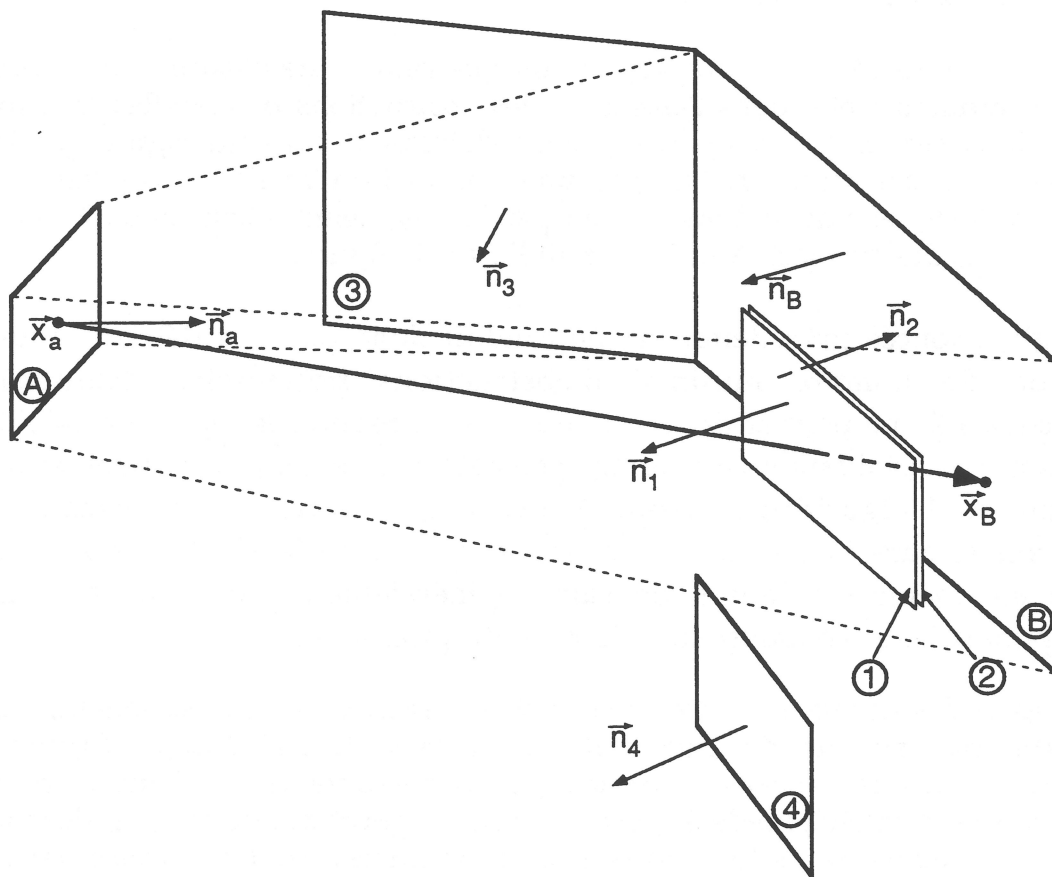


Figure 4.2 : Cas de figure possibles lors de la détermination des obstructions potentielles entre les surfaces A et B.

Mise en oeuvre

La première étape de l'algorithme consiste à déterminer les positions relatives des surfaces les unes par rapport aux autres. Quatre cas, illustrés à la figure 4.3, doivent être distingués.



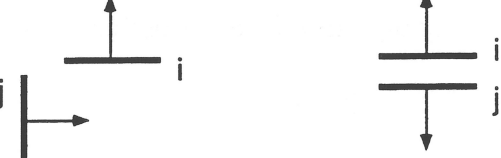
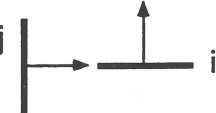
i et j sont coplanaires	
j est devant i	
j est derrière i	
j "croise" i	

Figure 4.3 : Qualification de la position d'une surface j par rapport à la surface i. Les exemples bidimensionnels illustrent les quatre cas possibles.

Pour un couple donné de surfaces (i, j), la position relative de j par rapport à i s'obtient en déterminant les vecteurs  $\vec{d}_c$  qui relient deux à deux les sommets des surfaces, et en examinant le signe des produits scalaires  $\vec{n}_i \cdot \vec{d}_c$  où  $\vec{n}_i$  est le vecteur unitaire normal à la surface i. L'algorithme suivant effectue cette tâche.

position de k par rapport à l	position de l par rapport à k	élément $v_{kl}$ résultant
devant	devant	visible
devant	derrière	invisible + obstrue
devant	croise	visible + obstrue
derrière	devant	invisible
derrière	derrière	invisible
derrière	croise	invisible
croise	devant	visible
croise	derrière	invisible + obstrue
croise	croise	visible + obstrue
coplanaires		invisible

Table 4.4 : Détermination des éléments  $v_{kl}$  de la matrice des visibilitéés à partir des positions relatives des surfaces k et l.

Pour le cas de la figure 4.2, la matrice de visibilité devient :

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix}
 \text{I} & \text{V} & \text{V} & \text{I} & \text{V} & \text{V} \\
 \text{V} & \text{I} & \text{I} & \text{V} & \text{V} & \text{I} \\
 \text{V} & \text{IO} & \text{I} & \text{I} & \text{VO} & \text{I} \\
 \text{IO} & \text{V} & \text{I} & \text{I} & \text{VO} & \text{I} \\
 \text{V} & \text{V} & \text{V} & \text{V} & \text{I} & \text{I} \\
 \text{V} & \text{IO} & \text{IO} & \text{I} & \text{IO} & \text{I}
 \end{pmatrix}$$

I = invisible  
 V = visible  
 O = obstrue  
 (les éléments de la matrice sont donnés dans l'ordre A B 1 2 3 4)

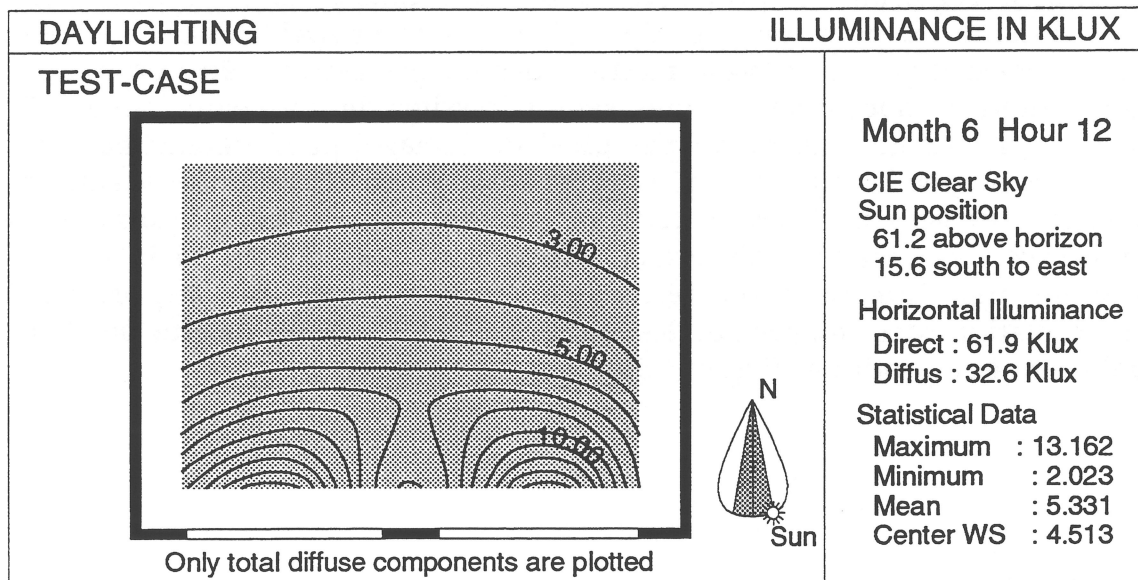
On remarque que cette matrice n'est pas symétrique.

Une fois cette dernière déterminée, la dernière étape consiste à former, pour chaque couple (i, j), les ensembles  $G_{ij}$  des obstructions potentielles. L'algorithme suivant permet d'effectuer cette tâche à partir de la matrice des visibilitéés  $\mathbf{V}$ .

Un programme graphique, développé dans le cadre de la collaboration internationale [Erh92], a été intégré au logiciel ADELIN. Il permet de représenter les éclairagements et facteurs de lumière du jour calculés dans les modes graphiques suivants :

- profils de valeurs sur des sections déterminées
- contours isolignes
- surfaces de réponse en vue tridimensionnelle.

La figure 4.4 illustre une de ces représentations graphiques (contours isolignes) pour le cas d'un local muni de deux fenêtres latérales (ciel serein CIE avec soleil).



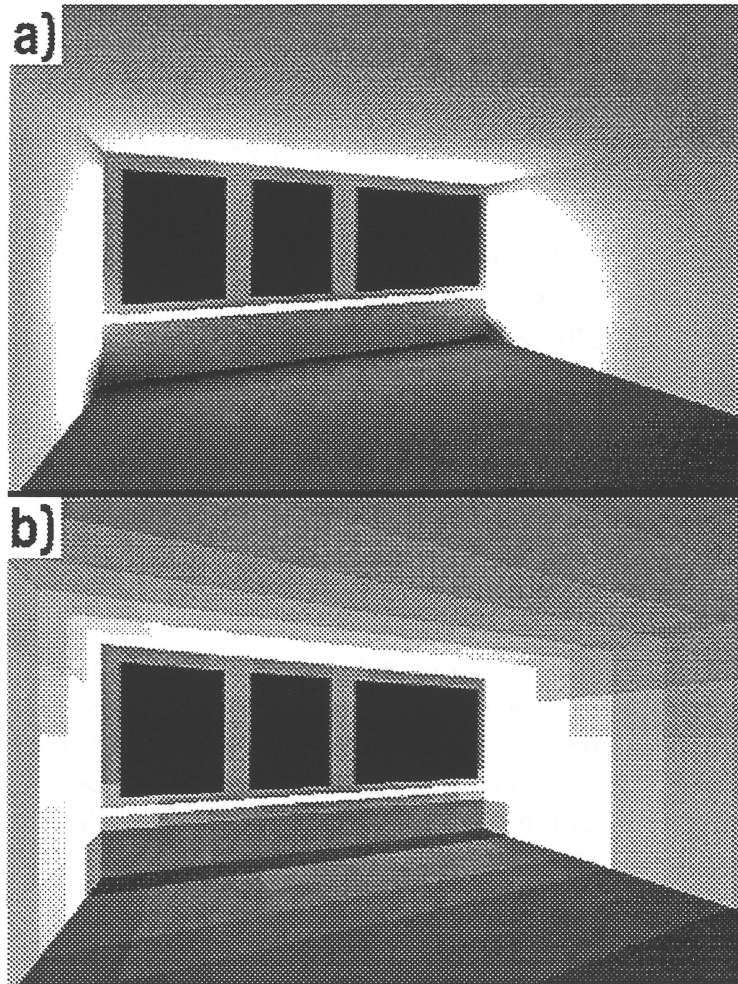
**Figure 4.4 :** Valeurs d'éclairément calculées par SUPERLITE, représentées sous forme de contours isolignes (ciel serein CIE avec soleil, local avec deux fenêtres latérales).

Bien que fort utiles, ces représentations possèdent toutefois l'inconvénient d'être abstraites, et plus familières des éclairagistes que des architectes.

Les grandeurs qu'elles illustrent (éclairage, facteur de lumière du jour) ne sont, par ailleurs, pas perceptibles par l'oeil humain (seule la luminance est perceptible). Pour pallier à cela et tirer un meilleur profit du programme SUPERLITE, un nouveau module graphique a été développé et intégré à ce dernier dans le cadre de ce projet.

Comme les autres routines graphiques, ce module intervient en aval du programme SUPERLITE; il génère des fichiers contenant les données suivantes :





**Figure 4.5 :** Visualisation des luminances d'un local, calculées au préalable par SUPERLITE (méthode de radiosité, surfaces lambertiennes).  
a) avec interpolation bilinéaire entre facettes  
b) sans interpolation.

Afin de bien marquer la différence entre un calcul d'éclairage naturel, réalisé à l'aide de SUPERLITE, et une image de synthèse calculée par RADIANCE, une distinction claire a été maintenue en ce qui concerne l'image résultante : les fenêtres apparaissent noires dans le premier cas de figure.

Lors de la visualisation d'un résultat de calcul de SUPERLITE, il n'est, en effet, pas possible de voir l'environnement extérieur du local au travers de fenêtres transparentes (ciel, sol, obstructions extérieures).

La transmission lumineuse de ces dernières étant dépendante de l'angle d'incidence des rayons lumineux, les luminances de l'environnement extérieur dépendent du point de vue duquel est produit l'image résultante; la visualisation de cette partie de l'image nécessiterait donc des calculs supplémentaires de la part de RADIANCE. En raison de cela, les fenêtres transparentes apparaissent de couleur noire (voir figure 4.5); les vitrages

- Caractéristiques globales de l'installation d'éclairage artificiel (puissance électrique totale, efficacité lumineuse, éclairement prescrit sur le plan de travail).
- Type de commande de l'installation (déclenchement / enclenchement manuel, pilotage par la lumière naturelle, commande par paliers / continue).
- Horaire d'occupation des locaux.
- Type de protection solaire.

Dans un premier temps, l'utilisateur construit un modèle à l'aide de Scribe-Modeller, en appliquant les mêmes conventions que pour un modèle destiné à SUPERLITE. Le programme PLINK génère le fichier d'entrée nécessaire à SUPERLINK; ce dernier calcule les facteurs de lumière du jour sur le plan de travail pour chaque heure du 15<sup>e</sup> jour de chaque mois et pour tous les types de ciel (couvert et serein). Cette étape est coûteuse en temps calcul et nécessite souvent plusieurs heures sur un ordinateur personnel.

Dans une seconde phase, SUPERLINK détermine les besoins en éclairage artificiel en comparant, pour chaque heure de l'année, le niveau d'éclairement atteint par la lumière naturelle avec le niveau prescrit (un point du local est choisis comme point de référence). La part due à l'éclairage naturel est déterminée à partir des facteurs de lumière du jour, calculés précédemment, et des probabilités d'ensoleillement. Les gains internes, dus à l'éclairage artificiel, sont déduits du complément de lumière nécessaire et des paramètres caractérisant l'installation d'éclairage artificiel (puissance électrique totale, efficacité lumineuse de l'installation, etc.).

Une description complète des algorithmes utilisés est donnée dans [Sup90]. L'économie d'énergie électrique calculée est présentée sous forme de bilans mensuels tabulés (en kWh/mois) ou illustrée graphiquement, sous la forme présentée à la figure 4.6.

- comparaison des résultats des mesures effectuées dans des locaux réels [Chu89] [Lov91] [Mah93];
- comparaison des résultats avec ceux provenant d'autres programmes de calcul [Sel82] [Mah93].

Les conclusions de ces travaux, ainsi que des compléments apportés dans le cadre du projet, sont exposées ci-après.

### *Subdivision des surfaces*

Les résultats de calcul sont très sensibles à la subdivision des surfaces du modèle en facettes. Il a été montré que [War85] :

- les facettes doivent être de forme aussi carrée que possible;
- les fenêtres doivent être plus finement discretisées que les parois opaques.

Ces recommandations ont été prises en compte lors de l'élaboration du programme PLINK. Celui-ci applique ces dernières, au moment de la création du fichier d'entrée de SUPERLITE, contenant les caractéristiques géométriques et photométriques du modèle.

La procédure de subdivision des surfaces en facettes a été ainsi automatisée. L'utilisateur du programme ne précise que la dimension désirée (en cm) des facettes subdivisant les surfaces opaques du modèle (par défaut 50 cm). PLINK se charge par la suite de déterminer le nombre de facettes attribué à chaque surface, respectant ces recommandations.

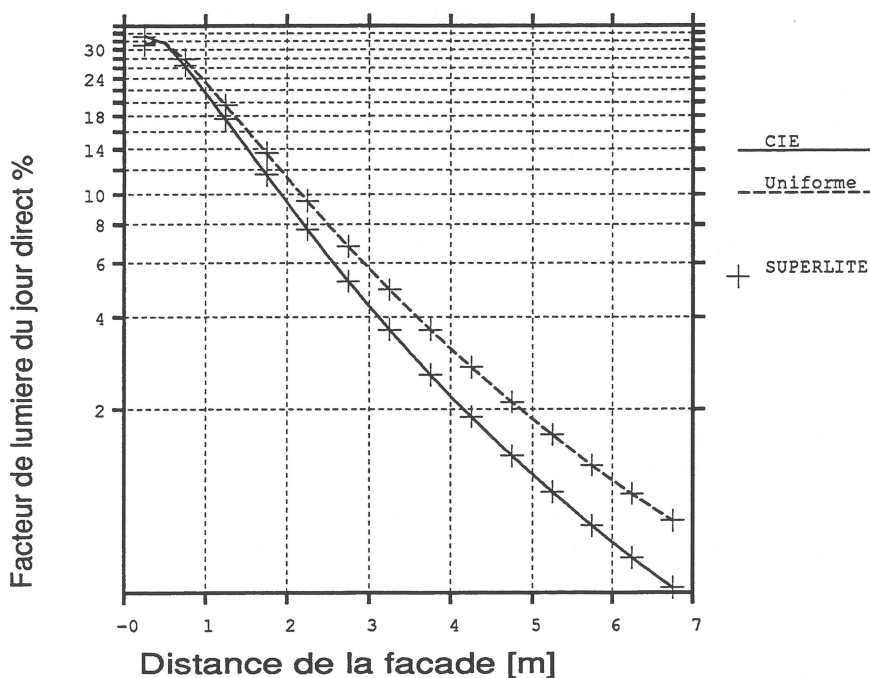
En ce qui concerne les fenêtres, la dimension des facettes est réduite de moitié par rapport à la valeur spécifiée pour les surfaces opaques (subdivision plus fine).

### *Composante directe de l'éclairement*

Le programme SUPERLITE détermine fidèlement la composante directe de l'éclairement pour un ciel couvert. Cela peut être vérifié aisément, puisque cette composante provenant directement de la voûte céleste peut être calculée analytiquement. Dans le cas, illustré à la figure 4.7, l'éclairement horizontal direct, incident au point P, est donné par l'intégrale suivante :

$$E_p = \iint_{\text{ouverture}} L(\theta, \varphi) \sin \theta \cos \theta \, d\theta \, d\varphi \quad [lx]$$

où  $L(\theta, \varphi)$  est la luminance du ciel vu au travers de l'ouverture [ $cd/m^2$ ].



**Figure 4.8:** Comparaison entre la composante directe du facteur de lumière du jour, calculée par SUPERLITE et la solution analytique (local rectangulaire muni de deux ouvertures en façade).

La correspondance entre solutions analytiques et valeurs calculées est excellente : la différence relative est inférieure à 1%. Une comparaison de l'éclairement direct, calculé par SUPERLITE, avec des valeurs mesurées en maquette sous des ciels couverts réels indique une différence relative de 15%. Celle-ci est imputable à la différence de répartition des luminances existant entre ciels réels et modèles théoriques employés par SUPERLITE (ciel uniforme, ciel couvert CIE).

L'éclairement direct n'est pas dérivable analytiquement dans le cas de ciels sereins. Des comparaisons, menées avec des mesures sur maquettes sous ciel réel, montrent des différences relatives plus importantes dans ce cas (jusqu'à 50 %). Ces différences sont imputables aux raisons suivantes :

- la subdivision des surfaces en facettes introduit de fortes variations, lorsque ces dernières ne sont éclairées que partiellement;
- la répartition de luminance des ciels sereins réels diffère significativement de celle des modèles théoriques (ciel serein CIE).

La seule alternative dans ce cas consiste à accroître le nombre de facettes de chaque surface autant que possible. Un compromis doit, toutefois, être trouvé dans la mesure où cela augmente significativement le temps de calcul.

## 5. PROGRAMME D'ETUDE ET D'ANALYSE

Un programme détaillé d'étude et d'analyse en éclairage naturel doit offrir un nombre important de prestations à son utilisateur. Il doit permettre, en particulier, de mener à bien :

- des évaluations qualitatives (ambiances lumineuses, aspect architectural, etc.)
- des évaluations quantitatives (facteur de lumière du jour, indices d'éblouissement, etc.)

Son principal intérêt est de permettre la détermination des performances de systèmes complexes de lumière naturelle, susceptibles d'apporter de nouvelles réponses à la problématique de l'éclairage naturel. Aucun programme de calcul d'éclairage actuel, accessible à un large public, n'est en mesure de mener à bien cette tâche [Sca91]. La plupart d'entre eux mettent l'accent sur l'éclairage artificiel, alors que d'autres sont propriétés d'entreprises privées.

Afin de remédier à cette situation, la poursuite du développement d'un logiciel américain (programme RADIANCE), considéré comme le plus performant du moment, a été entreprise [War88a]. Ce programme fait appel à la technique du lancer de rayons, largement utilisée en infographie pour la production d'images de synthèse.

Une description de ces développements numériques et de l'ensemble des travaux entrepris dans le but d'adapter ce dernier à la problématique de la lumière naturelle, sont donnés ci-après.

### 5.1 Technique du lancer de rayons

#### 5.1.1. *Principes de base*

La technique du lancer de rayons est directement destinée à la production d'images de synthèse. Elle consiste à parcourir les rayons lumineux dans le sens inverse de leur direction naturelle de propagation, en partant du point de vue de l'observation (voir figure 5.1).

- des rayons  $\vec{s}$  sont émis de ce point, en direction des sources lumineuses de la "scène", pour évaluer leur contribution à l'éclairement du point P;
- la luminance du point P est calculée, en fonction de cet éclairement et du facteur de réflexion de la surface;
- cette valeur de luminance est attribuée au pixel intercepté sur le plan de l'image (écran).

En répétant cette opération pour tous les pixels de l'écran, une image de synthèse ("picture rendering") est obtenue. Elle permet de visualiser la "scène" initiale de façon extrêmement réaliste.

La technique du lancer de rayons est utilisée, depuis les années 70, pour produire des images de synthèse par ordinateur [Rog88]. De nombreux développements, ont permis d'y intégrer les effets visuels dus aux phénomènes de réflexion spéculaire (miroirs, verres), de transmission et de réfraction (milieux transparents), propre à l'optique géométrique [Gla89].

La visualisation de ces effets nécessite de prendre en compte tous les rayons, issus du point P, qui sont réfléchis, transmis ou réfractés par les différents milieux optiques et surfaces, qui composent la "scène". Un processus récursif est donc nécessaire; il est souvent coûteux en temps calcul.

La prise en compte des mécanismes d'interréflexions diffuses entre les surfaces du modèle est encore plus difficile. La progression exponentielle du nombre de rayons, qui doit en théorie être lancé pour déterminer cette composante, constitue un sérieux handicap. C'est la raison pour laquelle celle-ci est généralement estimée par un terme constant dans la plupart des programmes actuels (éclairage résiduel ambiant [Gla89]).

La création d'images de synthèse s'accommode bien de cette approximation : l'importance attribuée à leur réalisme a pour effet de reléguer la précision de calcul en seconde priorité. Les programmes de calcul d'éclairage naturel ne peuvent pas se satisfaire de cette situation; ils ont pour principal objectif d'évaluer avec précision les différentes contributions à l'éclairement des locaux (composante directe, réfléchie externe et interne).

La majorité des surfaces rencontrées dans le bâtiment sont, par ailleurs, de type lambertien (diffuseur parfait); la composante d'interréflexions diffuses de la lumière naturelle est donc importante. Le développement d'un programme de lancer de rayons, capable de prendre en compte efficacement cette dernière, s'avère de ce fait indispensable. Le programme RADIANCE a été élaboré dans ce sens : il permet de calculer précisément cette composante dans un temps de calcul raisonnable [War88a] [War88b].

Ce programme offre de plus de grands avantages par rapport aux programmes existants; il permet de simuler des systèmes complexes d'éclairage naturel, composés :

On calcule, dans un premier temps, la radiance  $L_r(\vec{x}_i, -\vec{v})$ , réfléchiée par la surface  $O_i$  dans la direction de l'observateur (point P). On peut écrire :

$$L_r(\vec{x}_i, -\vec{v}) = \sum_j \int_{O_j} f_{ri}(\vec{x}_i, -\vec{v}, \vec{w}_j) g_r(\vec{x}_i, \vec{x}_j) L(\vec{x}_j, -\vec{w}_j) \cos \theta_j d\omega_j$$

avec

$f_{ri}(\vec{x}_i, -\vec{v}, \vec{w}_j)$  fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de réflexion de la surface  $O_j$  (cf. Annexe C);

$g_r(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$  terme géométrique dépendant de la présence éventuelle d'une obstruction entre les points repérés par  $\vec{x}_i$  et  $\vec{x}_j$ ;

$$g_r(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \begin{cases} 0 & \text{en cas d'obstruction} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

$L(\vec{x}_j, -\vec{w}_j)$  radiance émise par la surface  $O_j$  depuis  $\vec{x}_j$  dans la direction  $-\vec{w}_j$

$$\cos \theta_j = \vec{n}_i \cdot \vec{w}_j$$

$$d\omega_j = - \frac{\vec{n}_j \cdot \vec{w}_j \cdot dA_j}{\|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|^2}$$

La somme  $\sum$  porte sur l'ensemble des surfaces  $O_j$  de la scène, à l'exception de la surface  $O_i$  (deux surfaces dans le cas de la figure 5.2).

Dans le cas des surfaces transparentes ou translucides, il est nécessaire de calculer un terme supplémentaire  $L_t(\vec{x}_i, -\vec{v})$ . Celui-ci exprime la radiance transmise par la surface  $O_i$ , au point repéré  $\vec{x}_i$  dans la direction  $-\vec{v}$ . Il est donné par une équation semblable :

$$L_t(\vec{x}_i, -\vec{v}) = \sum_k \int_{O_k} f_{ti}(\vec{x}_i, -\vec{v}, \vec{w}_k) g_t(\vec{x}_i, \vec{x}_k) L(\vec{x}_k, -\vec{w}_k) \cos \theta_k d\omega_k$$

Les radiances  $L_r$  et  $L_t$  sont données alors par les expressions suivantes :

$$L_r(\vec{x}_i, -\vec{v}) = \frac{\pi}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_{ri}(\vec{x}_i, -\vec{v}, \vec{w}_j) \cdot L(\vec{x}_j, -\vec{w}_j)$$

$$L_t(\vec{x}_i, -\vec{v}) = \frac{\pi}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_{ti}(\vec{x}_i, -\vec{v}, \vec{w}_k) \cdot L(\vec{x}_k, -\vec{w}_k)$$

sachant que :

- le point repéré par  $\vec{x}_j$  est déterminé en lançant un rayon du point  $\vec{x}_i$  dans la direction  $\vec{w}_j$  et en cherchant son intersection avec la surface la plus proche.
- les termes géométriques  $g_r(\vec{x}_i, -\vec{x}_j)$  et  $g_t(\vec{x}_i, -\vec{x}_k)$  sont déterminés implicitement par le lancer de rayons.

Les expressions donnant  $L_r$  et  $L_t$  sont récursives, puisqu'elles dépendent des radiances des autres surfaces (termes  $L(\vec{x}_j, -\vec{w}_j)$  et  $L(\vec{x}_k, -\vec{w}_k)$ ). Des méthodes numériques permettent toutefois de limiter le nombre de lancers de rayons, en optimisant celui-ci.

#### *Optimisation du lancer de rayons*

L'optimisation de la procédure de lancer de rayons part du constat suivant :

- les sources lumineuses occupent généralement une faible portion de l'espace (nécessite une subdivision fine) et contribuent de façon importante à l'éclairage de la scène;
- certains matériaux réfléchissent la lumière dans des directions privilégiées (surfaces brillantes).

Afin d'éviter de devoir subdiviser l'hémisphère en un trop grand nombre de rayons (explosion du temps calcul), on distingue volontairement les contributions les plus importantes aux termes  $L_r$  et  $L_t$  qui sont :

- les radiances provenant des sources lumineuses;
- les radiances provenant des directions, pour lesquelles les valeurs des fonctions  $f_r$  et  $f_t$  sont importantes.

Ces contributions sont calculées séparément et de façon déterministe (voir paragraphe 5.2). On suppose pour cela que les fonctions bidirectionnelles  $f_r$  et  $f_t$  peuvent être décomposées en deux termes séparés [War88a], [Rus90] :



Cette hypothèse s'applique à la plupart des matériaux et, en particulier, à ceux du domaine de la construction [War92a]. En substituant ces deux nouvelles expressions, dans les équations présentées plus haut, on obtient celles constituant les équations générales du programme RADIANCE données à la référence [War92b].

### *Matériaux*

Divers types de matériaux peuvent être simulés en jouant sur les facteurs de réflexion  $\rho$  et de transmission  $\tau$ , en distinguant les composantes diffuses (d) et régulières (r), ainsi que sur les paramètres ajustables des fonctions  $f_r$  et  $f_t$  [War92b]. Pour la simulation d'espaces intérieurs la plupart de ceux-ci peuvent être regroupés dans les classes suivantes :

– Matériaux opaques parfaitement diffusants

$$\tau_d = \tau_r = \rho_r = 0 \quad 0 < \rho_d \leq 1$$

*Exemples* : tapisserie, moquette, béton brut, bois brut, matières textiles.

– Matériaux opaques partiellement spéculaires

$$\tau_d = \tau_r = 0 \quad 0 < \rho_r \lesssim 0.2 \quad 0 < \rho_d \leq 1$$

$f_r^s$  de type purement spéculaire ou gaussien.

*Exemples* : matières plastiques, peintures métallisées, métaux oxydés ou brossés, matières textiles satinées.

– Matériaux opaques spéculaires

$$\tau_d = \tau_r = 0 \quad 0.2 \lesssim \rho_r \leq 1 \quad 0 < \rho_d \lesssim 0.2$$

$f_r^s$  de type purement spéculaire ou gaussien

*Exemple* : miroirs, métaux polis.

– Matériaux translucides

$$0 \leq \tau_r < 1 \quad 0 < \tau_d \leq 1$$

$$0 \leq \rho_r < 1 \quad 0 < \rho_d < 1$$

L'utilisation d'un modèle trichromatique, proche de celui expliquant la perception des couleurs dans l'oeil humain, est une simplification de la réalité. En principe, le calcul de la propagation de toutes les longueurs d'onde du spectre visible doit être effectuée pour obtenir une solution exacte. Il nécessite toutefois d'effectuer les opérations suivantes :

- décomposer le spectre visible en un nombre suffisant d'intervalles disjoints, pour lesquels les propriétés photométriques des matériaux peuvent être considérées comme constantes (facteurs de réflexion et de transmission);
- calculer la propagation de la lumière pour chaque intervalle;
- combiner les résultats obtenus pour former les composants trichromatiques adaptées au matériel de visualisation (écran, imageur, imprimante).

La simplification adoptée par RADIANCE se justifie par les raisons suivantes :

- la mesure de grandeurs spectrales (facteurs de réflexion et transmission pour différentes longueurs d'onde) est difficile et coûteuse;
- un simple chromamètre permet de mesurer les coordonnées trichromatiques CIE de matériaux (coordonnées  $Y_{xy}$  transformables en composantes R G B);
- la majorité des couleurs, employées dans le bâtiment, sont peu saturées (dominante blanc - gris), ce qui indique une fiable dépendance des facteurs de réflexion envers les longueurs d'onde [Com93c].

Compte tenu des avantages résultants sur le plan pratique, cette décomposition s'avère extrêmement judicieuse.

#### *Mise en oeuvre*

Le programme RADIANCE est composé d'une soixantaine de logiciels, effectuant chacun une tâche particulière. Ces logiciels peuvent être classés en trois groupes (voir figure 5.5) :

- les logiciels de "génération" de données (groupe "Générateurs"), produisant les fichiers numériques, qui décrivent une "scène visuelle" pour le programme (données géométriques et photométriques);
- les logiciels de "calcul" (groupe "Calculs"), qui effectuent le lancer de rayons afin d'obtenir une image de synthèse ou des résultats numériques (profil de facteur de lumière du jour);

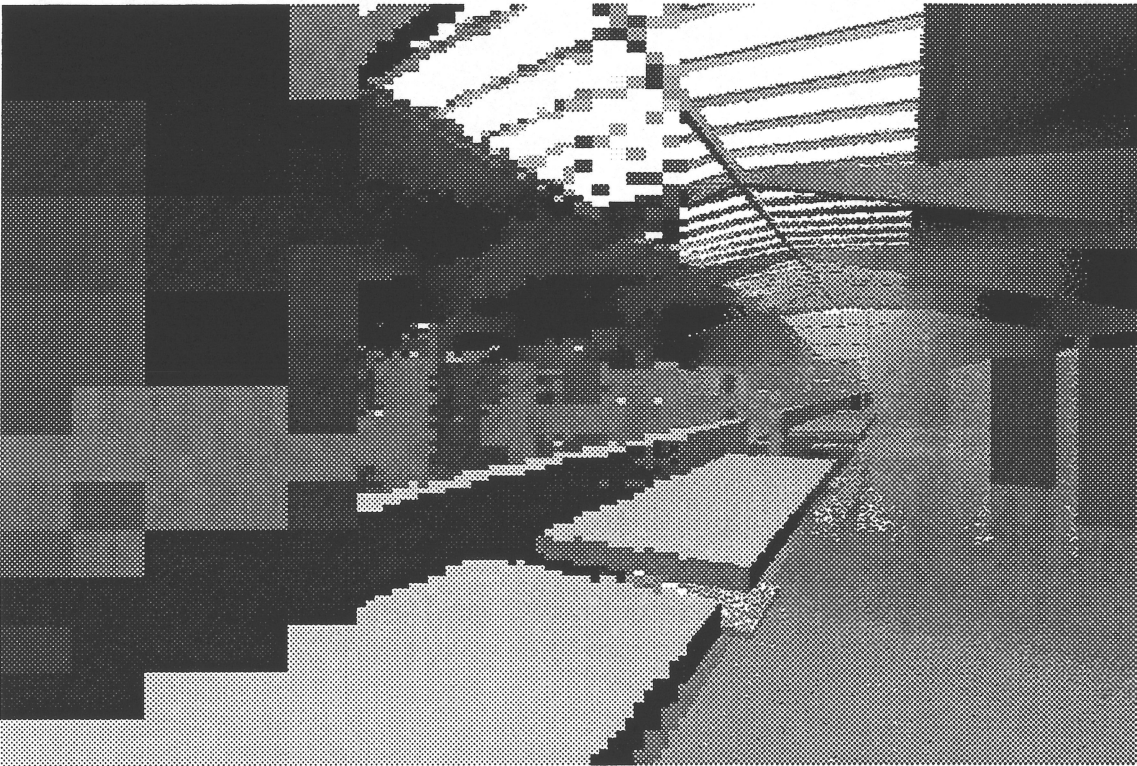


Figure 5.6 : Elaboration progressive d'une image de synthèse, obtenue par affinages successifs : la détection des erreurs est possible, même à faible résolution.

Le troisième groupe de logiciels ("Traitements") comprend, en particulier, un module qui permet de superposer des contours d'iso-éclairage à une image de synthèse. Ce logiciel, développé dans le cadre du projet (voir paragraphe 5.2), permet d'exploiter au mieux ces images sur le plan qualitatif (ambiances lumineuses) et quantitatif (niveaux d'éclairage). La figure 5.7 illustre cette possibilité de calcul.

Etape	Opération
1.	<p>Conversion du fichier décrivant la "scène" (données géométriques et photométriques) en un fichier "octree".</p> <p><i>Un fichier "octree" [Gla89] consiste en une subdivision hiérarchique de l'espace en volumes parallélépipédiques, emboîtés les uns dans les autres (chaque volume "parent" est subdivisé en huit volumes "fils"). La subdivision est effectuée jusqu'à ce que chaque volume n'englobe que quelques objets. L'utilisation d'un "octree" permet de faciliter le calcul des intersections entre rayons et objets : seuls les objets contenus dans un volume élémentaire, traversé par un rayon, sont considérés lors du calcul d'intersections (réduction du temps calcul [Sca91]).</i></p>
2.	<p>Calcul des radiances RGB de chaque pixel de l'écran par lancer de rayons en quatre phases.</p> <p><i>Un point et une direction de vue, ainsi que des paramètres contrôlant le lancer de rayons, doivent être spécifiés.</i></p> <p>2.1 Détermination de l'intersection du rayon avec la surface la plus proche.</p> <p>2.2 Calcul de la composante de la radiance du point d'intersection due aux sources lumineuses (premiers termes des équations donnant <math>L_r</math> et <math>L_t</math>).</p> <p><i>Un rayon est lancé au voisinage du centre de gravité de chaque source, afin de déterminer leur visibilité.</i></p> <p>2.3 Calcul de la composante de la radiance due aux réflexions spéculaires, aux réfractions et aux transmissions régulières.</p> <p><i>Des rayons sont lancés en direction de ces surfaces, si leurs facteurs de réflexion ou de transmission régulières sont supérieurs à un seuil déterminé. Les opérations 2.1 à 2.4 sont répétées pour chacun de ces rayons; le nombre maximal de récursions est limité (paramètres choisis par l'utilisateur).</i></p> <p>2.4 Calcul de la composante de la radiance due aux interrélaxions diffuses.</p> <p><i>Cette dernière est évaluée en lançant N rayons (typiquement <math>N &gt; 100</math>), donnant lieu à de nouvelles récursions. Le nombre maximal d'interrélaxions diffuses, devant être pris en compte, est spécifié par l'utilisateur (en général, entre 1 et 3). Un procédé d'interpolation des valeurs d'éclairement diffus contribue à réduire substantiellement le temps de calcul.</i></p>
3.	<p>Traitement de l'image par des procédures d'anti-crénelage.</p> <p><i>La procédure courante consiste à moyenniser les radiances de pixels voisins, en réduisant la taille de l'image. Les effets dus à la discrétisation de l'image, qui altèrent son réalisme ("crénelage"), sont atténués.</i></p>

Table 5.1 : Principales étapes de calcul du programme RADIANCE.

Le point B est situé à l'intersection des domaines  $R_{v1}$  et  $R_{v2}$  :  
 $E_B = w_1 E_1 + w_2 E_2$ ,  $w_1$  et  $w_2$  sont des coefficients de pondération [War88b].

Le point C n'appartient à aucun domaine :  $E_c$  et  $R_{vc}$  doivent être calculés en lançant  $N$  nouveaux rayons depuis ce point.

Les composantes diffuses, calculées à l'aide de cette méthode, sont indépendantes du point de vue : elles peuvent donc être réutilisées lors de l'élaboration de nouvelles images de synthèse, correspondant à d'autres points de vue (composantes diffuses stockées sur fichier lors du calcul de la première image). D'autres résultats peuvent être obtenus grâce à cette procédure; c'est le cas :

- des profils d'éclairement;
- des profils de facteurs de lumière du jour;
- de la visualisation du parcours des rayons.

Cette dernière possibilité est particulièrement utile pour étudier la propagation des rayons lumineux dans les systèmes complexes d'éclairage naturel (déviateurs, guides de lumière).

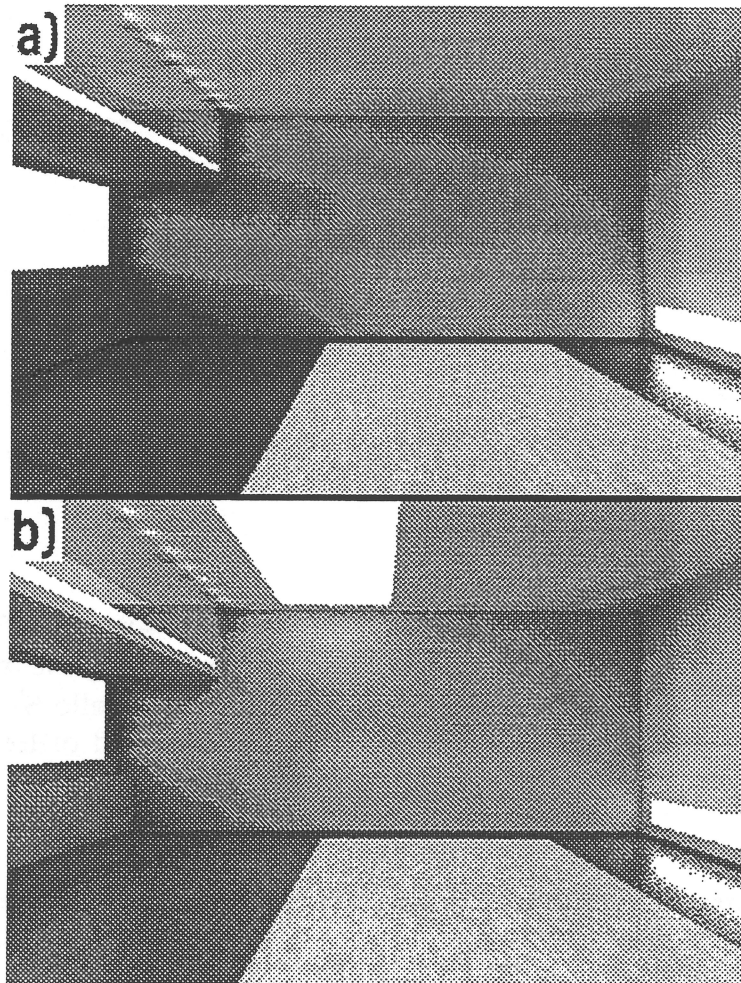
## 5.2 Développements numériques

Bien que les méthodes, exposées au chapitre précédent, soient efficaces, des développements numériques particuliers ont du être effectués pour permettre d'appliquer le programme RADIANCE aux systèmes complexes d'éclairage naturel. Ces derniers font l'objet des paragraphes suivants.

### 5.2.1 Sources virtuelles

Les sources lumineuses sont traitées spécialement par le programme, du fait de leur contribution importante à l'éclairement (composante directe). En présence d'une surface très réfléchissante (miroir par ex.), il arrive que des points, qui ne sont pas directement éclairés par une source (le soleil par ex.), le soient par la réflexion de cette source sur la surface en question.

La figure 5.9 illustre cette situation : la procédure, évaluant l'éclairement direct au point B, ne prend pas en compte la source S (non directement visible depuis ce point). Sa contribution sera déterminée lors de l'évaluation des interréflections lumineuses, ce qui conduit à un calcul peu efficace, dans la mesure où la source S est vue selon un faible angle solide (faible probabilité que l'un des  $N$  rayons lancés l'atteigne).



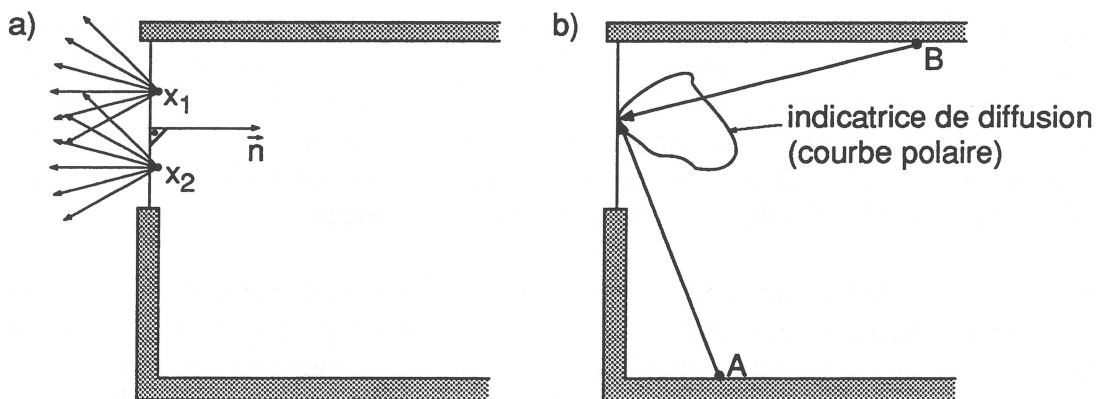
**Figure 5.10 :** Local équipé d'un bandeau lumineux sous un ciel serein.  
a) simulation sans définition d'une source virtuelle pour le soleil (pas de réflexions calculées)  
b) simulation avec génération préalable d'une source virtuelle (réflexions calculées)

lancés en direction de chaque zone lumineuse visible de l'intérieur au travers des ouvertures.

La procédure, adoptée dans le programme RADIANCE, consiste à considérer les ouvertures d'un local comme étant des sources secondaires. La désignation de ces sources est effectuée par l'utilisateur : un caractère particulier (symbole '+') est attribué pour cela aux identificateurs de matériaux, correspondant aux surfaces des ouvertures (attribution par le programme PLINK).

Le calcul de la contribution à l'éclairage de ces sources secondaires est réalisé en deux étapes :

- 1) Une indicatrice de diffusion est déterminée, dans un premier temps, pour chaque source secondaire (voir figure 5.12a). Le procédé consiste à échantillonner les surfaces correspondantes en un certain nombre de points, desquels des rayons uniformément répartis sur l'hémisphère projeté sont lancés. Un nouveau fichier de données, contenant en particulier les indicatrices de diffusion obtenues, est créé.
- 2) Dans un second temps, ce fichier est utilisé pour évaluer l'éclairage naturel à l'intérieur du local (voir figure 5.12b).



**Figure 5.12 :** Indicatrice de diffusion d'une fenêtre :

- a) La surface de la fenêtre est échantillonnée sur plusieurs points  $x_i$ , situés sur sa face intérieure. De chaque point sont tracés un ensemble de rayons, destinés à déterminer l'indicatrice de diffusion.
- b) L'éclairage direct des points A et B est calculé en traçant des rayons en direction de la fenêtre. Le programme utilise directement les valeurs données par l'indicatrice.

La procédure, développée à cet effet [War91a], est appliquée lors du calcul de la composante directe de l'éclairage. Celle-ci comprend quatre étapes :

- 1) La contribution potentielle  $E_s$  de chaque source  $S$ , située en avant du point  $\vec{x}$  considéré, est évaluée par :

$$E_s(\vec{x}) = L(\vec{x}_s, -\vec{w}_s) \omega_s \cdot \min(0, \cos\theta_s)$$

avec  $L(\vec{x}_s, -\vec{w}_s)$  : radiance de la source  $S$  dans la direction  $-\vec{w}_s$

$\vec{w}_s = \vec{x}_s - \vec{x}$  : direction de la source

$\omega_s$  : angle solide de la source vue du point  $\vec{x}$

$\theta_s$  : angle entre la normale du point  $\vec{x}$  et  $\vec{w}_s$

- 2) Un classement des sources, par ordre décroissant de leur contribution potentielle, est effectué.
- 3) Des rayons sont lancés, en direction de chacune d'elles, pour déterminer leur visibilité. La contribution de chaque source visible est additionnée à un accumulateur arithmétique; le parcours de la liste des sources est interrompu, dès que la contribution potentiel des sources restantes est inférieure à une fraction de la valeur accumulée (10% en général).
- 4) La contribution résiduelle des sources, qui n'ont pas donné lieu à un lancer de rayons, est estimée finalement de la manière suivante (évaluation statistique) :

$$E_{res} = \sum_{S \in \text{sources restantes}} P(\vec{x}) \cdot P(\vec{x}_s) \cdot E_s(\vec{x})$$

où  $P(\vec{x})$  est la probabilité pour qu'un rayon lancé du point  $(\vec{x})$  atteigne une source quelconque

$P(\vec{x}_s)$  est la probabilité que la source située en  $\vec{x}_s$  soit visible d'un point quelconque de la "scène"

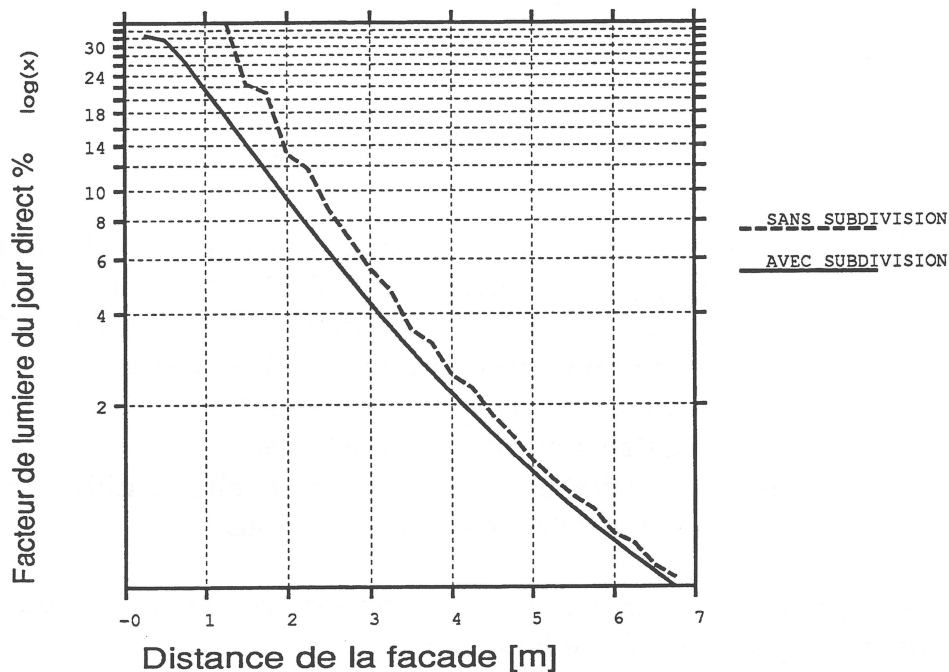
La probabilité  $P(\vec{x})$  est supposée être égale à la fraction du nombre de sources, visibles du point  $\vec{x}$  (évaluée approximativement à la 3ème étape de calcul).  $P(\vec{x}_s)$  est égale à la fraction du nombre total de rayons, lancés en direction de la source  $S$ , ayant atteint celle-ci.

La procédure en question réduit considérablement le temps calcul du programme, sans altérer la précision des résultats [War91a].



La subdivision de chaque source en petites portions est réitérée, jusqu'à ce que leur dimension soit égale à une fraction prédéfinie de la distance séparant la source du point considéré (fraction égale à 30%, en général). Contrairement au programme SUPERLITE, pour lequel la subdivision des ouvertures est fixée, la procédure implantée dans RADIANCE est de type dynamique : cette subdivision varie en fonction de l'éloignement du point de calcul par rapport à la source en question.

La figure 5.15 illustre l'effet de cette subdivision. Elle est indispensable, si l'on veut éviter une distorsion importante des résultats de calcul, dans les locaux pourvus de larges ouvertures.



**Figure 5.15 :** Comparaison de la composante directe du facteur de lumière du jour, calculée avec et sans subdivision locale des sources étendues (ciel couvert CIE, local rectangulaire 5 x 7 x 3 [m], muni de deux ouvertures en façade).

### 5.2.5 Amélioration de l'interpolation de la composante diffuse (interréflexions)

La composante diffuse de l'éclairage, due aux interréflexions, est généralement déterminée en un point, soit par un lancer de rayons (N rayons répartis uniformément sur la projection de l'hémisphère), soit par interpolation de valeurs calculées précédemment (voir paragraphes 5.1.1 et 5.1.2). Une amélioration de la procédure d'interpolation a été introduite pour tirer le meilleur parti de l'information disponible au moment du calcul de la composante diffuse.

avec :	$E(\vec{x})$	éclairage diffus interpolé au point $\vec{x}$ ;
	I	ensemble des valeurs calculées, dont les domaines d'interpolation comprennent le point $\vec{x}$ ;
	$w_i(\vec{x})$	coefficients de pondération (cf. [War88b]);
	$E(\vec{x}_i)$	éclairagements diffus calculés aux points $\vec{x}_i$ ;
	$\vec{\nabla}_r E(\vec{x}_i)$	gradients rotationnels aux points $\vec{x}_i$ ;
	$\vec{\nabla}_t E(\vec{x}_i)$	gradients translationnels aux points $\vec{x}_i$ ;
	$\vec{n}_i$	normales des surfaces aux points $\vec{x}_i$ ;
	$\vec{n}$	normale à la surface au point $\vec{x}$ ;

La procédure adoptée améliore considérablement la qualité des images de synthèse, principalement dans les parties de l'image qui ne sont pas directement éclairées par des sources [War92a]. Cette amélioration ne nécessite pas de lancer de rayons supplémentaires : l'augmentation du temps-calcul qui en résulte est négligeable.

### 5.2.6 Représentation visuelle des grandeurs photométriques

Le programme RADIANCE est utilisé fréquemment pour visualiser et mettre en valeur des projets architecturaux [Lom93] [Fro93]. Cela s'explique principalement par la qualité et le réalisme des images de synthèse obtenues (locaux, atrium, musées).

La reproduction fidèle par le programme des ambiances lumineuses, perçues dans la réalité, ne peut toutefois pas être assurée. L'appréciation de ces ambiances demeure donc purement subjective : différents facteurs contribuent au fait que les luminances de ces images diffèrent de la réalité, même si leur calcul est exact. C'est le cas, en particulier :

- de la faible dynamique de l'écran cathodique (jusqu'à 100 cd/m<sup>2</sup> au lieu de plusieurs centaines de milliers);
- du paramètre d'exposition, contrôlant la luminosité de l'image (équivalent à un diaphragme).

Même si ce type d'étude est fort utile pour le concepteur, elle doit être complétée par une analyse quantitative des résultats de calcul.

Différents modes de représentation visuelle permettent de mettre en valeur ces résultats; ces possibilités sont les suivantes :

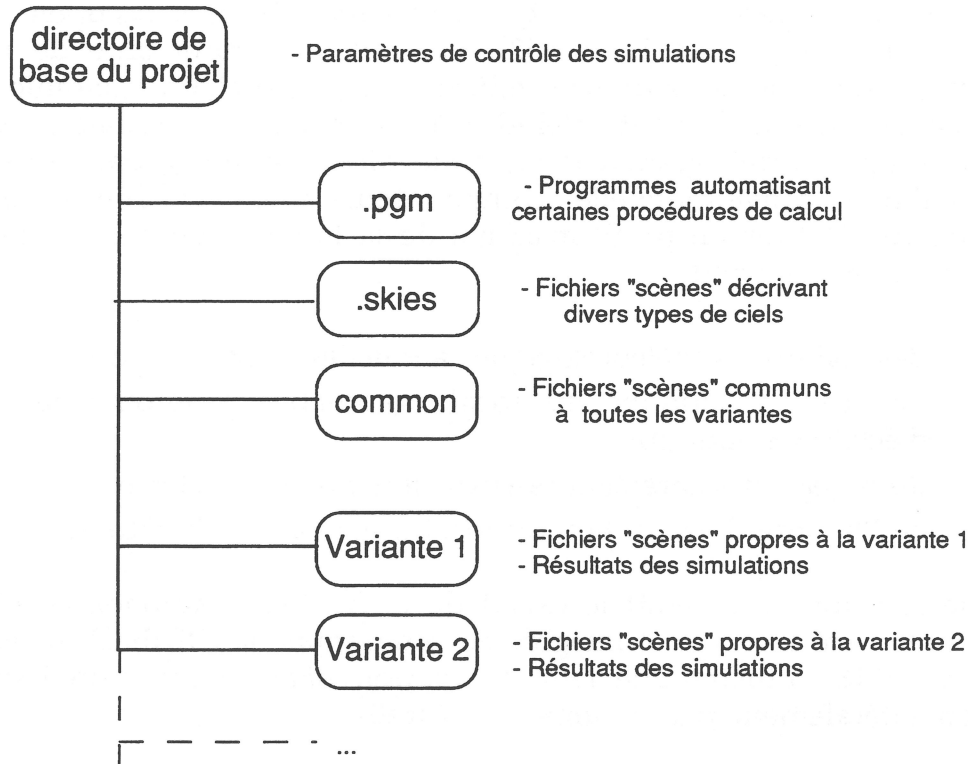


Figure 5.17 : Structure en sous-directoires adoptées en vue d'automatiser les procédures de simulation.

L'enchaînement des différentes étapes de simulation est alors assuré; les étapes de calcul, réalisées lors d'une précédente session, ne sont répétées que si leurs données d'entrée ont été modifiées.

Cette procédure d'automatisation permet un gain de temps appréciable; elle introduit une grande souplesse lors de comparaisons de différentes variantes. Celles-ci gagnent, par ailleurs, en rigueur, puisqu'elles sont systématiquement basées sur les mêmes paramètres d'entrée (type de ciel, paramètres de simulation, etc.). Implantée actuellement sur la version UNIX du logiciel RADIANCE (stations de travail), cette procédure peut être transposée aux ordinateurs personnels sans grandes difficultés.

### 5.3 Calculs énergétiques

#### 5.3.1 Estimation de l'autonomie en éclairage naturel

La fraction du temps de travail annuel, durant laquelle le niveau d'éclairement naturel d'un local est supérieur ou égal au niveau prescrit (300 Lux pour le travail de bureau [SEV89]), correspond idéalement à celle où l'installation d'éclairage artificiel peut être déclenchée.

$$E_i = D_i \cdot E_o \quad [\text{Lux}]$$

où  $E_i$  [Lux] représente l'éclairement intérieur au point  $i$ ,  
 $D_i$  [-] le facteur de lumière du jour au même point  
et  $E_o$  [Lux] l'éclairement horizontal extérieur.

La fraction d'autonomie de l'éclairage naturel  $a_p$  [-] peut être estimée en chaque point du local, à partir de la distribution de probabilité de l'éclairement horizontal extérieur  $f_p(E_o)$ , établie pour une période de temps de travail annuelle (généralement 08.00 à 18.00 h heures légales).

La fraction d'autonomie est alors donnée par l'équation suivante :

$$a_p(D_i, E_{\text{prescrit}}) = \int_{\frac{E_{\text{prescrit}}}{D_i}}^{\infty} f_p(E_o) dE_o = 1 - F_p\left(\frac{E_{\text{prescrit}}}{D_i}\right)$$

avec  $f_p$ : distribution de probabilité et  $F_p$ : fonction de répartition.

La distribution de probabilité  $f_p(E_o)$ , utilisée dans ce programme, découle des recommandations de l'Association Suisse des Electriciens (ASE) en matière d'éclairage naturel [SEV89]. Elle est issue d'une abaque, proposée dans ces recommandations, permettant de déterminer la fraction d'autonomie en éclairage naturel de locaux pour des périodes d'occupation usuelles (08.00 à 18.00 h heure légale). L'abaque suppose une distribution de probabilité uniforme  $f_{\text{ASE}}(E_o)$  donnée par :

$$f_{\text{ASE}}(E_o) = \begin{cases} \frac{1}{20000} & 0 \leq E_o \leq 20000 \text{ [lx]} \\ 0 & E_o > 20000 \text{ [lx]} \text{ et } E_o < 0 \text{ [lx]} \end{cases}$$

La conformité de cette fonction a été vérifiée à l'aide de comparaisons avec des mesures expérimentales (statistiques d'éclairement). La figure 5.19 illustre les fonctions de répartition de l'éclairement horizontal extérieur  $F_p(E_o)$ , obtenues pour la même période annuelle à partir des recommandations ASE et des mesures d'éclairement réalisées par ciel couvert à Genève [MOL 93] et à Kloten [Kel85].

L'estimation de la fraction d'autonomie en éclairage naturelle, réalisée sur ce modèle, constitue toutefois une évaluation prudente de la fraction d'autonomie susceptible d'être dépassée dans la réalité. Ce sera certainement le cas pour de nouveaux systèmes de lumière naturelle [Com93d], qui ont la particularité de mieux gérer la lumière directe (absence d'éblouissement) et d'accroître, en conséquence, la fraction d'autonomie en éclairage naturel.

### 5.3.2 *Evaluation détaillée de l'autonomie en éclairage naturel*

Pour affiner l'analyse d'un système d'éclairage naturel, il est nécessaire de compléter l'évaluation des économies d'énergie, liées à la réduction des besoins en éclairage artificiel, par une étude de son incidence sur la thermique du local (bilan énergétiques, confort thermique). L'utilisation de l'éclairage naturel, combinée à celle d'une installation d'éclairage artificiel, se traduit aussi par des apports énergétiques qu'il s'agit de contrôler :

- En hiver, en maximisant les gains solaires au travers du système d'éclairage naturel et en prenant compte les gains internes provenant de l'éclairage artificiel;
- En mi-saison, en gérant les apports solaires en fonction des besoins de chaleur du local;
- En été, en rejetant ces mêmes apports et en minimisant les gains internes de l'éclairage artificiel, de façon à éviter des situations d'inconfort thermique (surchauffes).

Le programme SUPERLINK [IBP90], intégré au logiciel ADELINÉ dans le cadre de la collaboration internationale, permet d'évaluer les gains internes générés par une installation d'éclairage artificiel. Les facteurs pris en compte dans ces calculs sont les suivants :

- Climat lumineux du lieu (modèles de ciel implantés dans SUPERLITE, probabilités d'ensoleillement pour chaque heure de l'année);
- Description géométrique et photométrique du local (fichiers d'entrée identiques à ceux de SUPERLITE);
- Caractéristiques globales de l'installation d'éclairage artificiel (puissance électrique totale, efficacité lumineuse, éclairement prescrit sur le plan de travail);
- Type de commande de l'installation (déclenchement / enclenchement manuel, piloté par la lumière naturelle et régulé par paliers continus);
- Horaire d'occupation des locaux;
- Type de protection solaire.

- 3) Transformation de l'indice en fraction prévisible d'insatisfaits, à partir du traitement statistique des sensations visuelles ressenties par un ensemble d'utilisateurs (similitude avec la théorie de Fanger [Fan82]).

Le programme RADIANCE est particulièrement approprié à l'évaluation d'indices d'inconfort visuel, puisqu'il permet de déterminer la distribution des luminances dans le champ visuel, pour des situations d'éclairage représentatives de la réalité. Il a, par ailleurs, pour principal avantage de pouvoir prendre en compte des situations complexes, ce qui n'est pas le cas des programmes actuels, centrés uniquement sur l'éclairage artificiel de locaux rectangulaires.

Les paragraphes suivants exposent deux approches différentes d'évaluation de l'inconfort visuel, ainsi que leur intégration au programme.

#### 5.4.1 Indices d'éblouissement

L'éblouissement psychologique se traduit par une sensation de gêne désagréable, provoquée généralement par la présence de sources de luminance excessive dans le champ visuel (luminaires en mode d'éclairage direct par ex.) [CIE87]. Il diffère de l'éblouissement physiologique, qui se traduit par la perte de la faculté de perception visuelle, provoquée par une "saturation" des capacités de perception de la rétine (phares d'automobile par ex.).

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'élaboration d'indices d'inconfort visuel (appelés aussi indices d'éblouissement), combinant les différents facteurs physiques, responsables de la sensation d'éblouissement psychologique (voir figure 5.20).

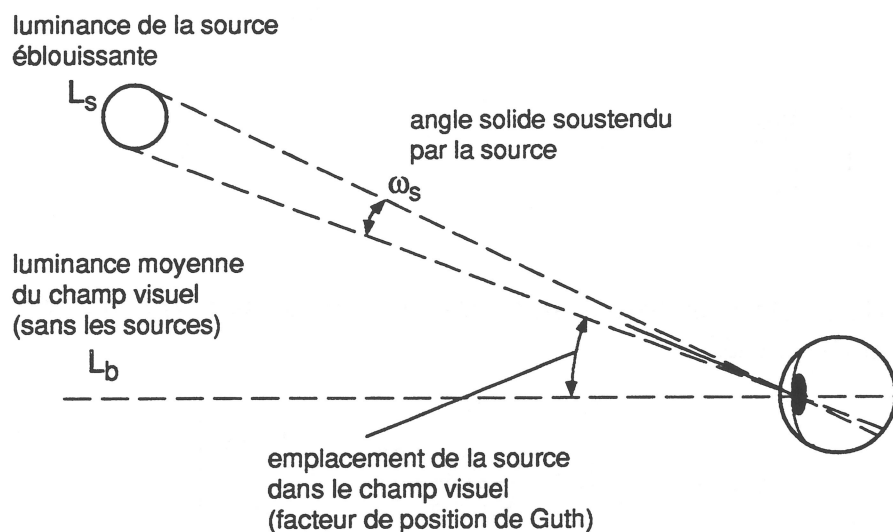


Figure 5.20 : Facteurs responsables de la sensation d'éblouissement psychologique.

Indice UGR (Unified Glare Rating), également défini par cette commission [Fis90] [SLG92] :

$$UGR = 8 \log \left[ \frac{0.25}{L_b} \sum_s \frac{L_s^2 \cdot \omega_s}{P_s^2} \right]$$

Indice DGR (Discomfort Glare Rating), développé aux Etats-Unis [Gut63] [IES84] :

$$DGR = \left( \frac{0.5}{L_v^{0.44}} \sum_{s=1}^N \frac{L_s Q_s}{P_s} \right)^{N^{-0.0914}}$$

où  $Q_s = 20.4 \cdot \omega_s + 1.52 \omega_s^{0.2} - 0.075$

N : nombre de sources totales

L'appréciation des sensations d'inconfort visuel en fonction des valeurs de ces indices est donnée à la table 5.2. Les qualificatifs utilisés ont été traduits littéralement de la langue anglaise; certaines nuances linguistiques, propres à la langue française, ne peuvent donc être correctement reproduites [Iwa91].

BGI CGI UGR	DGI	DGR	sensation d'éblouissement exprimée
		35	imperceptible
10	16		juste perceptible
13	18	50	perceptible
16	20		juste acceptable
19	22	65	acceptable
22	24	220	juste inconfortable
25	26	300	inconfortable
	28	400	juste intolérable
		700	intolérable

**Table 5.2 :** Sensation d'éblouissement exprimée en fonction des valeurs des différents indices d'éblouissement.

dépend principalement de l'acuité visuelle de l'observateur en présence d'une tâche à effectuer.

L'acuité visuelle est définie comme l'inverse du pouvoir séparateur de l'oeil (exprimé en minutes d'arc); celui-ci est égal à la plus faible distance angulaire séparant deux objets, perçus comme des objets séparés par l'observateur (en-dessous de cette distance, ceux-ci apparaissent confondus). L'acuité visuelle d'un observateur dépend des paramètres suivants :

- *Paramètres physiques*
  - éclairement de la tâche;
  - contrastes de luminances;
  - répartition des luminances.
  
- *Paramètres physiologiques*
  - sensibilité à la lumière;
  - défauts de réfraction du système visuel.

L'hypothèse de base de cette méthode consiste à attribuer la sensation d'inconfort visuel au déficit d'acuité existant entre l'acuité  $A_e$ , nécessaire pour effectuer une tâche définie (lire un texte à l'écran par ex.) et l'acuité  $A$ , atteinte par l'observateur dans des conditions d'éclairage données (écran en face d'une fenêtre par ex.).

Si  $A < A_e$ , l'inconfort visuel est perçu, puisque la tâche ne peut pas être réalisée (l'observateur ne distingue pas les détails). Cette situation peut résulter aussi bien du fait de l'éblouissement de l'observateur (face à la fenêtre par ex.) que par manque de lumière (éclairage insuffisant par ex.).

L'indice d'inconfort  $J$  permet d'exprimer quantitativement cette sensation d'inconfort visuel; il est donné par l'expression suivante :

$$J = \frac{A_{\max} - A}{A_{\max}} \quad [-]$$

où  $A_{\max}$  est l'acuité maximale que peut atteindre l'observateur dans une situation d'éclairage optimale

$A$  est l'acuité de l'observateur dans la situation considérée.

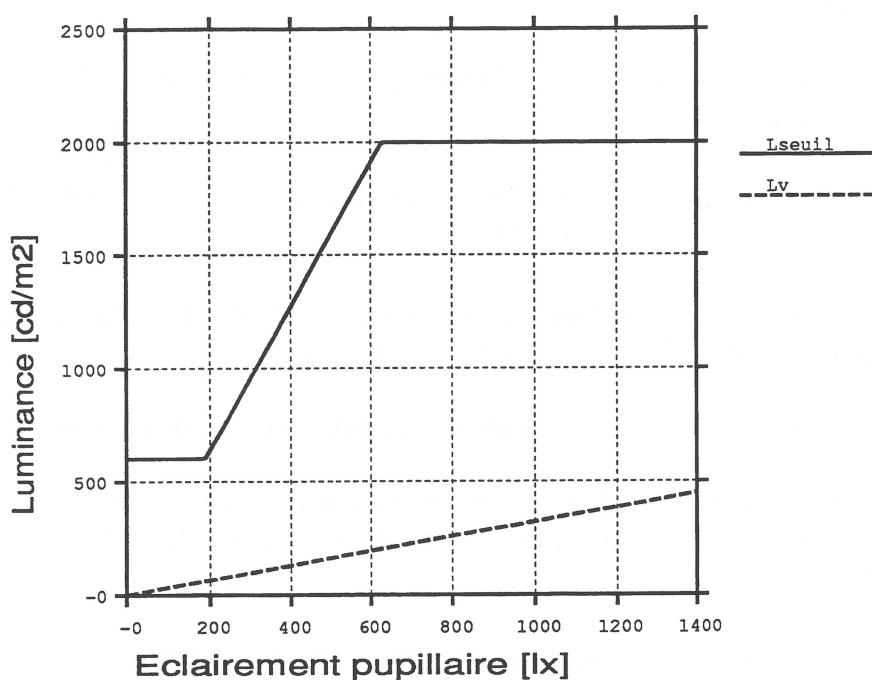
Contrairement aux indices d'éblouissement, l'indice  $J$  dépend de l'observateur considéré. Cet indice est compris entre 0 (situation optimale pour l'observateur) et 1 (situation la plus défavorable résultant d'un éblouissement total ou de l'absence de lumière).



Indices d'éblouissement

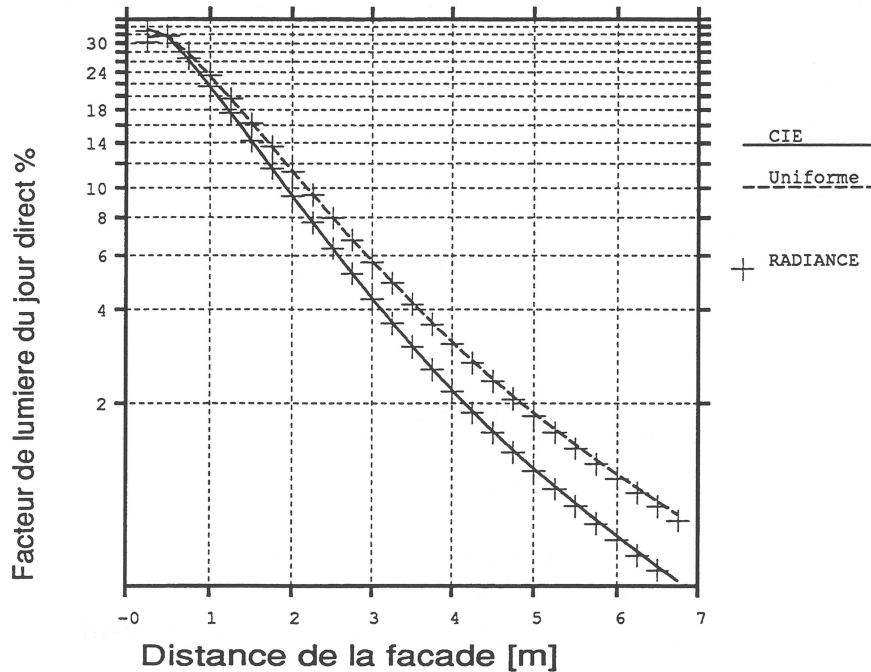
Le programme détermine, dans ce cas, les régions du champ visuel qui peuvent être considérées comme des sources potentielles d'éblouissement (fenêtres, reflets de la lumière solaire, etc.). Un seuil de luminance, dépendant de l'image en question, est utilisé; chaque pixel dont la luminance dépasse ce seuil est considéré comme appartenant à une source. Les pixels proches sont amalgamés, en fonction de critères de proximité [War91b], pour former une source de forme compacte. La luminance de seuil est déterminée à partir de l'éclairement pupillaire  $E_v$  (voir figure 5.21); elle est donnée par la relation suivante, émanant de diverses recommandations en éclairage [CIE83], [SLG92], [Cha82] :

$$L_{\text{seuil}} = \min \left( \max \left( \frac{10 \cdot E_v}{\pi} ; 600 \right) ; 2000 \right) \text{ [cd/m}^2\text{]}$$



**Figure 5.21 :** Détermination de la luminance de seuil  $L_{\text{seuil}}$  à partir de l'éclairement pupillaire (dans le plan de l'oeil). La luminance moyenne du champ visuel  $L_v$  figure également sur le graphe.

La répartition des sources ainsi déterminée peut être visualisée grâce à des cercles entourant celles-ci sur l'image de synthèse correspondante; la surface des cercles est proportionnelle à l'angle solide sous-tendu par la source.



**Figure 5.22 :** Comparaison de la composante directe du facteur de lumière du jour évaluée par RADIANCE et calculée analytiquement pour deux types de ciels couverts (pièce rectangulaire de 5 x 7 x 3 [m], munie de deux ouvertures en façade).

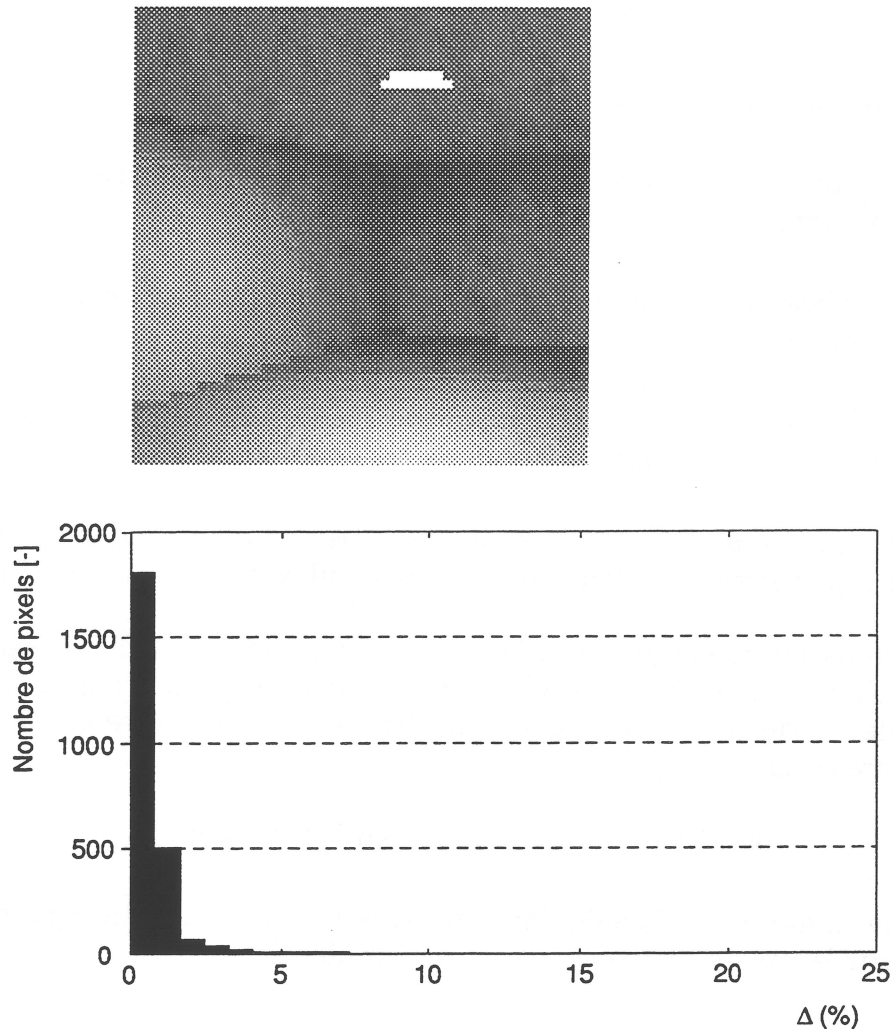
On constate sur la figure 5.22 la très bonne correspondance obtenue. Cette comparaison montre, toutefois, que le programme tend à sous-estimer légèrement l'éclairement direct (en moyenne de - 1,6%); la déviation relative maximale est obtenue pour le point le plus éloigné des fenêtres (-4,4%).

### *Interréflexions*

La validation du calcul des interréflexions a été accompagnée d'une étude de sensibilité, portant sur les paramètres du programme qui conditionnent le lancer de rayons (voir paragraphe 5.1.2).

Cette étude a été effectuée à partir d'une image de synthèse de petites dimensions (50 x 50 pixels), correspondant à un local rectangulaire (10 x 6 x 3 [m]) muni d'une ouverture zénithale (0.5 x 0.5 [m]). L'ouverture est placée au centre du plafond; toutes les surfaces sont lambertiennes.

L'image de référence, sur laquelle est basée cette comparaison (voir figure 5.23a), n'est autre que l'image moyenne, obtenue par additions de quatre images de synthèse semblables, calculées à l'aide de 4 programmes infographiques et par 4 personnes différentes. Elle résulte d'une comparaison inter-programmes, proposée par Holly Rushmeier de l'Université de Cornell (USA) [Com93d].



**Figure 5.23 :** a) image de référence (les pixels ont été agrandis sur cette figure)  
b) histogramme des déviations relatives des 2500 pixels par rapport à l'image de référence.

On remarque sur cet histogramme la très bonne concordance des 4 images obtenue : les déviations relatives supérieures à 2% ne sont observées que pour une fraction marginale de l'ensemble des pixels.

La convergence des résultats est excellente; elle confirme, jusqu'à preuve du contraire, la validité de ces derniers.

L'image de référence a aussi été utilisée pour mener à bien une étude de sensibilité (étude paramétrique). Celle-ci a été réalisée pour déterminer, en particulier, l'influence de six paramètres du programme sur :

- la précision du calcul des interrélaxions;
- le temps de calcul nécessaire.

## 6. SIMULATION DE SYSTEMES COMPLEXES

Des systèmes d'éclairage naturel nouveaux ont fait leur apparition ces dernières années. Parmi ceux-ci, les systèmes prismatiques, qui sont certainement les plus connus, équipent déjà un certain nombre de bâtiments [Bar86], [Ate84], [Swe92].

Les outils de simulation, permettant d'évaluer les performances de ces systèmes complexes, sont pratiquement inexistantes. Un effort important a donc été consacré, dans le cadre de ce projet, à l'élaboration de ces programmes.

Un concept d'éclairage naturel nouveau a été proposé, dans le même temps (systèmes anidoliques); il a été mis sur pied principalement à partir de simulations numériques, rendues possibles grâce aux améliorations apportées au programme RADIANCE (voir paragraphe 5.2.2).

Ces deux types de systèmes, ainsi que les programmes de simulation associés, sont brièvement présentés ici. La référence [Com93] en donne une description particulièrement détaillée.

### 6.1 Systèmes prismatiques

#### *Modèle de simulation*

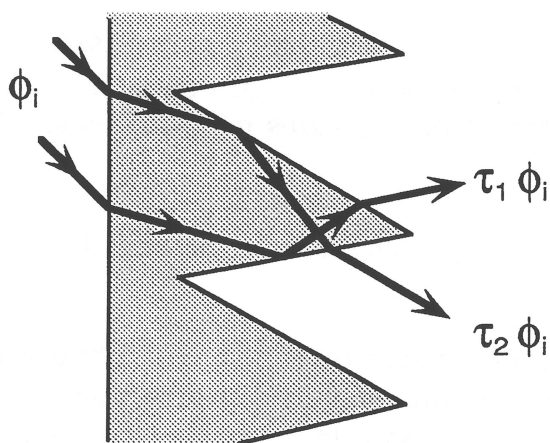
L'utilisation de la réfraction, au travers de prismes, pour diriger la lumière naturelle dans un bâtiment, a été proposée dans les années 60 [Hop66] [Lit90]. Depuis, plusieurs réalisations ont vu le jour, dont certaines en Suisse [Ate84] [Swe92]. Les éléments prismatiques, utilisés dans ces dernières, sont disponibles sur le marché (voir figure 6.1).

L'étude des performances lumineuses de ces systèmes est difficile. Les phénomènes physiques, régissant la propagation de rayons lumineux au travers de ces derniers, sont nombreux et complexes (voir figure 6.2); seule la prise en compte de l'ensemble de ces phénomènes (réflexion, réfraction, transmission) permet de mener à bien une étude méthodique et rigoureuse.

Un modèle général de simulation numérique de la propagation de rayons lumineux, au travers d'éléments prismatiques, a été développé pour cela [Pas91]. Celui-ci est basé sur les principales lois d'optique suivantes :

- lois de Descartes (réflexion, réfraction)
- loi de Fresnel (réflexions multiples)
- loi d'extinction lumineuse (transmission).

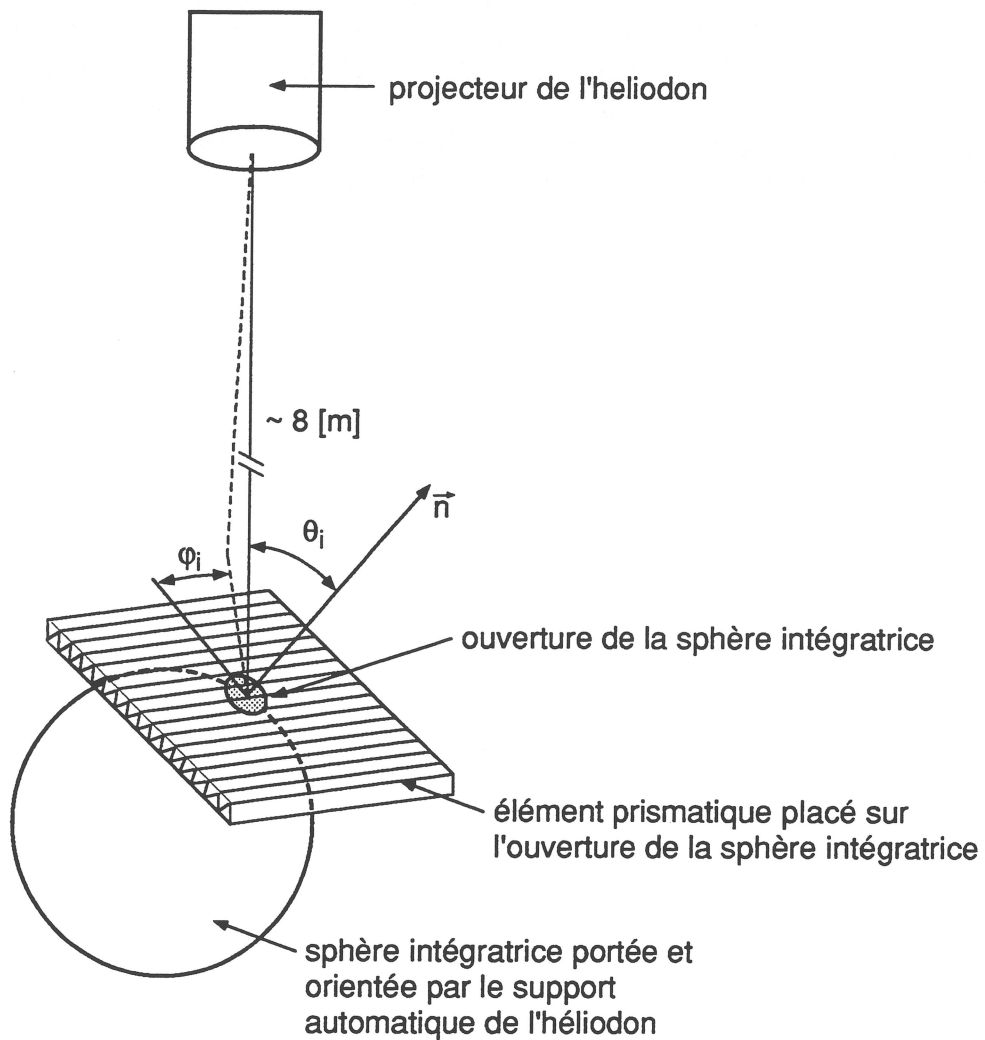
Il permet de déterminer la direction et le facteur de transmission de l'ensemble des rayons incidents sur la face d'un élément prismatique, et ceci quelles que soient leur direction d'incidence et les caractéristiques physiques de cet élément (indice de réfraction, disposition des faces, angles des rainures prismatiques, présence d'une face semi-réfléchissante).



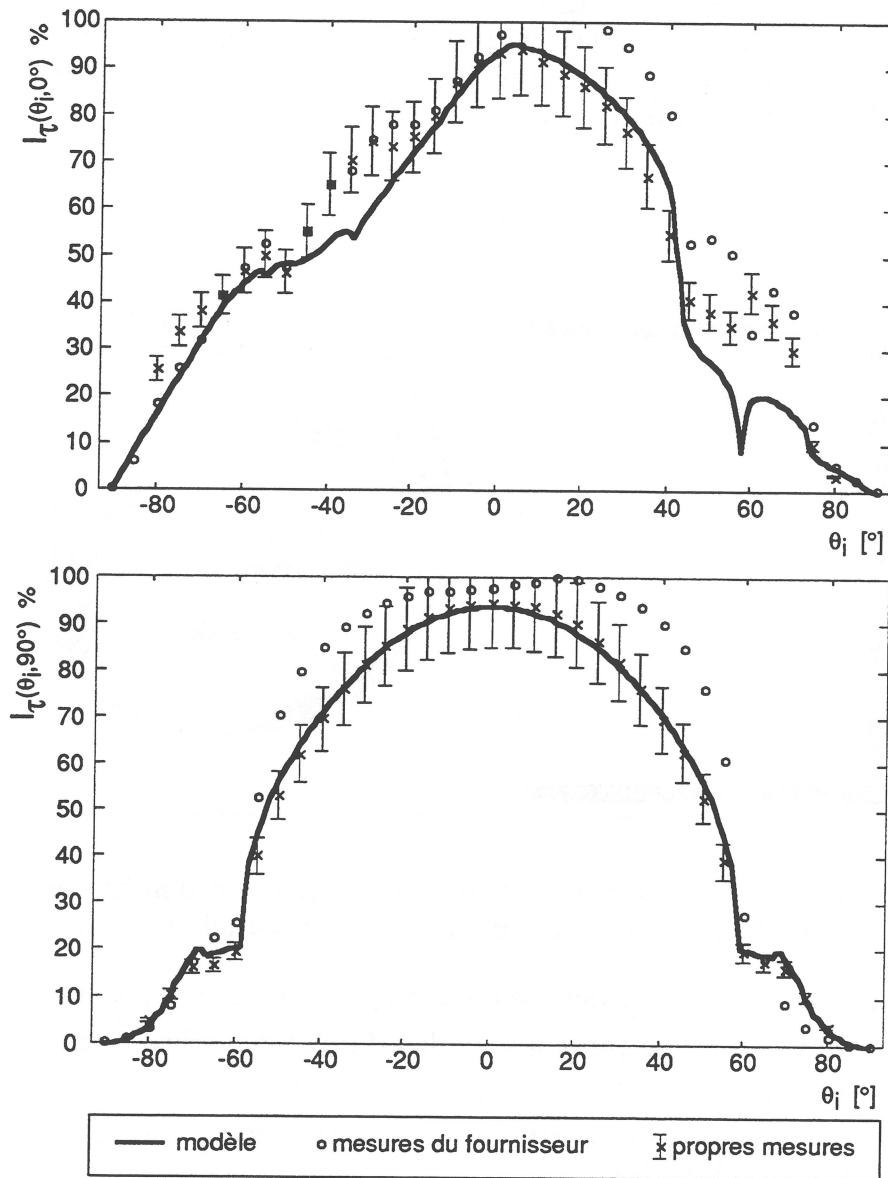
**Figure 6.2 :** Cheminement de deux rayons incidents parallèles au travers d'un élément prismatique : la disposition des faces, ainsi que les réflexions multiples, subdivisent ces derniers en plusieurs faisceaux de direction et d'intensité différentes.

### *Validation du modèle*

Ce modèle a été validé à l'aide de mesures effectuées sous le simulateur de lumière directe (héliodon automatisé) [Rhy91]. Les directions des rayons transmis, prédites par le modèle, ont été comparées, dans un premier temps, aux directions observées sur une maquette du local simulé, muni d'un élément prismatique en façade. La figure 6.3 illustre l'excellente concordance des résultats obtenus.



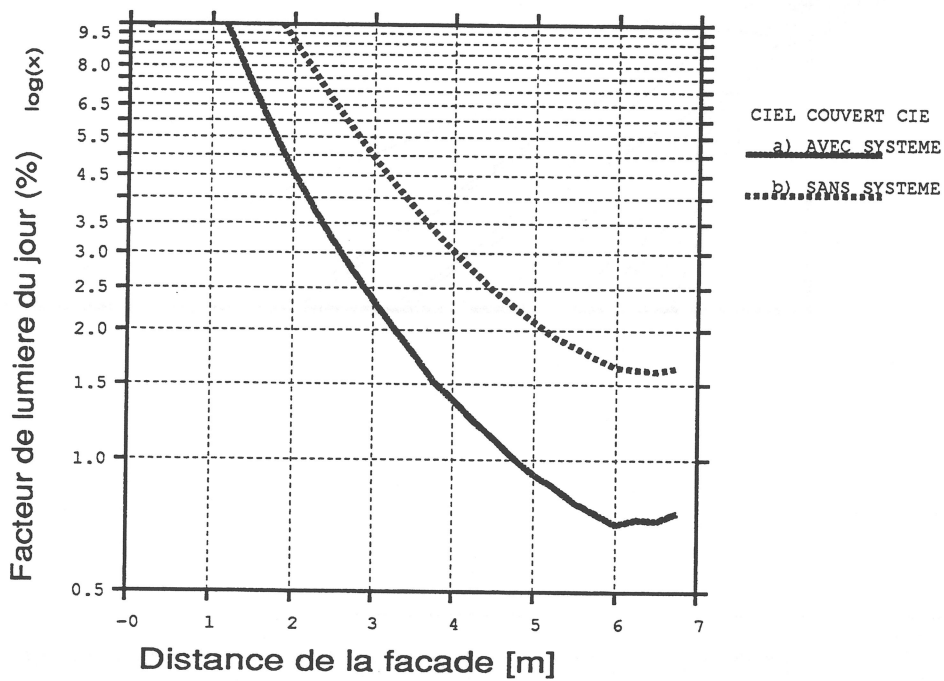
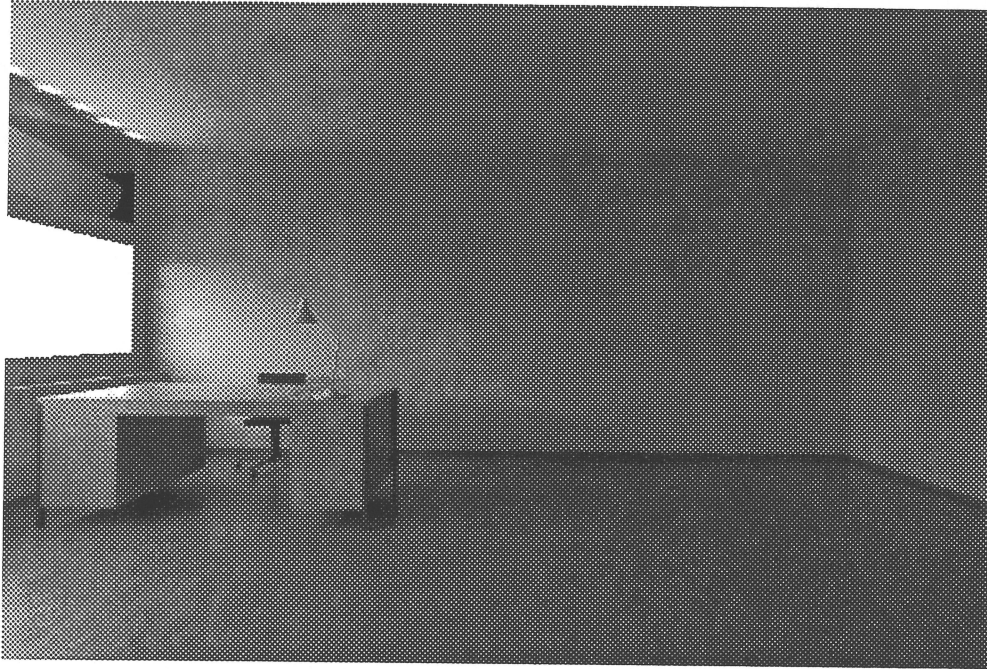
**Figure 6.4 :** Dispositif expérimental utilisé pour mesurer l'indicatrice  $I_\tau(\theta_i, \varphi_i)$  du facteur de transmission directionnel hémisphérique ( $I_\tau(\theta_i, \varphi_i) = \tau_h(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i$ )



**Figure 6.5 :** Comparaison des indicatrices de transmission calculées par le modèle et mesurées par le fournisseur, ainsi que par nos soins.

Type d'élément : g42; rayonnement incident sur la face non plane.

a)  $\phi_i = 0^\circ$       b)  $\phi_i = 90^\circ$



**Figure 6.7 :** Simulation d'un système prismatique.  
a) Visualisation du local de référence équipé d'un système prismatique triangulaire sur son ouverture supérieure (système "Vaucher").  
b) Profil du facteur de lumière du jour calculé, avec et sans système (simulations effectuées avec ciel couvert CIE).



Une analyse détaillée de ces performances, menées à bien pour la majorité des dispositifs existants, confirme ce bilan. Cette étude est rapportée dans la référence [Com93d].

## 6.2 Systèmes anidoliques

### 6.2.1 Principes de base

L'optique anidolique ("non-imaging optics") est un cadre théorique spécialement destiné à la conception de concentrateurs solaires. Ceux-ci ont pour fonction de concentrer le rayonnement solaire, en captant un faisceau de rayons lumineux, incidents sur une ouverture d'entrée et en dirigeant ces rayons sur une ouverture de sortie d'aire plus faible. Cela peut être réalisé sans aucune considération pour les distorsions d'image qui peuvent en résulter (par opposition à l'optique d'une caméra photographique par ex.).

Cette théorie est issue du développement d'un concentrateur optique, utilisé pour la détection de particules émises lors d'expériences en physique des hautes énergies [Win91]. Ce type de concentrateur est connu sous l'abréviation CPC (Compound Parabolic Concentrator). Il comprend deux réflecteurs de formes paraboliques. La figure 6.9 représente un concentrateur de ce type et illustre la propagation de certains rayons incidents.

On remarque que seuls les rayons inclinés, par rapport à l'axe du système, d'un angle inférieur ou égal à une valeur  $\theta_{\max}$  (ici,  $\theta_{\max} = 30^\circ$ ) sont dirigés vers l'ouverture de sortie. Tous les rayons d'incidence plus élevée sont rejetés après quelques réflexions. On constate aussi que la concentration de rayons lumineux s'accompagne inévitablement d'une restriction de l'acceptance angulaire du système. Physiquement ce fait s'explique par le principe de conservation de l'étendue [Com93d], qui mesure la "taille" du faisceau de rayons lumineux (dans le cas bidimensionnel de la figure 6.9, l'étendue du faisceau correspond à la section de l'ouverture d'entrée).

#### *Intérêt pour les systèmes d'éclairage naturel*

Cet effet sélectif sur les angles d'incidence (rayons admis ou rejetés) est la raison de notre intérêt pour ce type de système. Deux possibilités d'applications complémentaires apparaissent, en effet, particulièrement intéressantes pour le développement de nouveaux systèmes d'éclairage naturel [Win86] :

- sélection d'une portion bien définie de la voûte céleste, de laquelle on désire capter la lumière (par concentration);
- distribution vers l'intérieur du local d'un faisceau lumineux d'ouverture angulaire bien défini (par déconcentration).

## *Conception de systèmes anidoliques*

Pour concevoir un système d'éclairage naturel, formé de réflecteurs anidoliques, il est nécessaire de déterminer exactement la forme de ces derniers. La théorie de l'optique anidolique propose plusieurs méthodes pour déterminer des formes qui assurent la conservation de l'étendue (principe de base de cette théorie optique). La méthode la plus connue, et celle adaptée à notre cas, est dénommée "méthode du rayon extrême". Elle a pour avantage de rendre rigoureuse la conception de systèmes d'éclairage naturel sur la base de la seule observation du cheminement des rayons lumineux qui pénètrent dans le système à l'extrémité de l'ouverture d'entrée. Les références [Com93b] et [Com93d] donnent un aperçu de cette méthode.

### **6.2.2 Dispositif anidolique zénithal**

#### *Description du système*

Pour profiter au mieux des luminances élevées du ciel aux alentours du zénith, un concentrateur anidolique muni d'une ouverture d'entrée horizontale peut être placé en façade. Celui-ci a pour fonction de capter l'ensemble des rayons provenant de la moitié visible de la voûte céleste et de les concentrer sur une ouverture verticale dans le plan de la façade. Les rayons extrêmes, acceptés par l'ouverture d'entrée, proviennent tous du zénith. Derrière cette ouverture, à l'intérieur de la pièce, ce faisceau doit être déconcentré de façon à former un faisceau angulairement bien délimité et orienté vers le fond de la pièce. La figure 6.10 schématise le système développé sur ces considérations.

On remarque, que l'ouverture d'entrée horizontale et l'ouverture de sortie verticale, sont toutes deux de même largeur. Pour produire un faisceau plus fermé, le déconcentrateur intérieur devrait obligatoirement posséder une ouverture de sortie plus large et pénétrer plus profondément dans la pièce.

Les rayons étant concentrés sur la petite ouverture dans le plan de la façade, ils y parviennent avec des angles d'incidences compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Les rayons provenant du zénith (rayons extrêmes) arrivent sous une incidence de  $90^\circ$ . Pour éviter des pertes conséquentes, il est préférable de ne pas disposer de vitrage à cet emplacement (le facteur de transmission du vitrage est faible pour les grands angles d'incidence). L'enveloppe thermique du bâtiment doit alors s'étendre à la partie extérieure du système. A cet effet, un double vitrage est placé sur l'ouverture horizontale; une bonne isolation est disposée autour du réflecteur émergeant de la façade.

Un vitrage simple est placé devant l'ouverture de sortie pour éviter l'accumulation rapide de poussière sur les réflecteurs.

Ce système est similaire au dispositif prismatique triangulaire, présenté au paragraphe 6.1. La principale différence se situe toutefois au niveau des

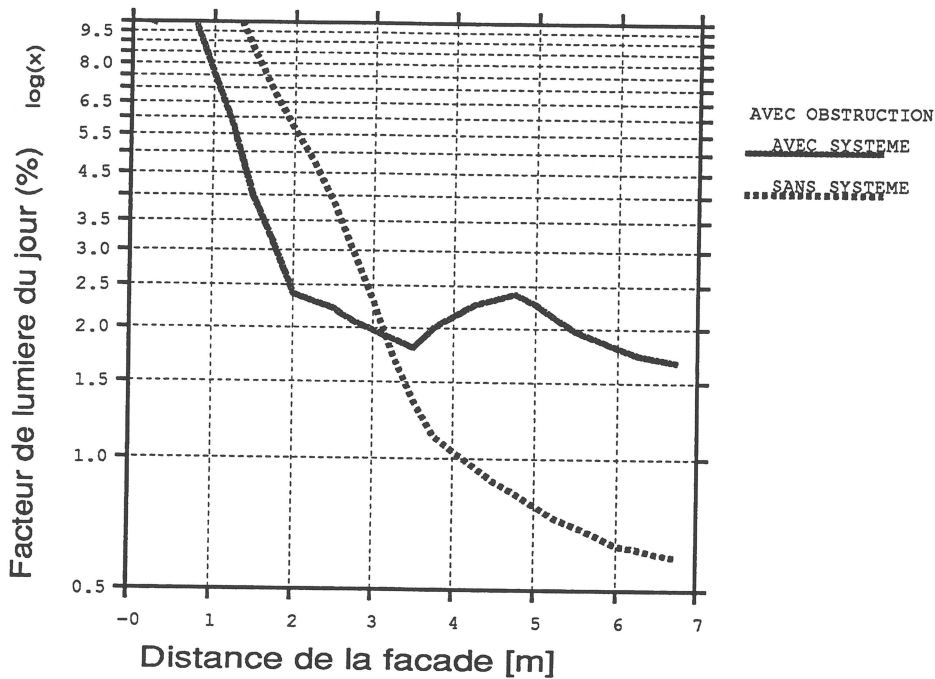
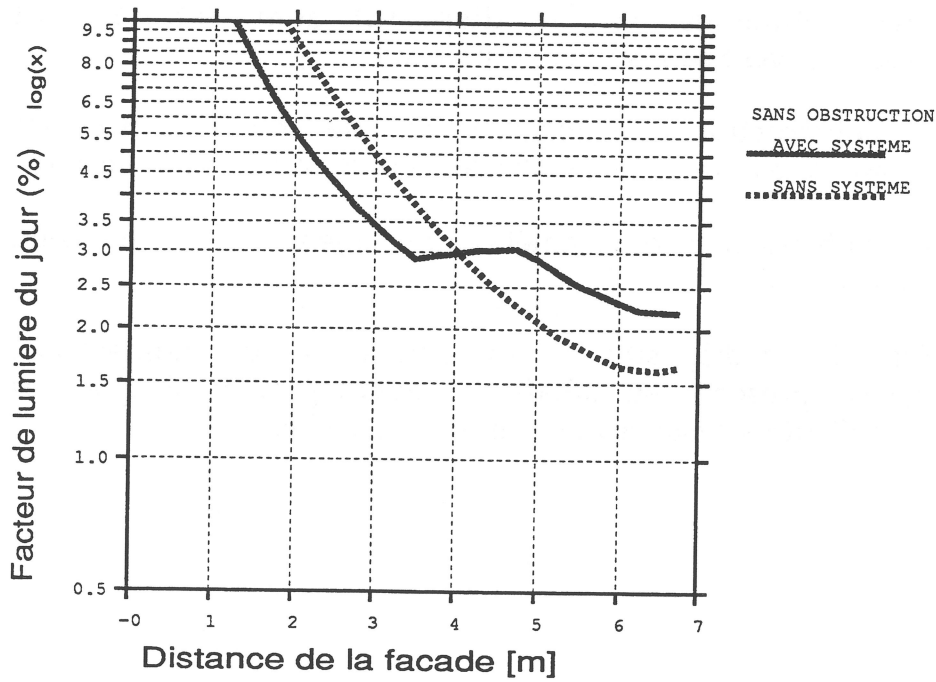


Figure 6.11 : Profils du facteur de lumière du jour dans un local équipé d'un dispositif anidolique zénithal

## 7. LOGICIEL DE TRANSFERT DE CONNAISSANCES

Dans le but de réaliser un transfert des connaissances issues du projet de recherche vers la pratique, il est envisagé d'élaborer un outil informatique d'aide à la décision en éclairage naturel, destiné aux architectes.

Cet outil doit permettre de fournir à ces derniers des informations pertinentes, en ce qui concerne le comportement prévisible de leur bâtiment vis-à-vis de la lumière naturelle. Il doit donc pouvoir être utilisé dès la phase de conception du projet, de façon à peser réellement sur le processus de décision, le but principal étant de soulever les problèmes au moment où ceux-ci peuvent être résolus.

Pour remplir cet objectif, cet outil doit satisfaire les critères essentiels suivants :

- mettre clairement en évidence l'impact des choix de l'architecte lors du processus de décision;
- permettre d'établir un diagnostic actualisé en temps réel des solutions envisagées;
- être simple et facile d'utilisation.

La structure de ce logiciel est présentée ci-après (lay-out du programme); sa réalisation est prévue dans le cadre de la continuation du projet de recherche actuel.

### 7.1 Analyse du processus de projétation architecturale

#### 7.1.1 *Situation des outils informatiques actuels*

Un certain nombre d'outils informatiques a été développé dans le domaine de l'éclairagisme [ADE92] [Ecl93]. La plupart de ces outils permet de simuler les phénomènes physiques, propres à la propagation de la lumière à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. L'utilisation de ces outils dans la pratique est confrontée toutefois aux difficultés suivantes :

- elle suppose la connaissance préalable des caractéristiques des locaux (simulations basées sur des paramètres géométriques et photométriques bien définis);
- elle nécessite une période d'apprentissage importante, difficilement compatible avec le fonctionnement d'un bureau d'architecture (nécessité de former une personne chargée spécifiquement des problèmes d'éclairage).

Dans la pratique, ces outils sont donc principalement utilisés par des spécialistes en éclairage, qui sont le plus souvent situés en marge du

Ce comportement spécifique est décrit de la manière suivante par certains auteurs :

... Face à un problème abstrait, le concepteur produit rapidement une solution grossière, qu'il affine ensuite pour satisfaire l'ensemble des exigences...

... Si le concepteur rencontre beaucoup d'échec et ne peut satisfaire des contraintes importantes, il abandonne la solution grossière, et construit une nouvelle solution de départ très différente...

... Les expériences réalisées montrent que cette technique leur permet non seulement de trouver la meilleure solution, sans disposer de toutes les solutions acceptables, mais leur fait aussi découvrir les règles qui régissent le problème...

... Les concepteurs utilisent donc un processus, où la découverte du problème, la synthèse de la solution et l'apprentissage ne peuvent être clairement séparés [Gue92].

Certains outils de décision prennent en compte ce point. Ils permettent à l'utilisateur de modifier certains paramètres de la solution étudiée et d'itérer ce processus autant de fois que cela est nécessaire [LES87]. Peu d'entre eux offrent une analyse critique de la solution proposée, dans le but de faciliter ce processus d'itération et d'aider le concepteur à prendre ces décisions.

### *Références architecturales*

L'étude du comportement des architectes montre que le "concepteur expérimenté", confronté à un problème nouveau, se remémore une solution ancienne afin de produire rapidement une première ébauche, qu'il modifie et adapte par la suite.

Parmi les "solutions génériques" utilisées par les architectes, une place très importante est occupée par des références externes. Il s'agit de prendre en compte la "culture architecturale", dans laquelle le concepteur va puiser, pour former son propre jugement.

Seuls quelques outils intègrent cet aspect de la problématique [Web93]; elle est malheureusement absente de la plupart des outils de conception et de dimensionnement en éclairage naturel [ADE92].

## **7.2 Description du logiciel**

### **7.2.1 Interaction avec l'utilisateur**

La structure de l'outil informatique considéré doit correspondre au comportement des concepteurs, décrit précédemment. Afin de prendre en

La notion d'ensemble flou permet l'utilisation de classes aux limites mal définies (comme "peu profond", "assez profond" ou "très profond"), ainsi que le passage progressif d'une propriété à une autre. Elle évite l'utilisation de notions arbitraires et de limites rigides.

### *Elaboration du projet*

L'utilisation de données exprimées sous forme linguistique et imprécises, compatibles avec la logique floue, est tout à fait adaptée à la description d'un bâtiment en cours de conception. Elle permet aux concepteurs de saisir facilement le sens de propriétés géométriques et photométriques (comme par exemple un local "profond", "assez profond" ou "très profond" et des parois "mates", "satinées" ou "brillantes"). Ces notions sont directement accessibles à ce dernier et permettent de définir aisément un projet, tout en restant au stade des intentions (avant-projet architectural).

Parmi les autres avantages de cette description sous forme linguistique, on mentionnera le fait que :

- les difficultés propres à la formulation conventionnelle des programmes de calcul d'éclairage naturel sont éliminées (par des données précises nécessaires);
- elle permet de se référer à des exemples de bâtiments (cas réels ou simulés), par le biais de ce langage (par exemple : comparaison avec un bâtiment de référence, caractérisé par des locaux très profonds);
- elle permet d'élaborer des règles d'expertise, exprimées dans le même langage, destinées à aider le concepteur dans ses décisions (par exemple : si le local est "profond", et le plafond "bas", alors "l'éclairage en fond de pièce sera insuffisant").

### *7.2.2 Organisation de l'outil*

Mis à part l'interface entre programme et utilisateur, l'organisation de l'outil s'inspire du comportement de l'architecte décrit au paragraphe 7.1.2. Il doit permettre :

- de raisonner à partir d'une ébauche de solution et de faciliter le processus d'itération, conduisant à une solution performante en éclairage naturel;
- de faciliter ce processus en apportant les informations et en formulant les questions appropriées;
- de comparer à tout instant une solution avec des exemples de bâtiments aux caractéristiques proches de cette dernière.

La figure 7.2 illustre la structure de cet outil. Celui-ci est constitué de 4 modules principaux.

### *Module "Planifier"*

Il permet d'élaborer le cahier des charges en éclairage du projet :

- le concepteur indique les caractéristiques fonctionnelles de ce dernier (affectation, utilisateurs, horaires, etc.);
- le programme fait ressortir les exigences principales en matière d'éclairage (niveaux d'éclairement recommandés, confort visuel, etc.).

Le module sera élaboré principalement à partir des recommandations existantes [SEV89] et sur la base de l'expertise en éclairage naturel, acquise dans la pratique [Ecl93].

### *Module "Construire"*

Il permet d'élaborer un projet de bâtiment ou de local. Cette élaboration se déroule de la manière suivante :

- les principales caractéristiques géométriques et photométriques des locaux, des ouvertures et du site d'implantation sont passées en revue;
- une succession de fenêtres de dialogue est offerte à l'utilisateur, qui exprime son choix sous forme linguistique (exemple : Hauteur du local → "moyenne");
- le programme mémorise les données sous forme d'un "modèle flou", utilisable par le module "Evaluer".

Ce module sera principalement mis sur pied à partir des connaissances issues du projet et de l'expérience pratique en éclairage naturel acquise grâce à ce dernier [Ber93], [Com92], [CRP93], [Cse93], [EOS93].

### *Module "Voir / Comparer"*

Ce module est principalement constitué d'une base de données, comprenant des exemples de bâtiments. Deux types d'exemples seront référencés :

- des bâtiments réels, pour lesquels des mesures "in-situ" en éclairage naturel sont disponibles;
- des modèles de simulation, représentatifs de différentes situations observables dans la réalité.

Chacun de ces exemples sera caractérisé sous forme linguistique, constituant ainsi un élément d'un ensemble flou. La base de données sera élaborée à partir des informations et des documents provenant :

## 8. CONCLUSION

L'effort de recherche principal de ce projet a porté sur le développement d'outils informatiques, permettant de concevoir et de dimensionner des systèmes de gestion de lumière naturelle. Ce dernier s'inscrit dans le cadre du programme de recherche interdisciplinaire LUMEN, visant à une utilisation optimale de la lumière naturelle dans les bâtiments afin de réduire leur consommation d'électricité.

Cet effort s'est traduit par la mise sur pied d'un ensemble intégré de programmes de calcul d'éclairage naturel, dénommé ADELINÉ (Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment). Celui-ci a pour principal but de faciliter la tâche du concepteur en éclairage, en offrant à ce dernier un nombre important de prestations informatiques, gérées par des interfaces conviviaux. Il a été adopté comme plate-forme informatique sur le plan international (Agence Internationale de l'Energie), en vue d'y intégrer d'autres logiciels de calcul. C'est le cas, dans l'immédiat, d'un programme de liaison avec la thermique du bâtiment (gains internes dus à l'éclairage).

### 8.1 Progiciel intégré ADELINÉ

L'ensemble intégré de programmes ADELINÉ constitue un environnement informatique de calcul d'éclairage complet et cohérent, qui permet au concepteur de traiter un problème d'éclairage naturel dans sa globalité (dessin du système, évaluation quantitative, visualisation, etc.). Dans le cadre de l'étude d'un système d'éclairage naturel, ce progiciel permet de réaliser les opérations suivantes :

- saisir les données géométriques d'un bâtiment à l'aide d'un programme de Conception Assistée sur Ordinateur (programme Scribe-Modeller).;
- importer des données géométriques provenant du programme de CAO AUTOCAD (format DXF);
- attribuer les propriétés photométriques correspondantes aux surfaces du modèle numérique du bâtiment (base de données comprenant plus de 250 matériaux et revêtements);
- convertir automatiquement ces données en un format compréhensible par deux programmes de calcul d'éclairage naturel (format des données d'entrée);
- choisir les paramètres de simulation numérique par l'intermédiaire d'interfaces conviviaux (masques de saisie);



*Programme RADIANCE (études et analyses détaillées)*

Ce programme, basé sur la technique du lancer de rayons, a fait l'objet d'importants développements numériques :

- élaboration d'une interface informatique convivial (saisie des données);
- intégration d'une base de données photométriques;
- prise en compte des sources virtuelles (miroirs, réflecteurs);
- prise en compte de sources secondaires (systèmes complexes de lumière naturelle);
- élaboration d'une routine de calcul pour systèmes prismatiques;
- optimisation du lancer de rayons en direction des sources (classification des sources);
- subdivision automatique des sources étendues (fenêtres, systèmes d'éclairage naturel);
- amélioration du calcul de la composante diffuse (interréflexions);
- représentation visuelle des grandeurs photométriques (éclairage, luminance);
- évaluation de l'autonomie en éclairage naturel du local;
- évaluation de l'inconfort visuel (indices d'éblouissement, fraction prévisible d'insatisfaits);
- procédure d'automatisation du calcul de performances;
- contribution à la validation du programme.

L'ensemble de ces travaux représentent les principaux développements subis par ce programme, au cours de ces dernières années.

*Diffusion du progiciel*

Le progiciel ADELIN est opérationnel. Au cours de son développement, ce dernier a été constamment testé et amélioré; diverses fonctionnalités lui ont été adjointes. La procédure suivante a été utilisée pour mener à bien l'évaluation du programme :

- utilisation de l'outil dans le cadre de mandats d'étude en éclairage naturel (confrontation avec des applications réelles);
- diffusion de versions provisoires du logiciel dans différents pays (60 versions distribuées).

La collaboration internationale, établie au sein de l'Agence Internationale de l'Energie, a contribué à stimuler l'évaluation et le perfectionnement du programme. Sa diffusion sera entreprise par cette organisation dès 94.

- de raisonner à partir d'une ébauche de solution et de faciliter le processus d'itération, conduisant à une solution performante en éclairage naturel;
- de faciliter ce processus en apportant les informations et en formulant les questions appropriées;
- de comparer à tout instant une solution avec des exemples de bâtiments aux caractéristiques proches de cette dernière.

L'évaluation et la recherche d'exemples sera réalisée à l'aide des règles de logique floue. Les appréciations et commentaires seront exprimés sous forme linguistique.

#### 8.4 Perspectives futures

L'ensemble de ces outils informatiques complète à merveille l'équipement expérimental (Laboratoire de lumière naturelle), mis sur pied dans le cadre du programme LUMEN. Bien qu'opérationnels, ces outils sont toutefois susceptibles d'être améliorés sous différents aspects; les développements suivants étant envisageables :

- extension du logiciel à l'éclairage artificiel;
- intégration d'une base de données de luminaires et de sources artificielles;
- calcul des échanges radiatifs dans les systèmes de lumière naturelle.

La diffusion prochaine du progiciel ADELINÉ, au niveau des pays membres de l'Agence Internationale de l'Energie, contribuera certainement à accroître encore le champ d'utilisation du programme dans la pratique. Son application au développement de nouveaux systèmes de lumière est en cours : c'est le cas, en particulier, des systèmes anidoliques qui s'avèrent d'ores et déjà extrêmement prometteurs.

- [CIE83] Commission Internationale de l'Eclairage  
Discomfort Glare in the Interior Working environment  
Publication CIE n° 55, Paris, 1983.
- [CIE87] Commission Internationale de l'Eclairage  
Vocabulaire international de l'éclairage  
Publication CIE n° 17.4, 1987.
- [Coh85] M.F. Cohen, D.P. Greenberg  
The Hemi-cunbe: a radiosity solution for complex environments  
Computer Graphics, Siggraph'85 Proceeding, Vol 19, n°3, 1985.
- [Coh88] M.F. Cohen, S.E. Chen, J.R. Wallace, D.P. Greenberg  
A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation  
Computer Graphics, Siggraph '88 Proceedings, vol. 22, n°4, 1988.
- [Com91] R. Compagnon, C. Green, J.-L. Scartezzini  
First development of ADLINE : A link between a CAD program and daylighting design tools  
Architecture and Urban Space PLEA'91 Conference Proceedings, Seville, Spain, September 1991.  
& Sun at Work in Europe, vol. 7, n° 1, 1992.
- [Com92a] R. Compagnon, B. Paule, J.-L. Scartezzini  
Etude en éclairage naturel de la nouvelle imprimerie A.B.C. à Schoenbuehl (BE)  
Publication du CUEPE No 48, Université de Genève, 1992.
- [Com92b] R. Compagnon, F. Di Pasquale, B. Paule, J.-L. Scartezzini  
Simulation de systèmes d'éclairage naturel complexes  
7. Schweizerische Status-Seminar, Energieforschung im Hochbau, ETH-Zürich, 1992.
- [Com93a] R. Compagnon, B. Paule, J.-L. Scartezzini  
Design of New Daylighting Systems Using Adeline Software  
Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Florence, Italy, 1993.
- [Com93b] R. Compagnon, J.-L. Scartezzini, B. Paule  
Application of Nonimaging Optics to The Development of New Daylighting systems  
ISES Solar World Congress, Budapest, Hungary, 1993.
- [Com93c] R. Compagnon, C. Green  
PLINK 2.0: User's Guide  
LESO-PB, EPF-Lausanne, 1993.
- [Com93d] R. Compagnon  
Simulations numériques de systèmes d'éclairage naturel à pénétration latérale  
Thèse de doctorat, EPF-Lausanne, 1993
- [CRP93] Centre de Recherche sur la Physique des Plasmas  
Protection solaire anidolique  
Programme DIANE, 1994.
- [CSE93] CSEM (Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique)  
Siège social à Neuchâtel : Gestion optimisée des stores extérieurs à lames  
Programme DIANE, 1993.

- [Gol93] Y. Golay, L. Deschamps, I. Vogel  
Lumière naturelle et énergétique, Etudes typologiques  
BAUDOCU Bulletin 3/93.
- [Gor91] J.M. Gordon, A. Rabl  
Calculation of Flux Density Produced by CPC Reflectors on Distant Targets  
Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer, Roland Winston, Robert L. Holman, Editors, Proc. SPIE 1528, 1991.
- [Gor92a] J.M. Gordon, P. Kashin, A. Rabl  
Nonimaging Reflectors for Efficient Uniform Illumination  
Applied Optics, vol. 31, n° 28, 1992.
- [Gor92b] J.M. Gordon, A. Rabl  
Nonimaging compound parabolic concentrator-type reflectors with variable extreme direction  
Applied Optics, vol. 31, N° 34, 1992.
- [Gou88] J. Goupy  
La méthode des plans d'expériences - optimisation du choix des essais & de l'interprétation des résultats  
Dunod, 1988.
- [Gre89] Green C., Cooper D. and Wells J.  
Scribe-Modeller, Operating Manual  
Version 3.2, Ecotech Design Ltd. Sheffield, UK, 1980
- [Gry88] A. Grynberg  
Comparison and Validation of Radiance and Superlite  
rapport interne, Windows and Daylighting Group, LBL, Berkeley, 1988.
- [Gry89] A. Grynberg  
Validation d'un programme de simulation d'éclairage: Radiance  
LBID 1575, LBL, Berkeley, 1989.
- [Gry90] A. Grynberg  
Un nouvel instrument pour la réflectométrie  
Mémoire de DEA, Laboratoire de Robotique de Paris, Université ParisVI, Paris, 1990.
- [Gue92] F. Guena  
Réutilisation de solutions génériques pour résoudre des problèmes de conception  
Laboratoire Formes et Intelligence Artificielle Université Paris VI, janvier 1992.
- [Gut63] S. K. Guth  
A Method for the Evaluation of Discomfort Glare  
Illuminating Engineering, May 1963.
- [Hop66] R.G. Hopkinson, P. Petherbridge, J. Longmore  
Daylighting  
Heinemann, London, 1966.
- [Hop72] R.G. Hopkinson  
Glare from Daylighting in Buildings  
Applied Ergonomics, vol.3, n°4, 1972.
- [IES84] Illuminating Engineering Society of North America:  
Lighting Handbook- reference volume  
IES, New-York, 1984.

- [Mar92] P. Marchal  
Réseau de neurone et logique floue : deux approches complémentaires  
Tiré à part du bulletin de la Société Suisse de Chronométrie, N° 10, juillet 1992.
- [Mey93] J.J Meyer, D. Francioli, P. Rey  
Aménagement des postes à écran et variabilité liées aux conditions lumineuses et aux réaction d'inconfort des opérateurs: application d'un nouveau modèle  
Lux Europa 93 Proceedings, Edimburgh, 1993.
- [Mil91] M. Milne, U. Yuliatmo  
An Interactive Graphic Interface for Daylighting Design with Superlite  
Buildings Simulation '91, Conference Proceedings, Sophia-Antipolis, Nice, 1991.
- [Mod82] M.F. Modest  
A General Model for the Calculation of Daylighting in Interior Spaces  
Energy and Buildings, vol. 5, 1982.
- [Mol93] B. Molineaux, P. Ineichen, O. Guisan  
Mesures d'éclairage à Genève: ciels moyens mensuels - ciels dynamiques journaliers - fréquence d'occurrence des paramètres d'éclairément  
Groupe de Physique Appliquée, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, rapport interne, juin 1993.
- [Moo73] Moon P. and Spencer D.  
Illumination from a nonuniform sky  
Illuminance Engineering 37, 707-726, 1942.
- [Nav84] M. Navvab, M.Karayel, E. Ne'eman, S. Selkowitz  
Analysis of Atmospheric Turbidity for Daylight Calculations  
Energy and Buildings, vol. 6, 1984.
- [NBS77] National Bureau of Standards  
Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance  
NBS Monograph 160, Washington, 1977.
- [Opp56] A.K. Oppenheim  
Radiation analysis by the network method  
Transactions of the ASME, May 1956.
- [Pap87] K.M. Papamichael and S.E. Selkowitz  
Simulating the Luminous and Thermal Performance of Fenestration Systems  
Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-24243, Berkeley, 1987.
- [Pas91] F. Di Pasquale  
Etude de la transmission lumineuse d'un vitrage prismatique  
Travail de diplôme, EPFL LESO-PB, Decembre 1991.
- [Per91] M. Perraudeau, G. Le Strat  
A Design Tool for Interior Daylighting Description of Luminous Environment with Image Synthesis  
Buildings Simulation '91, Conference Proceedings, Sophia-Antipolis, Nice, 1991.
- [Rhy91] R. Rhyner, C. Roecker, J.-L. Scartezzini  
An Automated Heliodon for Daylighting Building Design  
Proceedings of ISES Solar World Congress, 1991.

- [Sta92] S. Stannard  
The Evolution of Lighting Software - From Humble Origins to a New Reality  
Lighting Design + Application (LD+A), vol. 22, n°6, 1992.
- [Str90] G. Le Strat  
Modélisation du champ radiatif - application à la simulation des ambiances lumineuses naturelles intérieures sur écran graphique couleur  
CSTB, Nantes, 1990.
- [Sum91] B. Sumpston, B. Haglund, A. Zabrodsky  
Imagining Light: A Visualization of Daylighting Data  
CAAD futures '91, edited by G.N. Schmitt, Friedr. Vieweg & Sohn,  
Braunschweig/ Wiesbaden, 1992.
- [Sup85] Superlite 1.0, User manual  
Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, USA, 1985.
- [Sup90] Superlink 1.0, Documentation Manual  
Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, RFA, 1990.
- [Sup93] SUPERLITE-IEA TASK 12, Programme manual  
Fraunhofer Institute, Stuttgart (1993).
- [Swe92] G.E. Sweitzer  
Fixed-Angle Prismatic Panel Daylighting: Daylighting Distribution in Perimeter Office and Workshop Areas  
CIBSE National Lighting Conference, 1992
- [Sze91] M. Szerman  
Manuelle Tageslichtnutzung in Büroräumen  
CISBAT '91, Conférence internationale, Energie solaire et bâtiment, Lausanne 1991.
- [Tra93] Transjurane (centre d'entretien mixte) : optimisation d'un système d'ouverture en façade  
Programme DIANE, 1993.
- [Tre83] P.R. Tregenza  
The Monte Carlo Method in Lighting Calculations  
Lighting Research and Technology, vol. 15, n° 4, 1983.
- [Tus66] Tuchschnid E. et Mathis E.  
Etudes sur maquettes effectuées sous ciel artificiel  
Schweizerische Technische Zeitschrift N° 38/39, 1966.
- [Va193] Val d'Arve (Ecole du) : Eclairage en second-jour  
Programme DIANE, 1994.
- [Wa187] J.R. Wallace, M.F. Cohen, D.P. Greenberg  
A two-pass solution to the rendering equation: a synthesis of ray tracing and radiosity methods  
Computer Graphics, Siggraph'87 Proceedings, vol. 21, n°4, 1987.
- [War88a] G.J. Ward, F.M. Rubinstein.  
A New Technique for Computer Simulation of Illuminated Spaces  
Journal of the Illuminating Engineering Society, vol. 17, n°1, 1988.

## ANNEXE A

### NOMENCLATURE

Cette nomenclature est destinée à expliciter les termes et expressions les plus courantes en photométrie.

**Champ visuel** [deg]

Etendue angulaire des directions de l'espace dans laquelle un objet peut être perçu, lorsque la tête et les yeux sont immobiles. On distingue les champs visuels monoculaire et binoculaire.

**Contraste de luminances**  $C [-], C = \frac{L - L_0}{L_0}$

Quotient de la différence entre la luminance  $L$  [ $\text{Cd}/\text{m}^2$ ] et une luminance de référence  $L_0$  [ $\text{Cd}/\text{m}^2$ ] par la luminance  $L_0$ .

**Courbe de sensibilité**  $V (\lambda)$

Courbe proportionnelle à la sensation de luminosité provoquée par des rayons de longueurs d'ondes différentes, mais de même puissance. Le maximum de cette courbe ( $\lambda_{\text{max}} = 555 \text{ nm}$ ) correspond à la couleur jaune-vert, qui est la mieux perçue par l'oeil humain.

**Eclairement**  $E [\text{Lx}], E = \frac{d\phi}{dS}$

Flux lumineux  $d\phi$  [ $\text{Lm}$ ] reçu par unité de surface  $dS$  [ $\text{m}^2$ ]. L'éclairement se mesure en Lux.

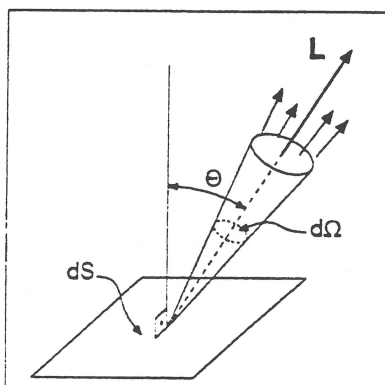
**Efficacité lumineuse**  $\eta [-], \eta = \frac{\phi}{\phi_e}$

Quotient du flux lumineux  $\phi$  [ $\text{Lm}$ ], caractéristique d'un rayonnement électromagnétique, par le flux d'énergie  $\phi_e$  [ $\text{W}$ ] de ce même rayonnement. Dans le cas d'une source, on remplace le flux d'énergie par la puissance électrique consommée.

## Luminance

$$L \left[ \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2} \right], L = \frac{d^2\phi}{d\Omega dS \cos\theta}$$

Quotient du flux lumineux  $d\phi$  [Lm], émis ou réfléchi par unité de surface  $dS$  [ $\text{m}^2$ ] d'un matériau dans une direction définie par un cône élémentaire, par le produit de l'élément d'angle solide  $d\Omega$  [sr] correspondant et de la surface apparente de l'élément de surface  $dS$ .



La luminance est définie en un point de la surface d'une source ou d'un matériau et pour une direction donnée. Elle s'exprime en Candelas/ $\text{m}^2$ .

## Spectre visible

Partie du rayonnement électromagnétique, désigné par lumière, qui provoque une sensation visuelle, désignée par lumière. Les longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm font partie du spectre visible.

## Température de couleur

$$T_c [\text{K}]$$

Température absolue d'un corps noir émettant un rayonnement de même caractéristique chromatique que celui considéré. La température de couleur s'exprime en Kelvin; le soleil émet un rayonnement d'une température de couleur de 5700 K.

Référence : "*Éléments d'éclairagisme*", Manuel OFQC, Programme d'action RAVEL, Berne (1993)



Peintures				
Nom	Description	Y	x	y
4K409	Jaune	0.460	0.397	0.425
2K221	Jaune-verdâtre	0.459	0.366	0.392
3K301	Gris clair	0.451	0.331	0.345
2K204	Beige	0.450	0.351	0.372
2K210	Beige	0.443	0.359	0.367
1E123	Gris-caillou	0.432	0.337	0.346
RAL7032	Gris-caillou	0.432	0.337	0.346
1K107	Gris clair	0.432	0.317	0.336
1K104	Gris clair	0.430	0.327	0.345
2K213	Beige	0.428	0.363	0.376
3K308	Beige	0.427	0.344	0.360
7K705	Bleu-vert	0.422	0.310	0.342
1K115	Gris-bleu	0.418	0.299	0.319
2K223	Jaune	0.413	0.358	0.384
7K711	Vert	0.412	0.315	0.367
6K603	Bleu clair	0.407	0.286	0.314
2K214	Jaune	0.406	0.379	0.395
2K212	Beige-brunâtre	0.398	0.379	0.378
1K124	Gris	0.395	0.324	0.337
1K112	Gris	0.393	0.306	0.323
1K108	Gris clair	0.388	0.317	0.335
2K215	Jaune	0.379	0.377	0.397
1K116	Gris-bleu	0.378	0.298	0.318
4E404	Jaune-chrome	0.377	0.464	0.433
RAL1007	Jaune-chrome	0.377	0.464	0.433
2K225	Brun	0.375	0.377	0.391
4K410	Jaune	0.374	0.432	0.413
1K126	Gris	0.368	0.335	0.354
1K127	Beige	0.367	0.345	0.364
4K411	Ocre	0.351	0.426	0.391
2K211	Jaune-brunâtre	0.337	0.370	0.379
7K713	Vert clair	0.334	0.362	0.400
6K604	Bleu	0.326	0.281	0.309
RAL2008	Orange-rouge clair	0.323	0.469	0.408
7K712	Vert	0.315	0.337	0.381
3K306	Gris	0.312	0.324	0.346
4K412	Beige-orange	0.307	0.427	0.396
7K706	Bleu-vert	0.305	0.309	0.350
3K309	Gris	0.300	0.329	0.344
1E121	Gris-argent	0.298	0.311	0.321
RAL7001	Gris-argent	0.298	0.311	0.321
2K224	Olive	0.292	0.368	0.399
7E712	Vert pâle	0.287	0.341	0.364
RAL6021	Vert pâle	0.287	0.341	0.364
2K229	Vert	0.282	0.352	0.378
2K228	Brun	0.280	0.382	0.384
1K128	Beige	0.278	0.344	0.363
2K227	Brun	0.278	0.385	0.387
2K226	Brun	0.264	0.386	0.384
1E122	Gris-pierre	0.259	0.332	0.340
RAL7030	Gris-pierre	0.259	0.332	0.340
4K413	Brun-orange	0.253	0.441	0.391

Peintures				
Nom	Description	Y	x	y
8K803	Olive	0.251	0.403	0.468
1K129	Gris	0.249	0.338	0.362
3K302	Gris clair	0.246	0.320	0.341
3K311	Gris	0.245	0.326	0.343
4K414	Brun clair	0.231	0.423	0.383
5K505	Brun-rouge	0.230	0.391	0.353
7K714	Vert	0.220	0.354	0.409
RAL6018	Vert-jaune	0.218	0.376	0.450
3K303	Gris	0.217	0.321	0.343
8K806	Bleu	0.209	0.242	0.263
1E105	Gris-béton	0.201	0.332	0.341
RAL7023	Gris-béton	0.201	0.332	0.341
8K805	Rouge-orange	0.197	0.467	0.361
3K310	Gris	0.184	0.331	0.346
3K312	Gris-brun	0.179	0.347	0.356
3K313	Brun-beige	0.179	0.349	0.359
7E704	Vert-réséda	0.169	0.349	0.379
RAL6011	Vert-réséda	0.169	0.349	0.379
5E520	Bleu-lila	0.169	0.277	0.264
RAL4005	Bleu-lila	0.169	0.277	0.264
3K307	Gris	0.169	0.328	0.350
RAL2002	Orange-sang	0.162	0.485	0.392
3K304	Gris foncé	0.149	0.329	0.346
1K130	Gris	0.147	0.308	0.337
1K134	Gris foncé	0.138	0.302	0.315
RAL6024	Vert-traffic	0.133	0.318	0.398
1E119	Gris-bleu	0.121	0.304	0.317
RAL7031	Gris-bleu	0.121	0.304	0.317
5E509	Rouge-feu	0.119	0.473	0.381
RAL3000	Rouge-feu	0.119	0.473	0.381
7E706	Vert-émeraude	0.086	0.351	0.427
RAL6001	Vert-émeraude	0.086	0.351	0.427
RAL6016	Vert-turquoise	0.079	0.285	0.364
7E711	Vert-olive	0.071	0.360	0.381
RAL6003	Vert-olive	0.071	0.360	0.381
RAL5017	Bleu-traffic	0.069	0.177	0.199
5E504	Rouge-rubis	0.065	0.488	0.376
RAL3003	Rouge-rubis	0.065	0.488	0.376
6E610	Bleu-gentiane	0.052	0.183	0.196
RAL5010	Bleu-gentiane	0.052	0.183	0.196
RAL4004	Violet-bordeaux	0.042	0.408	0.320
5E505	Rouge-pourpre	0.042	0.467	0.368
RAL3004	Rouge-pourpre	0.042	0.467	0.368
RAL5002	Bleu d'outremer	0.039	0.171	0.162
3E311	Brun-acajou	0.032	0.415	0.381
RAL8016	Brun-acajou	0.032	0.415	0.381
5E506	Rouge-vin	0.029	0.450	0.359
RAL3005	Rouge-vin	0.029	0.450	0.359
RAL4007	Violet-pourpre	0.027	0.342	0.291
6E605	Bleu-saphir	0.026	0.202	0.207
RAL5003	Bleu-saphir	0.026	0.202	0.207
RAL5022	Bleu-nuit	0.023	0.197	0.184

ANNEXE C

Fonction bidirectionnelle de distribution  
du facteur de réflexion (BRDF)

La fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de réflexion (en anglais : bidirectional reflectance distribution function BRDF) permet de caractériser précisément la réflexion de la lumière sur une surface. La référence [NBS 77] en donne une présentation détaillée; un résumé est présenté ci-après.

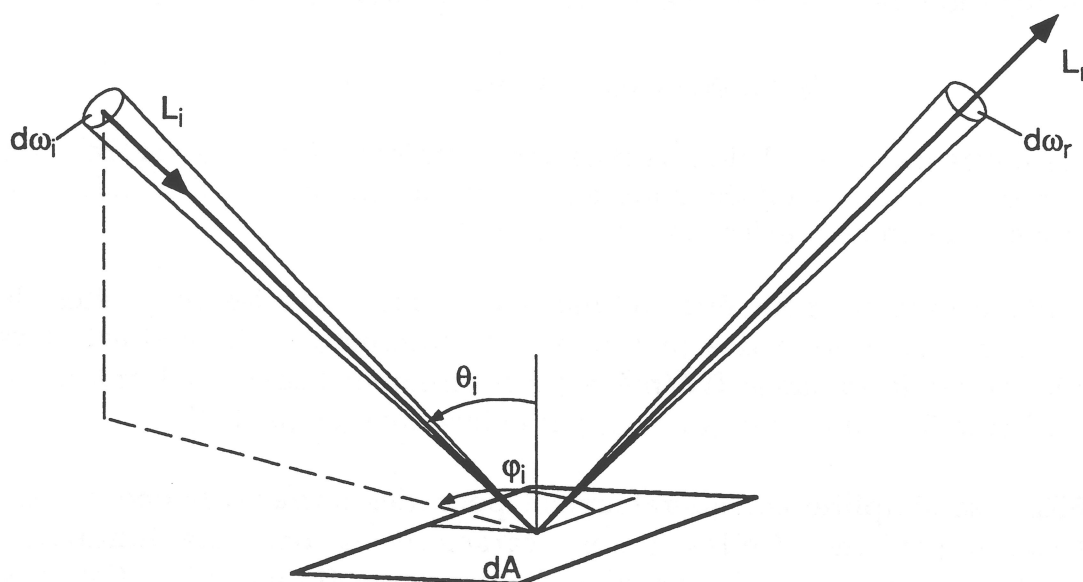


Figure C.1 : Eléments nécessaires à la définition de la fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de réflexion (BRDF).

Supposons un élément de surface  $dA$  éclairé par un élément de flux  $d\phi_i$  provenant de l'angle solide  $d\omega_i$  ( $d\omega_i$  est repéré par les angles  $\theta_i$  et  $\varphi_i$ ). Sur la base de la définition de la luminance  $L_i$ , on peut écrire :

$$\begin{aligned} d\phi_i &= L_i \cdot \cos\theta_i \cdot d\omega_i \cdot dA \\ &= dE_i \cdot dA_i \end{aligned}$$

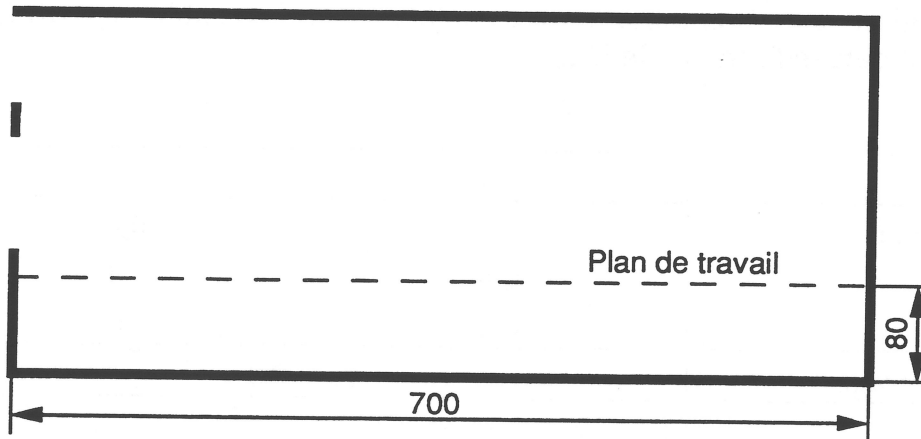
avec  $dE_i$  = éclairement au niveau de la surface  $dA$  dû aux flux  $d\phi_i$   
 $d\omega_i$  = élément d'angle solide dans la direction  $(\theta_i, \varphi_i)$   
 $(d\omega_i = \sin\theta_i d\theta_i d\varphi_i)$ .

ANNEXE D

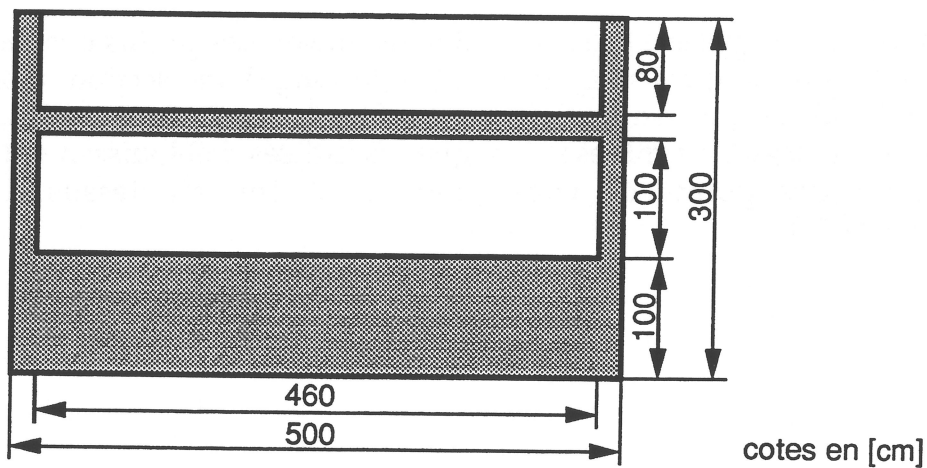
Description du local de référence

Afin de pouvoir comparer les performances de divers systèmes d'éclairage naturel dans les mêmes conditions, un local de référence a été défini (cf. figure D1).

**Section verticale:**



**Elevation façade sud:**



**Figure D1 :** Local de référence utilisé pour les simulations de systèmes de lumière naturelle.

## REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été rendu possible grâce au soutien des organismes et personnes suivantes :

- Le Fonds National pour la Recherche Energétique (NEFF), qui a financé la plus grande part de ce projet;
- L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et l'Université de Genève, qui ont soutenu ce dernier;
- M. le Dr. P. E. Zinsli, Office fédéral de l'Education et de la Science, parrain du projet;
- le Prof. C. Green, University of Sheffield, pour son appui en informatique

ainsi que tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à ce travail :

...qu'ils soient ici tous sincèrement remerciés !

