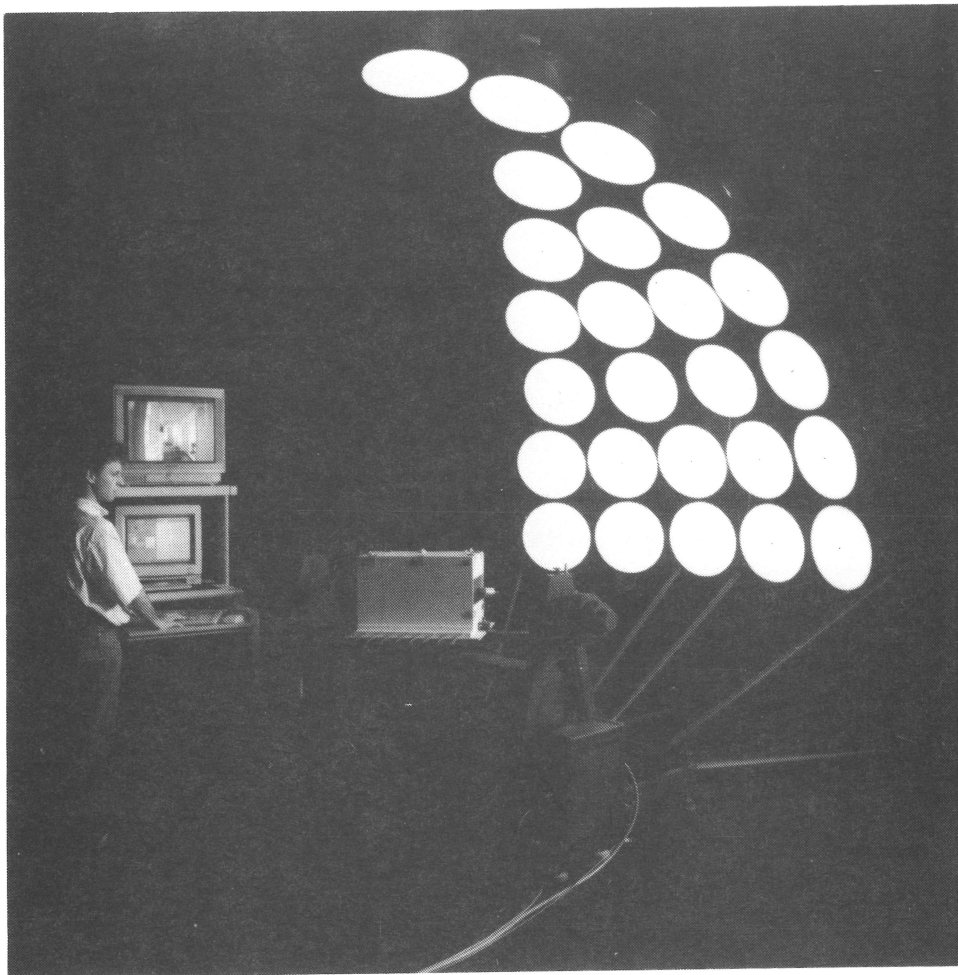


LABORATOIRE DE LUMIERE NATURELLE

Programme interdisciplinaire LUMEN

"Lumière naturelle et énergétique du bâtiment"

Projet OFEN



UNIVERSITÉ DE GENÈVE



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Scartezzini

LABORATOIRE DE LUMIERE NATURELLE

Programme interdisciplinaire LUMEN
"Lumière naturelle et énergétique du bâtiment"

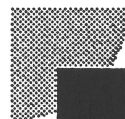
Projet OFEN

Prof. J.-L. Scartezzini	(CUEPE)	responsable du projet
L. Michel	(LESO-PB)	ing.-physicien
C. Roecker	(LESO-PB)	ing.-électricien
R. Rhyner	(LESO-PB)	ing.-microtechnicien

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 de mettre sur pied des installations expérimentales, permettant de concevoir, d'étudier et d'évaluer des systèmes de gestion de lumière naturelle à partir de maquettes. Il s'inscrit dans le cadre du programme de recherche interdisciplinaire LUMEN, visant à une utilisation optimale de l'éclairage naturel dans les bâtiments afin de réduire leur consommation d'électricité. Ces installations comprennent les dispositifs suivants :

- un simulateur de lumière directe (héliodon automatisé);
- un simulateur de lumière diffuse (ciel artificiel à balayage);
- un équipement de diagnostic en éclairage naturel (vidéo-confimètre, etc.).

Le simulateur de lumière directe est constitué d'une source de lumière artificielle, placée à la verticale d'un support motorisé et automatisé (héliodon). Celle-ci reproduit fidèlement les caractéristiques photométriques du flux lumineux provenant directement du soleil (éclairage uniforme, rayons parallèles). L'héliodon est asservi à un micro-ordinateur; il permet de reproduire le mouvement apparent du soleil pour tout lieu (latitude, longitude) et tout instant (heure, jour, mois). Un système d'acquisition de données et de visualisation permet de mesurer l'éclairage à l'intérieur des maquettes et d'étudier les ambiances lumineuses, caractéristiques de situations d'éclairage direct.

Le simulateur de lumière diffuse est un ciel artificiel, constitué de 25 sources lumineuses, disposées de façon appropriée sur une structure formant un sixième d'hémisphère (5 m de diamètre). Les maquettes à l'étude sont fixées sur le support de l'héliodon, placé horizontalement à cet effet sous le simulateur. Des opérations appropriées (rotations successives et additions) permettent d'obtenir les facteurs de lumière du jour et les images numériques de l'intérieur des maquettes, correspondant à l'ensemble de la voûte céleste. Les prestations du simulateur ont été vérifiées à l'aide de mesures; celui-ci se distingue de ces homologues par le fait que :

- il permet de reproduire avec précision tous les ciels de référence (ciel isotrope, ciels CIE, ciels statistiques);
- il peut être calibré rapidement et de façon automatique;
- sa consommation électrique est réduite et ses besoins en maintenance faible.

L'équipement de diagnostic a été élaboré pour permettre l'évaluation des performances de bâtiments sur le plan de l'éclairage naturel, de l'énergie et du confort visuel. Il est constitué d'un certain nombre d'appareils (luxmètres, luminance-mètres, chromamètres) et d'un dispositif prototype, permettant la mesure d'indices d'éblouissement et l'évaluation consécutive de la fraction probable d'insatisfaits. Ce dernier est basé sur l'utilisation d'une caméra vidéo à haute définition, calibrée en luminances, et d'un ensemble de programmes de traitement d'images numériques (progiciel ADELINÉ).

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION	1
1.1	Buts du projet.....	1
1.2	Démarche adoptée	1
2.	MODELISATION PHYSIQUE EN ECLAIRAGE NATUREL	5
2.1	Problématique de la modélisation	5
2.2	Principales configurations des simulateurs actuels	7
2.2.1	Simulateur de lumière directe	7
2.2.2	Simulateur de lumière diffuse	9
2.3	Configuration des simulateurs développés	12
3.	SIMULATEUR DE LUMIERE DIRECTE.....	15
3.1	Description du dispositif	15
3.1.1	Principe général de fonctionnement	15
3.1.2	Principaux composants du simulateur	17
3.2	Caractéristiques de la source artificielle	23
3.2.1	Propriétés spectrales	23
3.2.3	Propriétés photométriques	25
3.3	Caractéristiques de l'héliodon	31
3.3.1	Cahier des charges	31
3.3.2	Configuration	32
3.3.3	Structure mécanique	35
3.3.4	Entraînement	36
3.4	Applications	38
3.4.1	Interaction de la lumière directe avec les bâtiments	38
3.4.2	Pénétration de la lumière directe dans les bâtiments	41
4.	SIMULATEUR DE LUMIERE DIFFUSE	45
4.1	Description du dispositif	45
4.1.1	Principe général de fonctionnement	46
4.1.2	Modélisation de la voûte céleste	48
4.1.3	Principaux composants du simulateur	52
4.2	Caractéristiques de la voûte lumineuse	59
4.2.1	Choix des luminaires	59
4.2.2	Description des luminaires	61
4.2.3	Propriétés optiques des luminaires	61
4.2.4	Mise en place des luminaires	64

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 de mettre sur pied des installations expérimentales, permettant de concevoir, d'étudier et d'évaluer des systèmes de gestion de lumière naturelle; celles-ci sont rassemblées dans un laboratoire de lumière naturelle et appliquées, dans une première phase, au développement et à l'étude de systèmes d'éclairage naturel latéral.

Le laboratoire comprend les installations expérimentales suivantes :

- un simulateur de lumière directe (héliodon automatisé);
- un simulateur de lumière diffuse (ciel artificiel à balayage);
- un équipement de diagnostic en éclairage naturel (vidéo-confimètre, etc.).

Le rapport présente l'ensemble des travaux menés à bien pour mettre sur pied ce dernier. Un second document fait état des travaux effectués pour développer parallèlement des outils informatiques de conception et de dimensionnement en éclairage naturel (projet NEFF 435.2) [Sca93c].

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 différentes étapes du processus de projection architecturale (avant-projet, projet, exécution). Le choix de l'un de ces outils est généralement dicté par les considérations suivantes :

- souplesse d'utilisation (temps d'apprentissage);
- pratique habituelle (maquettes pour l'architecte);
- nature du problème (complexité, dimensions);
- informations requises (décision de principe, dimensionnement précis).

- de mener à bien plus rapidement et plus efficacement des études en éclairage naturel relativement simples (systèmes de fenêtres, cheminée de lumière, etc.);
- de s'adresser plus directement aux architectes;
- de servir à la validation de programmes de calcul en éclairage naturel.

Le Laboratoire de lumière naturelle complète ainsi les outils informatiques en éclairage naturel, développés dans le cadre du programme LUMEN (progiciel ADELINÉ [Sca93c], plus particulièrement appropriés à la conception et au dimensionnement de systèmes complexes de lumière naturelle (systèmes prismatiques, systèmes anidoliques, etc.).

Ce rapport présente de façon détaillée l'ensemble des travaux menés à bien pour mettre sur pied le laboratoire. Le second chapitre rappelle les principes de la modélisation physique de bâtiments (maquettes), appliquée à l'éclairage naturel. Les chapitres 3, 4 et 5 donnent un aperçu des trois installations expérimentales, qui composent le laboratoire.

L'application de ces outils à la conception et au dimensionnement de systèmes d'éclairage latéral fait l'objet du chapitre 6. Un accent particulier est mis sur la présentation de nouveaux systèmes d'éclairage naturel, comprenant :

- 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 du projet, faisant appel à une technique optique utilisée pour les capteurs solaires à concentration [Win91].

Ce dernier type de système a donné lieu à un travail de doctorat [Com93c], complétant l'ensemble des publications scientifiques issues du projet.

2. MODELISATION PHYSIQUE EN ECLAIRAGE NATUREL

2.1 Problématique de la modélisation

Un système d'éclairage naturel est un dispositif optique, qui a pour fonction de capter un flux maximal de lumière naturelle, de conduire efficacement celui-ci à l'intérieur du bâtiment et de le distribuer de façon appropriée dans les locaux. La figure 2.1 illustre cela sur la base d'un exemple concret.

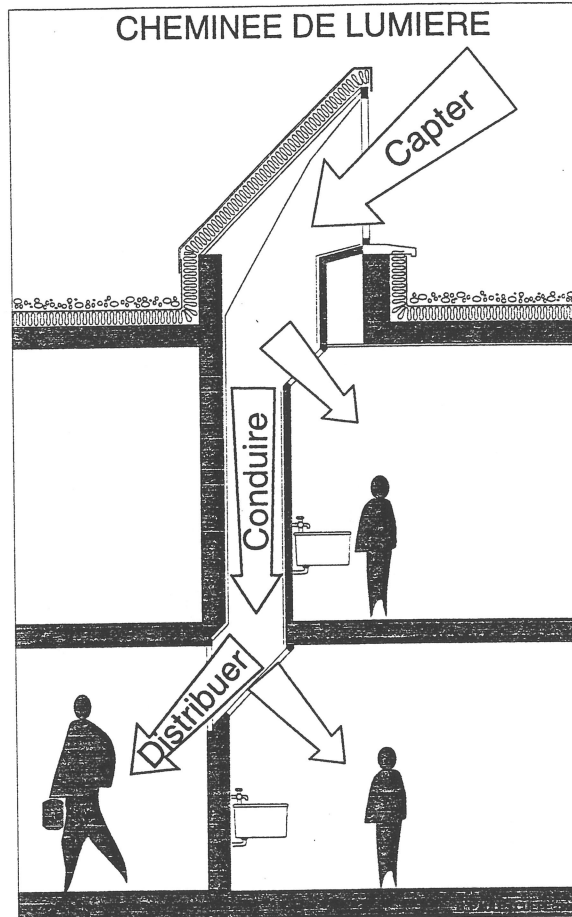


Fig. 2.1 : Principe de fonctionnement d'un dispositif d'éclairage naturel (cheminée de lumière).

La conception et le dimensionnement de ces systèmes peuvent être réalisés à l'aide de modèles physiques de bâtiment (maquettes), permettant d'étudier la propagation de la lumière naturelle au travers des systèmes d'éclairage naturel et à l'intérieur des locaux.

Les mécanismes de réflexion de la lumière ne sont pas sensibles aux phénomènes d'échelle : la longueur d'onde du rayonnement visible (380 à 780 . 10^{-9} m) est infiniment plus petite que la dimension des maquettes (dizaines de cm) et des bâtiments réels (dizaines de mètres). Il est donc possible de déterminer la distribution de la lumière dans un local, à partir d'une maquette de ce dernier, à condition de respecter l'échelle et la photométrie des matériaux mis en oeuvre [Sca93b], [DNN89]. La figure 2.2 montre une maquette d'étude en éclairage naturel, réalisée en tenant compte des précautions suivantes :

Parallèlement à cela, il est nécessaire de reproduire fidèlement les caractéristiques lumineuses des sources de lumière naturelle, composées principalement du soleil (source de lumière directe) et de la voûte céleste (source de lumière diffuse). Cette tâche est réalisée généralement par des simulateurs, qui permettent de contrôler précisément les conditions d'expérience.

2.2 Principales configurations des simulateurs actuels

Différents dispositifs expérimentaux ont été conçus dans le passé pour simuler les sources de lumière naturelle [Olg63], [Tus66], [Spi85], [DNN89]. Les principales configurations utilisées sont passées en revue ci-après; leurs avantages et inconvénients sont discutés brièvement.

2.2.1 *Simulateur de lumière directe*

Ce dispositif doit être à même de reproduire les caractéristiques essentielles de la lumière naturelle provenant directement du soleil. Celle-ci se distingue par :

- une composition spectrale proche de celle du corps noir ($T_c \approx 5700$ K);
- des rayons lumineux parallèles (source ponctuelle à l'infini);
- un éclairage uniforme sur le plan horizontal ($0 < E_h \leq 100'000$ Lux).

La configuration généralement adoptée pour réaliser un simulateur de lumière directe est donnée à la figure 2.3. Celui-ci est constitué d'une source incandescente (lampe halogène), placée au foyer d'un réflecteur parabolique. La distance qui sépare la source des maquettes est de quelques mètres.

2.2.2 Simulateur de lumière diffuse

Ce type de simulateur doit être à même de reproduire les principales caractéristiques de la lumière naturelle provenant de la voûte céleste (lumière diffuse). Il est généralement constitué d'une voûte lumineuse (ciel artificiel), dont la répartition de luminance est semblable à celle de "ciels de référence" définis par différentes instances internationales (cf Annexe C).

La réalisation de ce dispositif est guidée par la minimalisation d'un certain nombre d'erreurs expérimentales. La table 2.4 résume les principales d'entre elles.

Erreurs expérimentales	Sources d'erreur	Valeurs typiques
Erreur de luminance	Déviations de la répartition de luminance du simulateur par rapport au "ciel de référence"	2% pour un ciel uniforme
Erreur de couleur	Composition spectrale des sources du ciel artificiel non conforme à celles de la lumière naturelle diffuse	$T_c \approx 3000 - 4000 \text{ K}$
Erreur d'horizon	Distance finie entre la maquette et l'horizon du ciel artificiel	$d \approx 1.5 - 4.5 \text{ m}$
Erreur de dimension	Dimension non négligeable de la maquette par rapport au diamètre du ciel artificiel	Dim. maquette < $0.15 \times$ diamètre du ciel artificiel
Erreur due aux constructions avoisinantes	Construction avoisinante représentée de façon non conforme à l'échelle de la maquette (place insuffisante)	Diamètre surface de travail \approx env. 1 - 2 m

Table 2.4 : Principales sources d'erreur expérimentale des simulateurs de lumière diffuse.

Ciels à miroir

Les ciels à miroir constituent la configuration des simulateurs de lumière diffuse la plus courante aux Etats-Unis : 11 dispositifs sur 13 recensés font appel à cette approche aux USA [DNN89]. La figure 2.5 illustre ce type de simulateur, composé essentiellement d'une enceinte revêtue de miroirs et d'un plafond lumineux (tubes fluorescents et diffuseur opalescent).

La figure 2.6 représente l'un de ces simulateurs; celui-ci est constitué d'un hémisphère de couleur blanche éclairé par des sources lumineuses en gorge (lampes à incandescence) [DNN89]. Le diamètre des différentes installations oscille entre 3 et 9 m [Tus66]; le nombre de sources dépasse 300 pour la plus grande d'entre elles (puissance de raccordement de 42.8 kW).

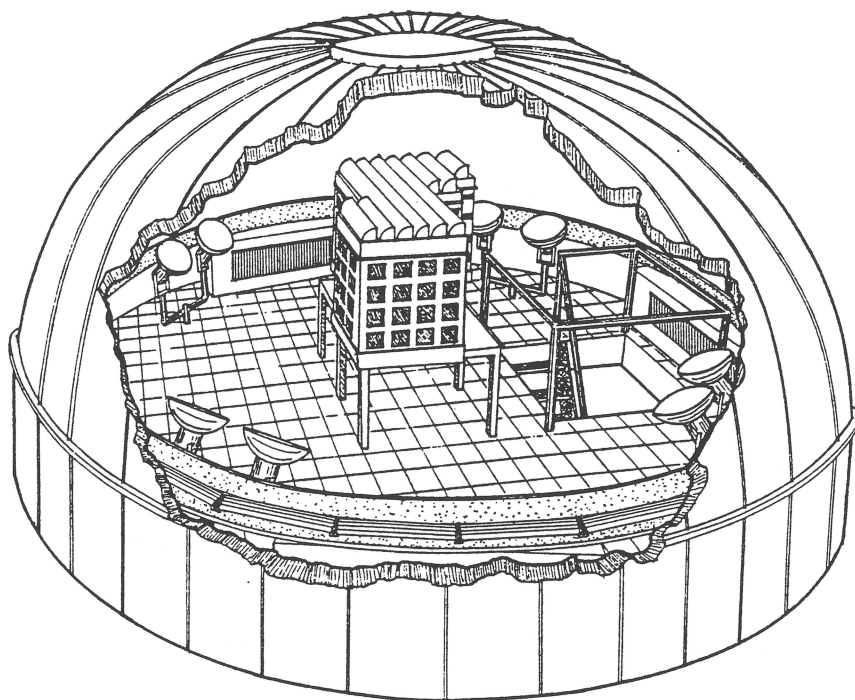


Fig. 2.6 : Ciel artificiel à dôme (dispositif de l'Université d'Austin, Texas [DNN89]).

Cette configuration se caractérise par les propriétés suivants :

Avantages

- reproduction de différents ciels de référence possibles (ciel isotrope, ciel couvert et serein CIE);
- accès aux maquettes facilité.

Inconvénients

- dispositif complexe et coûteux;
- calibration difficile et fastidieuse (env. 1 semaine);
- puissance de raccordement élevée;
- maintenance difficile du fait du nombre important de sources.

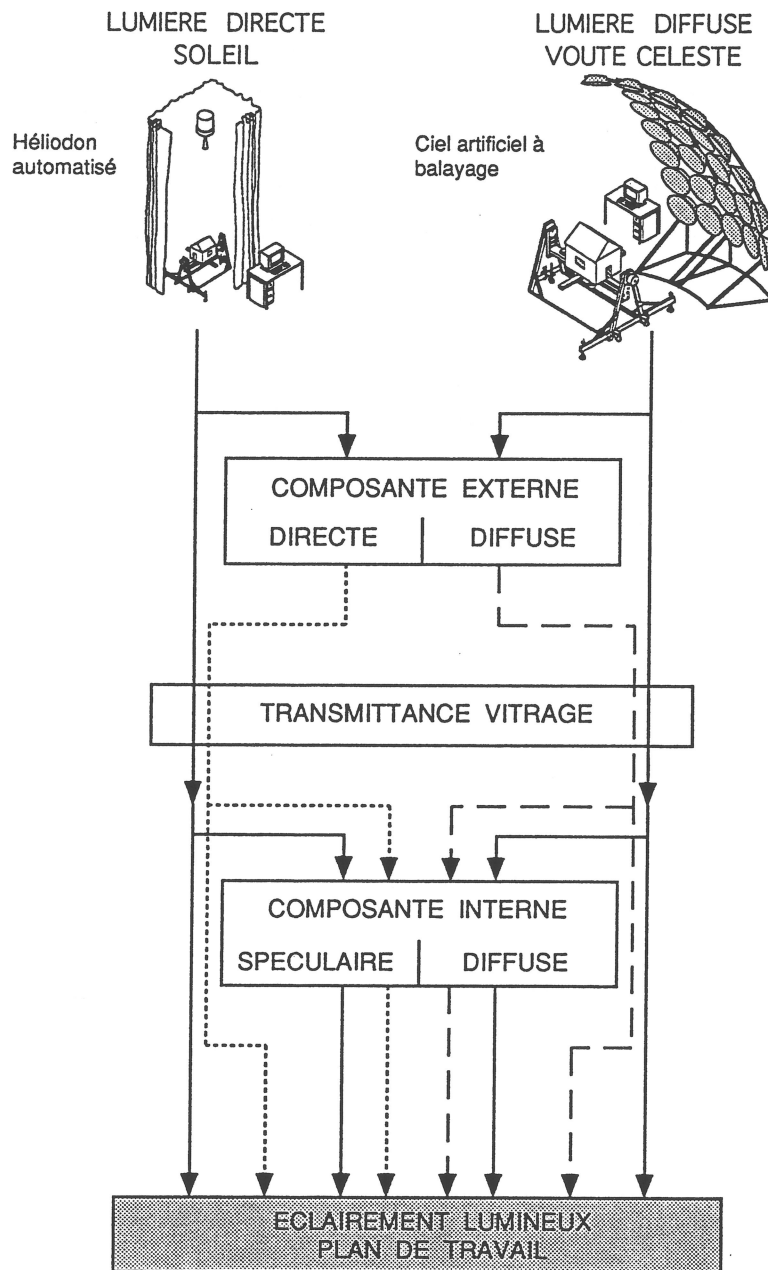


Fig. 2.7 : Représentation schématique d'une étude en éclairage naturel, réalisée sur simulateurs de lumière directe et diffuse.

La conception et la réalisation de ces simulateurs fait appel aux technologies nouvelles suivantes :

- procédés et techniques de robotique;
- méthodes d'imagerie numérique;
- commande et réglage numériques.

L'amélioration des performances de ces derniers, par rapport aux installations existantes, est l'un des principaux objectifs fixés dans le cadre de ce projet. Il s'est agit, en particulier :

3. SIMULATEUR DE LUMIERE DIRECTE

Ce chapitre a pour but de décrire le simulateur de lumière directe (héliodon automatisé), développé dans le cadre de ce projet. Celui-ci permet d'étudier la contribution à l'éclairage des locaux de la lumière provenant directement du soleil.

Cette composante est généralement bien supérieure à celle associée à la lumière naturelle provenant de la coûte céleste (composante diffuse). Elle est responsable de la plupart des situations critiques sur le plan du confort visuel, observées dans la pratique (éblouissement physiologique, éclairage excessif).

Le degré d'acceptance d'un dispositif d'éclairage naturel dépend le plus souvent de cette composante. L'étude de cette dernière sur des maquettes est donc indispensable [DNA89]; elle peut être réalisée à l'aide du simulateur, pour des conditions particulières de pénétration de la lumière directe, sous la forme:

- de visualisation d'ambiances lumineuses;
- d'évaluations d'indices d'éblouissement.

Le dispositif, conçu dans le cadre de ce projet, permet de réaliser ces études, dans des conditions optimales sur le plan scientifique et technique. Il a pour principaux avantages de:

- reproduire les propriétés spectrales et géométriques de la lumière directe (lumière visible, rayons parallèles, etc.);
- reproduire le mouvement apparent du soleil en tout lieu (latitude, longitude) et pour tout instant (heure, jour, mois);
- être de construction robuste et entièrement automatisé (techniques récentes de robotique);
- posséder un interface de commande informatisé, simple et convivial (fenêtres graphiques).

Une description de ce simulateur et de ses possibilités d'application font l'objet de ce chapitre.

3.1 Description du dispositif

3.1.1 Principe général de fonctionnement

Le fonctionnement du simulateur de lumière directe repose sur l'utilisation conjointe:

La source de lumière artificielle, simulant le soleil, est située à la verticale de la maquette. Elle a été placée à une hauteur suffisante (8.1 m du sol), afin de reproduire au mieux les caractéristiques géométriques du faisceau lumineux, émanant d'une source ponctuelle située à l'infini (rayons lumineux parallèles).

Le déplacement apparent du soleil est reproduit par un mouvement opposé de la maquette, placée sur l'héliodon. Celui-ci est décrit par les équations de la géométrie solaire (voir Annexe B), permettant de déterminer la position du soleil dans le ciel, en fonction:

- de l'instant considéré (mois, jour, heure);
- des coordonnées géographiques du lieu (latitude, longitude).

L'étude qualitative de systèmes d'éclairage naturel, en présence de lumière directe, constitue la fonction principale de l'héliodon. Elle vise principalement à déterminer:

- les pénétrations de lumière directe dans le bâtiment (taches lumineuses);
- leur évolution au cours du temps (saison, journée);
- leur impact sur le confort visuel des usagers (éblouissement).

Ces études sont menées à bien, grâce à des prises de vue et à des enregistrements vidéo (standard Super VHS). Ces images peuvent être numérisées au moyen d'un convertisseur Analogique / Digital, calibré au préalable (fonction "luminance vs. niveau de gris").

L'analyse quantitative de situations particulières sur le plan du confort visuel peut alors être réalisée: des indices d'éblouissement (probabilité de confort visuel par exemple) sont déterminés à partir des images numériques, à l'aide de programmes informatiques (voir paragraphe 5.2). D'autres mesures quantitatives (éclairage) peuvent être réalisées à l'aide d'une série de micro-photomètres de précision (voir paragraphe 4.1.3).

Le mouvement de l'héliodon est automatique; il est commandé par un micro-ordinateur PC486. Celui-ci contrôle, par ailleurs, l'acquisition des données photométriques; les prises de vue sont effectuées à l'aide d'un matériel électronique de visualisation (caméra vidéo CCD, enregistreur S-VHS).

3.1.2 Principaux composants du simulateur

Le simulateur de lumière directe, illustré à la figure 3.1, est constitué des éléments suivants:

- une chambre d'obscurcissement;
- une source de lumière artificielle;

susceptibles de réfléchir de la lumière parasite (ordinateur, table mobile, etc.) sont extraits de la chambre.

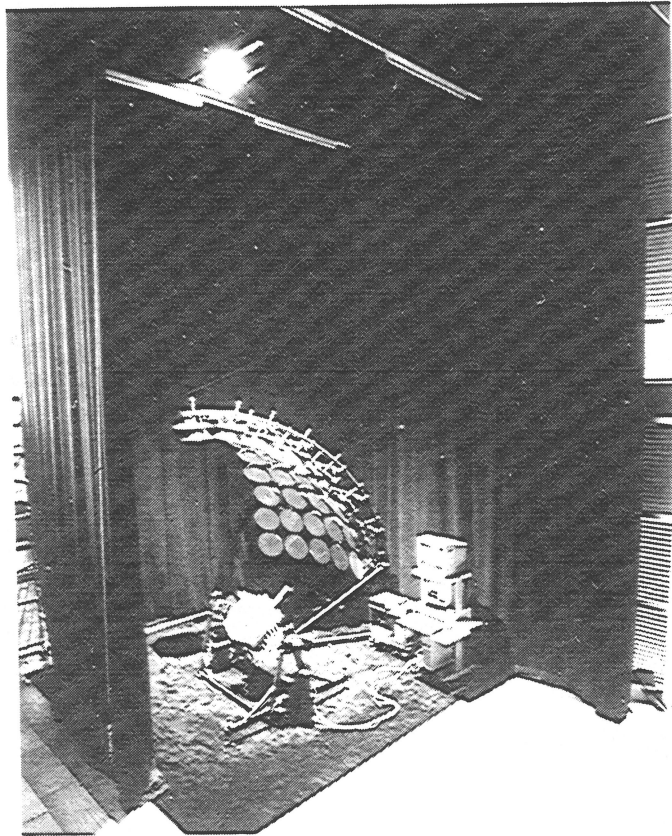


Fig. 3.2 : Vue de la chambre d'obscurcissement, située dans le Laboratoire d'Expérimentation Architecturale (LEA) à l'EPFL.

Un ventilateur a été placé au sommet de la chambre; il permet d'évacuer la chaleur dissipée par les appareillages et les utilisateurs. Une température raisonnable (environ 20°C) peut être ainsi maintenue dans cette dernière, même en cas d'utilisation prolongée du simulateur. Un nettoyage régulier de la chambre est effectué, afin d'éviter l'empoussièrage de la moquette et des rideaux (augmentation du facteur de réflexion). Des chaussures spéciales, conçues pour les chambres opératoires, permettent aux utilisateurs de pénétrer dans la chambre d'obscurcissement sans altérer la capacité d'absorption du sol (salissures, poussières).

Source de lumière artificielle

Il s'agit d'une lampe à arc court (OSRAM Metallogen HMI), d'une puissance de 2.5 kW, dont les principales caractéristiques sont les suivantes:

- flux lumineux important ($\phi = 240'000$ Lumens);
- efficacité lumineuse élevée ($\eta = 96$ lm/W);
- température de couleur proche de la lumière du jour ($T_c = 5'600$ K);
- indice de rendu des couleurs élevé ($R_a \geq 90$).

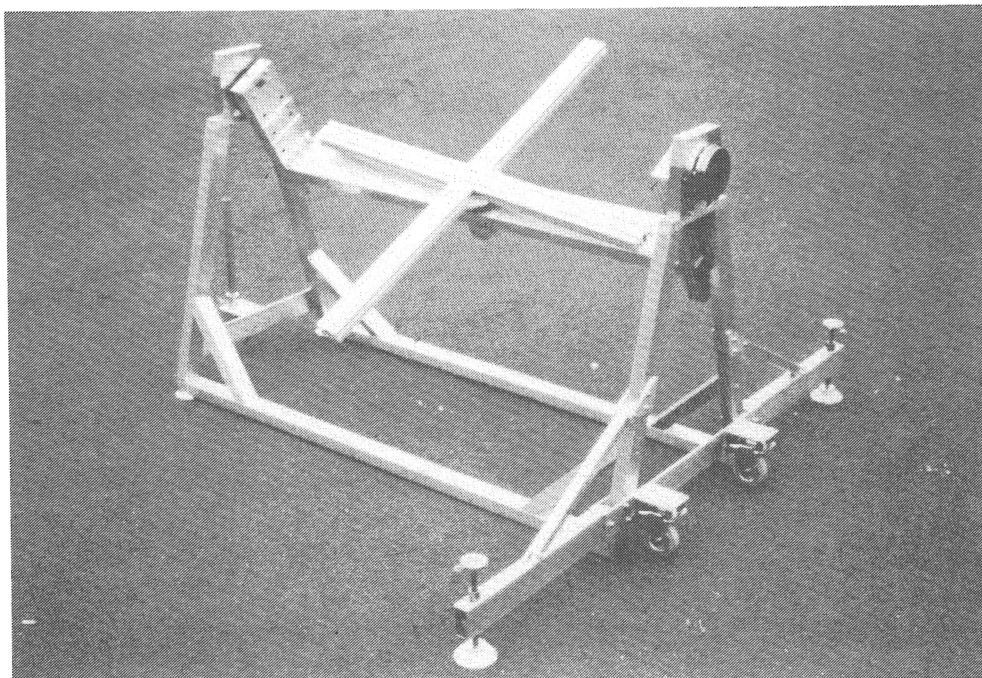


Fig. 3.4 : Vue de l'héliodon automatisé (l'appareil n'est pas encore revêtu de sa couche de peinture noire).

A l'exception de quelques composants (moteurs, dispositifs d'entraînement), l'héliodon a été entièrement réalisé dans l'atelier mécanique du LESO-PB à l'EPFL. Il possède deux axes mobiles et motorisés (moteurs à courant continu), commandés par ordinateur. Le support des maquettes est constitué d'une croix métallique (voir figure 3.4), pourvue de rails de fixation. L'appareil est en aluminium, revêtu d'une peinture noire mate, appliquée par procédé électrostatique et destinée à réduire les réflexions parasites.

L'héliodon est un dispositif mobile, muni de roulettes. Il peut être réduit dans une caisse de protection *ad hoc*, en dehors de ses périodes de fonctionnement. Il est muni de deux bras assurant sa stabilité et son horizontalité en cours d'opération (voir figure 3.4); ces bras sont repliables, de façon à permettre le franchissement des portes.

Unité de contrôle

Un micro-ordinateur PC/AT 486 (66 MHz, disques durs de 120 et 240MB), équipé d'une carte de commande (Motion Control Card, Creonics), pilote les deux moteurs électriques de l'héliodon. Cette unité permet d'effectuer différents types de mouvements, selon les besoins de l'utilisateur:

- des déplacements continus;
- des déplacements point par point;

- une caméra CCD couleur miniature Kappa CF 16/2 MC à haute définition (dimensions: 68 mm x ϕ 30 mm; résolution: 681 x 582 pixels; seuil d'éclairement standard: 5 Lux);
- un objectif endoscopique à correction d'optique (ϕ 1 cm);
- un objectif photographique grand angulaire (ϕ 4.5 cm; focale 3.6 mm; angle d'ouverture: 90°);
- un dispositif électronique d'amplification et de commande (rapport S/B: 44 dB; sorties: Y-C, VHS et S-VHS);
- un magnétoscope compatible avec les standards VHS et S-VHS;
- un écran cathodique Sony Trinitron.

L'équipement peut être complété (voir figure 3.6), au besoin, par un appareil photographique Nikon F3. Les pénétrations de lumière directe sont le plus souvent enregistrées sur bande vidéo; un commentaire sonore permet à l'utilisateur de distinguer différentes situations en prévision d'une relecture de la bande.

Ce type d'étude peut être complétée par une évaluation quantitative du confort visuel. Celle-ci peut être effectuée après conversion des images vidéo en images numériques; l'opération est réalisée par le micro-ordinateur, équipé à cet effet d'une carte électronique de digitalisation (Vision plus-AT, Imaging Technology Inc.).

Le programme RADIANCE est utilisé pour calculer ces indices à partir de l'image numérique (voir paragraphe 5.2). Bien que les résultats obtenus ne soient pas absolus (les luminances produites par le simulateur sont inférieures à celles du soleil), une comparaison de systèmes de lumière naturelle peut toutefois être réalisée de cette manière.

3.2 Caractéristiques de la source artificielle

3.2.1 Propriétés spectrales

La source du simulateur (OSRAM Metallogen HMI) est une lampe à décharge de conception nouvelle. Elle est constituée d'un cylindre de quartz, muni de deux électrodes de tungstène (voir figure 3.6).

- elle émet peu de rayonnement infrarouge (contrairement aux lampes halogènes);
- elle n'émet pas de rayonnement ultraviolet (contrairement aux lampes au Xénon).

Ces arguments, alliés au fait qu'elle est adaptée à des projecteurs disponibles sur le marché, justifient son choix dans le cadre du projet.

3.2.3 Propriétés photométriques

Projecteur

Le principal composant optique du système est constitué du projecteur de cinéma (SIRIO Quartz Color Spotlight). La figure 3.8 présente ce dernier et donne un aperçu de ses dimensions [Qua90].

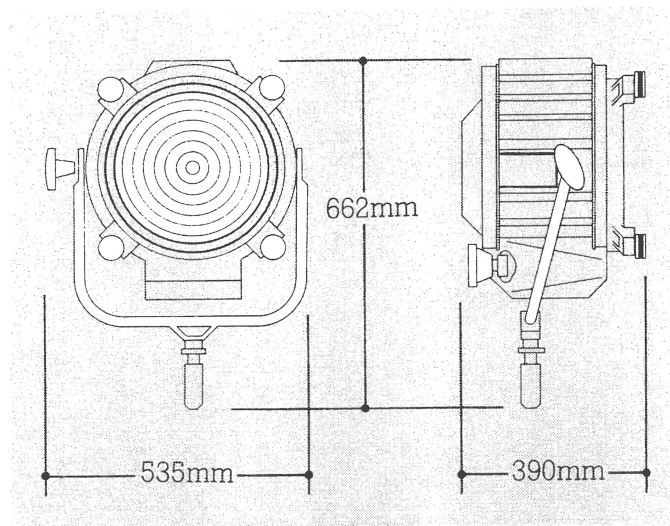


Fig. 3.8 :Projecteur de cinéma SIRIO Quartz Color Spotlight (puissance 2.5 kW, poids 24 kg).

Celui-ci est muni d'un réflecteur concave et d'une lentille de Fresnel frontale, dont la position est ajustable (voir figure 3.9).

Eclairage sur l'héliodon

Des mesures systématiques ont été effectuées, en vue de s'assurer de la conformité de l'éclairage sur le support de l'héliodon (vu sous un angle de 8.5° depuis la source). Celle-ci peut être jugée sur la base de critères, imposés par:

- le facteur de lumière de jour minimal, pour lequel on souhaite pouvoir réaliser des prises de vue (valeur fixée arbitrairement à 0.2%);
- le niveau d'éclairage minimal requis par la caméra CCD (5 Lux).

Compte tenu de ces contraintes, les conditions que doit satisfaire l'éclairage sur le support de l'héliodon sont les suivantes:

- être uniforme sur cette surface (1.2 m x 1.2 m);
- être supérieur à 2'500 Lux ($D = \frac{5 \text{ Lx}}{2500 \text{ Lx}} = 0.002$).

Les performances obtenues initialement, en modifiant uniquement la position de la Fresnel ont été jugées insuffisantes ($E = 3'000 \text{ Lux}$, $\Delta E/E = 20\%$). Un élément optique supplémentaire a donc été disposé sous le projecteur de façon à améliorer l'uniformité du faisceau à niveau d'éclairage constant. La forme et la disposition de cet élément ont été investiguées. Deux géométries de base (cône et disque en aluminium) et 48 configurations optiques différentes ont été considérées (voir figure 3.11). Les paramètres géométriques, qui définissent ces configurations, sont les suivantes:

- angle d'ouverture du faisceau (position de la Fresnel);
- diamètre du disque;
- longueur et angle au sommet du cône;
- distance de l'élément optique au projecteur.

(b)

Numéro d'ordre	Longueur [cm]	Diamètre [cm]
1	52	8.5
2	50	11.7
3	30	7.1
4	32	11.7
5	38	8.5
6	23	6.7
7	25	8.5
8	26	5.3
9	42	6.6
10	45	4.8
11	35	4.8
12	24	4.3

Table 3.12 : (a): Caractéristiques géométriques des disques.
(b): Caractéristiques géométriques des cônes.

La configuration optimale, issue de cette étude, est la suivante:

- géométrie cône en aluminium
- longueur 24 cm
- angle au sommet 4.3°
- distance au projecteur 5 cm
- position de la Fresnel médiante

La figure 3.13 illustre la répartition de l'éclairement, mesuré au niveau du support de l'héliodol sur un disque de 1.5 m de diamètre, centré sous la source. L'éclairement moyen sur cette surface est de 2'700 Lux; l'uniformité de l'éclairement est de 3.4%. Le support lui-même d'une dimension de 1.2 m x 1.2 m est inscrit dans ce disque.

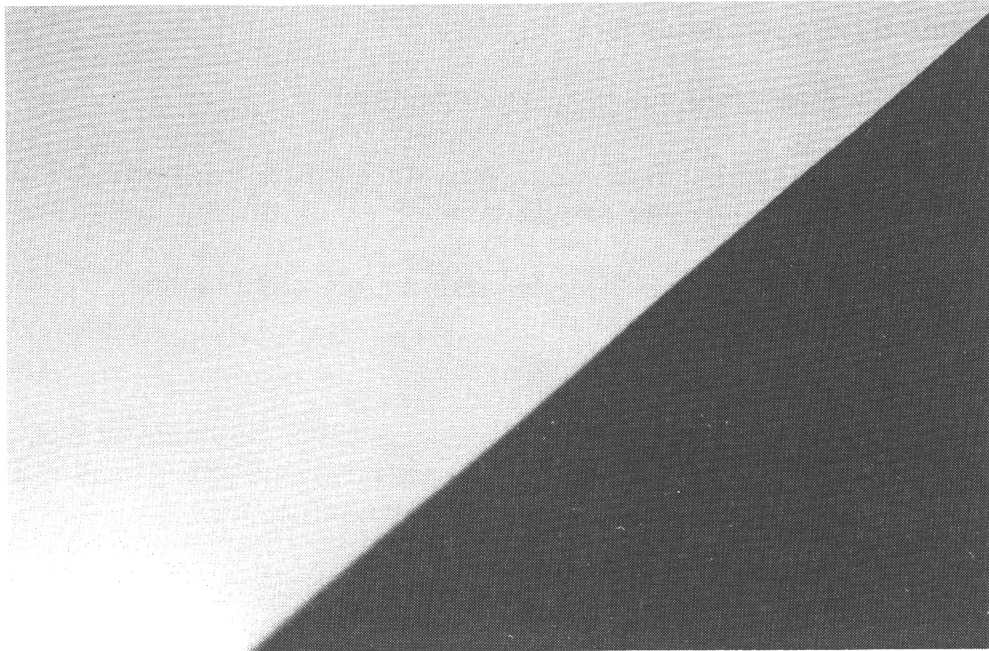


Fig. 3.14 : Illustration de la qualité des ombres obtenues sous le simulateur.

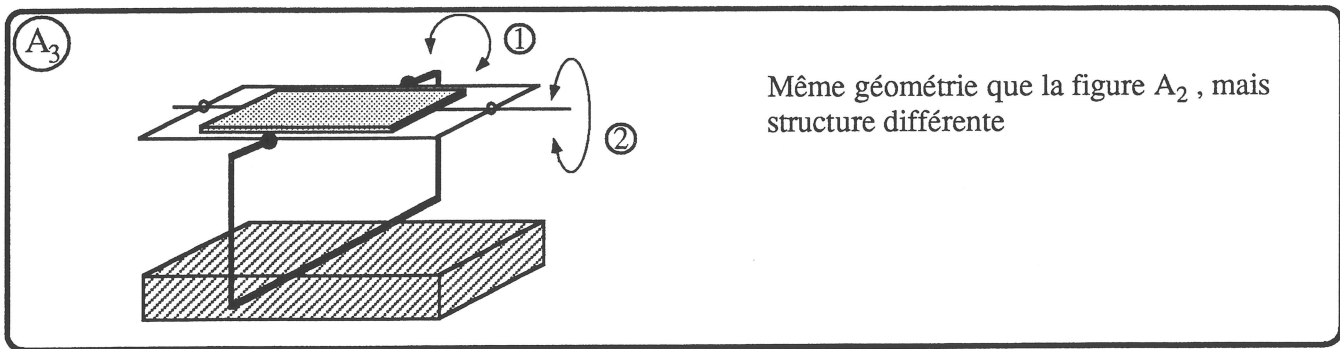
La figure 3.14 illustre la qualité des ombres obtenues (frange nette). Le niveau de parallélisme atteint est excellent; il est nettement supérieur à celui obtenu avec d'autres types de simulateur (miroir parabolique [Spi85] [Olg63], structure en nid abeilles [Sze89]).

3.3 Caractéristiques de l'héliodon

3.3.1 *Cahier des charges*

La conception et la réalisation de l'héliodon ont été menées à bien à partir d'un cahier des charges précis. Celui-ci comprend un certain nombre de critères, relatifs à sa construction, à son fonctionnement et à sa sécurité d'utilisation. Ce cahier des charges, présenté en détail à la référence [Rhy91a], se résume par un certain nombre de critères:

- absence d'ombres portées par l'héliodon sur la maquette (perturbation des mesures);
- mouvements de rotation compréhensibles (proches des mouvements naturels);
- mouvements continus, sans vibrations et sans à-coup (caméra-vidéo);
- déplacement minimal du centre de la maquette (variation des conditions d'éclairement);



B) Trois axes de rotation

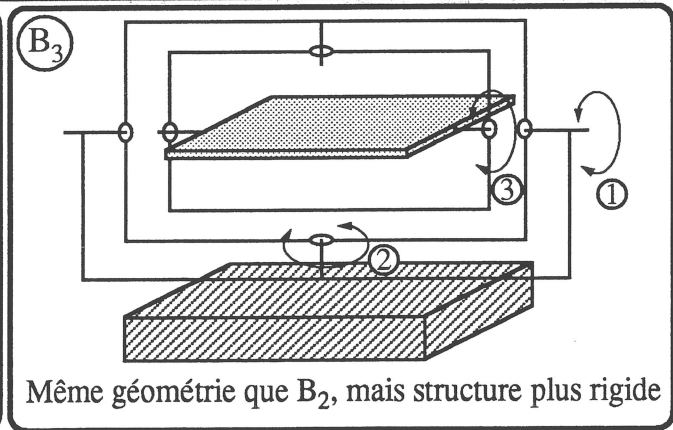
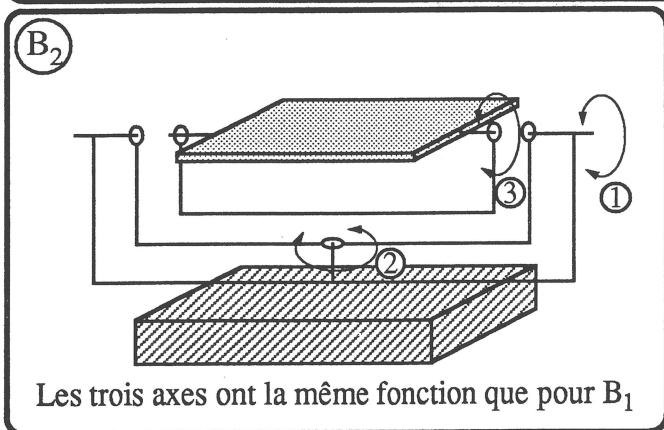
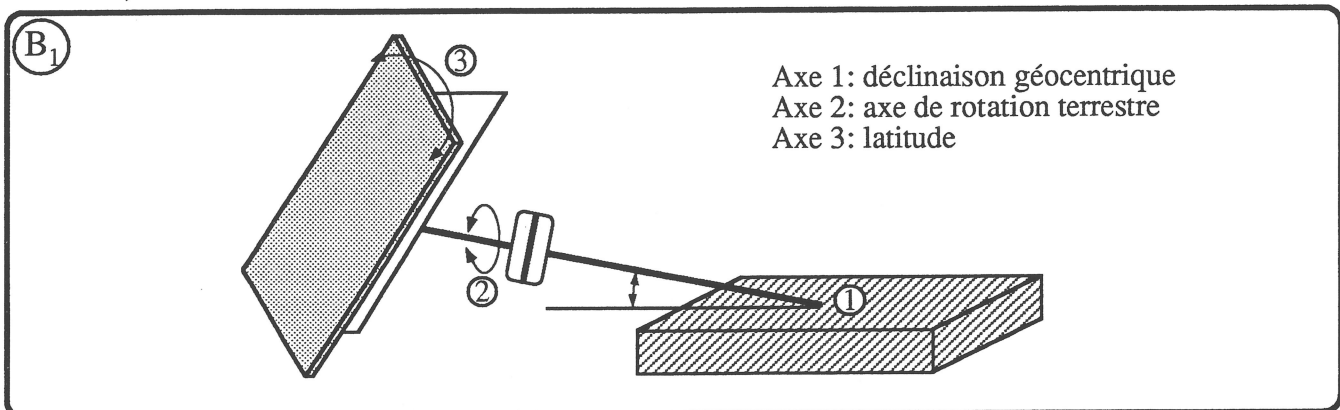


Fig. 3.15 : Configurations étudiées en vue de la construction de l'héliodon (variantes à deux et à trois axes)

Les configurations étudiées peuvent être regroupées en deux catégories:

- les variantes à deux axes de rotation, de construction plus simple (un mouvement de moins);
- les variantes à trois axes de rotation plus explicites (axes naturels).

Sur la base du cahier des charges précédent, une table d'évaluation, construite à partir des critères mentionnés, a été élaborée. Des poids différents ont été attribués à ces critères; les configurations, pour lesquelles des ombres peuvent

- hauteur du support minimal (1.3 m du sol);
- rotations assurées par deux moteurs électriques à courant continu;
- dispositif mobile d'encombrement réduit (roulettes de transport, jambes pliables).

3.3.3 Structure mécanique

Afin de limiter son poids, l'héliodon a été réalisée en profilés d'aluminium. Certaines parties, toutefois, sont pleines pour des raisons de facilité de fixation et d'esthétique.

L'ensemble de la structure a donné lieu à un calcul de statique détaillé, afin de s'assurer que les contraintes de déformation et de torsion puissent être absorbées par la structure (poids des maquettes principalement). Ces calculs font l'objet de la référence [Rhy91a]; seules les conséquences de ces derniers du point de vue structurel sont présentées ici.

Support des maquettes

Le support a été réalisé en profils Maytec 80 x 40 x 4 mm, caractérisés par un facteur d'inertie de $2.3 \cdot 10^{-7} [\text{m}^4]$. La déformation maximale de ce dernier, en cas de charge maximale du support (25 kg), est de 0.5 mm.

Le support est muni de trois dispositifs, permettant d'y fixer les maquettes :

- des serres-joint, coulissant dans une glissière;
- des fixations, permettant de tenir la maquette à l'aide d'inserts;
- des écrous, permettant de fixer la maquette par des vis traversantes.

L'axe du support est muni d'un réducteur (harmonic drive) et de paliers, tolérant une charge statique de 17.3 kN.

Berceau

La berceau a pour fonction de transmettre la rotation au support selon l'axe horizontal. Il est constitué d'un profil rectangulaire de 150 x 50 x 2.5 [mm]. Celui-ci a été dimensionné de façon à ce que le berceau atteigne au maximum en son centre une flèche de 10^{-3} m et une torsion de 10^{-3} rad en cas de charge maximale.

La hauteur du berceau est réglable (fonction de la taille des maquettes); il est pourvu pour cela de trous, placés en étage, permettant un réglage indicial.

Axe du support

Moteur:	Mavilor Mt 200 (0.9 Nm à 1500 tours/mn)
Réducteur:	HDUR Série IH (rapport de réduction de 160)
Codeur:	Tehel Tk321 (bidirectionnel à index pulse)
Couple:	72 Nm à la charge
Positionnement:	< 4.5 mdegrés (0.1 mradian)

Des fins de course ont été posés pour éviter des mouvements trop importants, conduisant à la destruction des câbles d'alimentation, de codage et de mesures de l'héliodon. Un dispositif spécial a été réalisé pour l'axe du support: il s'agit d'un chariot, muni d'un doigt et d'un détecteur de proximité. Le chariot coulisse sur un rail fixé sur le berceau, alors que le doigt palpe un "escargot", fixé sur le support. La référence [Rhy91a] donne une description détaillée de ce dispositif.

Commande des moteurs

La commande des moteurs est assurée par une carte de commande Creonics MCC IBM PC, qui permet d'asservir les moteurs par un micro-ordinateur. Un amplificateur (carte Double Europe MSMD/N) permet d'amplifier cette commande et d'alimenter les deux moteurs électriques. La figure 3.18 donne le schéma électrique global du dispositif.

Le passage des câbles de commandes, d'alimentation et de position est assuré par une chaîne plastique Igus. Celle-ci, soutenu par un support, permet d'éviter la détérioration de ces derniers, lors de mouvements de l'héliodon.

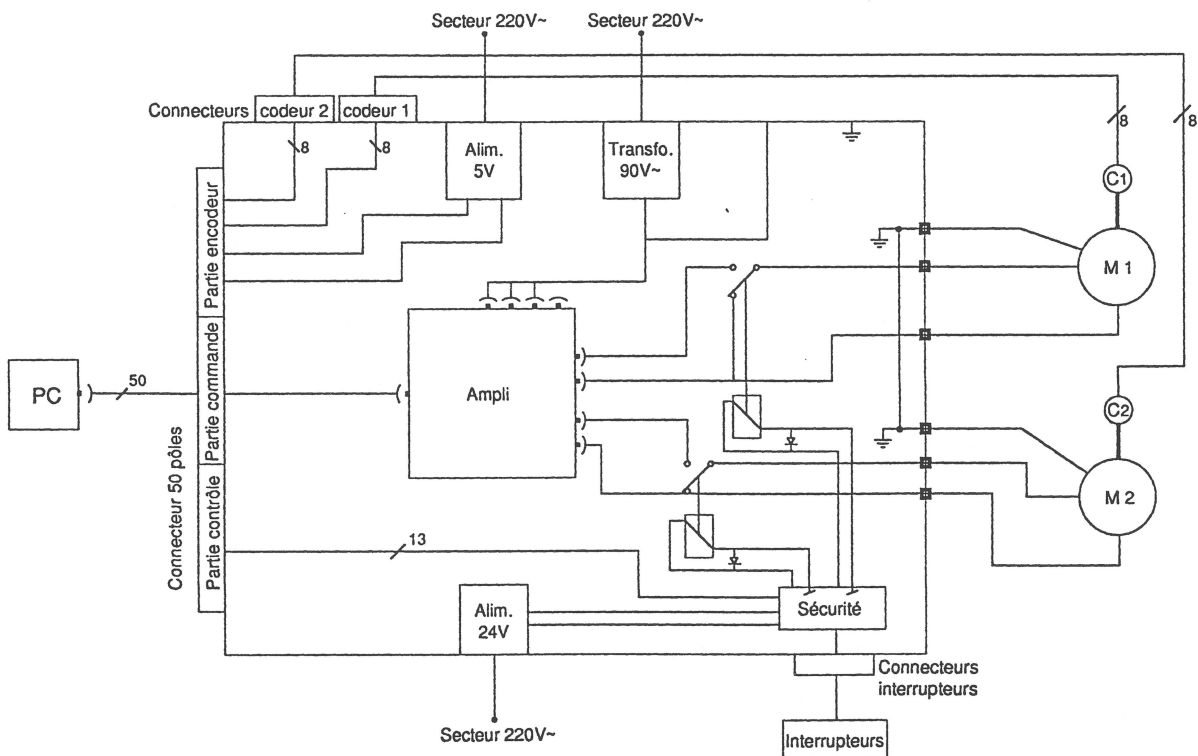


Fig. 3.18 : Schéma électrique de l'héliodon

La figure 3.19 représente ce complexe. Le plan vitré est situé entre deux corps de bâtiment de forme rectangulaire; les habitations individuelles (au nombre de trois) se trouvent de l'autre côté de la route qui les sépare du complexe.

La maquette de l'ensemble a été placée sur le support de l'héliodon : un endoscope, visible sur la figure, permet de visualiser l'apparence des bâtiments à partir de la route (objectif placé à hauteur d'homme).

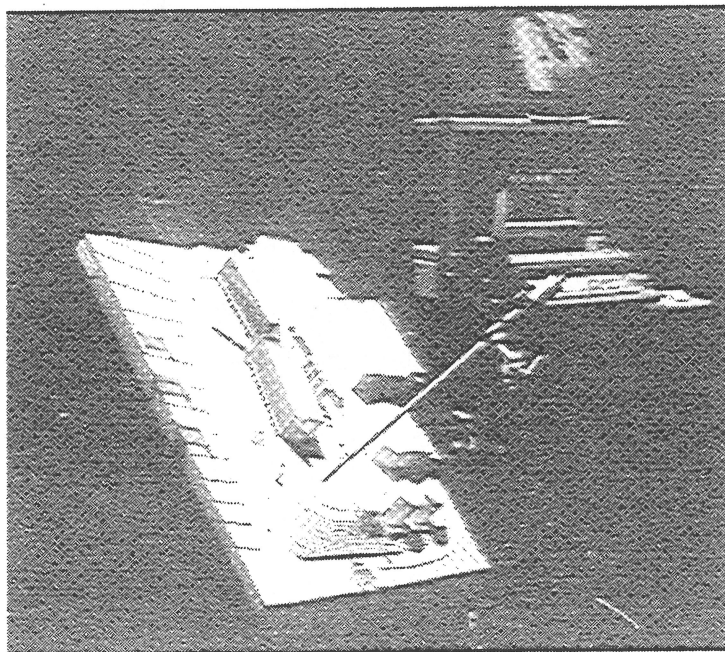


Fig. 3.19 : Vue d'ensemble de la maquette du complexe administratif et des maisons individuelles, placée sur l'héliodon.

Les nuisances, engendrées par les réflexions de la lumière directe sur la façade vitrée, sont illustrées à la figure 3.20. Ces réflexions, accentuées pour les besoins de l'étude grâce à une feuille d'aluminium placée sur le plan incliné, sont observables par exemple au 21 juin à 11h35 HL (Heure Légale).

mise en valeur grâce à des miroirs [Cla91]), a confirmé les avantages de l'héliodon pour ce qui concerne l'étude de la propagation de la lumière directe. L'équipement expérimental complète ainsi avantageusement les programmes de lancer de rayon, dont les possibilités de simulation sont limitées en ce qui concerne la lumière directe [Com93c].

3.4.2 Pénétration de la lumière directe dans les bâtiments

Un nombre important d'études pratiques a porté sur la conception et le dimensionnement de systèmes de lumière naturelle (voir Annexe D). Ces dernières sont principalement menées à bien en tenant compte des situations d'éclairage naturel les plus défavorables, qui correspondent généralement aux conditions du ciel couvert hivernal (éclairage extérieur de 8'000 à 10'000 Lux).

Ces études sont donc principalement réalisées à l'aide du ciel artificiel (simulateur de lumière diffuse); l'héliodon permet toutefois d'identifier des situations potentielles d'éblouissement et d'apprécier l'évolution dynamique de la lumière solaire à l'intérieur des locaux (déplacement des taches lumineuses).

L'exemple suivant illustre une étude effectuée sur un bâtiment industriel, caractérisé par de larges ouvertures filantes en toiture (voir figure 3.22). Celle-ci a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation de déviateurs pour améliorer l'éclairage par la lumière naturelle de locaux de grande profondeur (20 mètres entre deux costières [Com92]).

La figure 3.24 illustre une prise de vue, effectuée à l'intérieur d'une maquette du bâtiment, placé sur l'héliodon. Cette prise de vue, correspondant au 21 juin à 12 heures, montre qu'une grande partie de ces postes de travail est atteinte par la lumière directe à cette période. La mise en place de déviateurs, sous la verrière [Com92], permet de résoudre ce problème en guidant la lumière directe vers l'intérieur du bâtiment.



Fig. 3.24 : Vue intérieure d'une maquette du bâtiment, placée sur l'héliodon (situation du 21 juin à 12 heures).

La réalisation d'un enregistrement vidéo, synchronisé avec le mouvement de l'héliodon, permet de suivre le déplacement des pénétrations de lumière directe en fonction des saisons. Une vérification complète et efficace de l'ensemble des situations d'éclairage naturel, propre au ciel serein peut ainsi être menée à bien. Celle-ci peut être réalisée en de brefs délais (quelques heures); un document vidéo (enregistrement S-VHS) permet de visualiser ces situations ultérieurement.

4 SIMULATEUR DE LUMIERE DIFFUSE

4.1 Description du dispositif

L'objet de ce chapitre est de présenter un simulateur de lumière diffuse de nouvelle génération (ciel artificiel à balayage). Ce dispositif permet d'étudier la contribution à l'éclairage des locaux de la composante diffuse de la lumière naturelle, provenant de la voûte céleste.

La conception et le dimensionnement de systèmes de lumière naturelle peuvent être menés à bien grâce à ce simulateur. Ceux-ci reposent principalement sur l'évaluation des performances lumineuses de ces systèmes (facteur de lumière du jour, confort visuel, etc.), déterminées à partir de maquettes [DNN89], [Olg63], englobant :

- des études quantitatives basées sur l'utilisation de photomètres (mesures photométriques);
- des études qualitatives basées sur l'utilisation d'un système vidéo (visualisation d'ambiances lumineuses).

De par sa conception originale, ce simulateur présente de nombreux avantages par rapport à ses homologues :

- il peut reproduire tous les types de ciel (couvert, intermédiaire, serein);
- il se caractérise par une distribution optimale de luminances (145 zones lumineuses uniformes [Tre87]);
- cette distribution est conforme aux plus récentes recommandations en matière de mesure de luminances du ciel (recommandation de la Commission Internationale de l'Eclairage);
- il reproduit fidèlement la température de couleur de la lumière du jour (5700 K);
- sa calibration est entièrement automatisée, et par conséquent, simplifiée;
- il est constitué de "sources" caractérisées par une faible maintenance et par une consommation électrique réduite (tubes fluorescents HF).

Une description détaillée du simulateur est donnée ci-après.

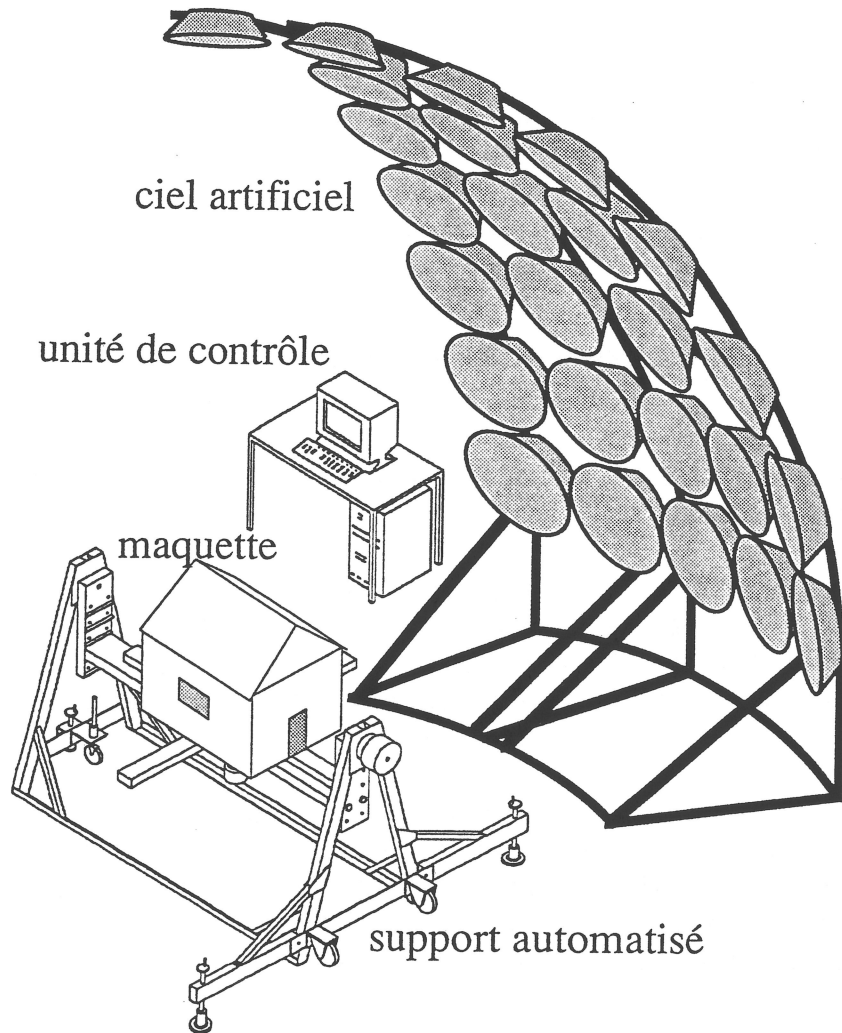


Fig. 4.1 Représentation schématique du simulateur de lumière diffuse (ciel artificiel à balayage).

Afin de limiter les problèmes liés à la maintenance et à la calibration du dispositif (vieillesse différenciée des sources), et de réduire sa consommation d'énergie (sources de lumière artificielle), seule une partie du ciel a été construite (un sixième de la voûte céleste). La totalité de l'hémisphère est reproduite grâce à six rotations successives de la maquette placée sous le simulateur (rotations de 60° chacune). En modifiant l'intensité lumineuse des sources à chaque rotation, il est possible de simuler toutes les distributions de luminance, qui distinguent un type de ciel d'un autre (ciel couvert et serein par exemple).

L'analyse quantitative des performances d'un système de lumière naturelle est basée principalement sur la mesure de facteurs de lumière du jour. Les études qualitatives sont réalisées grâce à des prises de vue vidéo ou à des photographies. L'obtention des valeurs et des images, correspondant à un type de ciel donné (ensemble de la voûte céleste), ne peut être directement

Afin d'éviter ces inconvénients, une configuration nouvelle de ciel artificiel a été proposée. L'originalité de cette dernière réside, en particulier, dans la solution adoptée pour 'paver' l'hémisphère de façon régulière à l'aide de figures géométriques identiques (disques lumineux).

Ce problème n'est pas trivial; il ne présente pas de solution qui s'impose de manière évidente (problème de Tammes [Ber92]). La plupart des solutions, correspondant à un nombre de disques limités ($N \leq 20$) sont basées sur les cinq polyèdres réguliers.

Celles correspondant à un nombre plus élevé font appel aux polyèdres semi-réguliers, tel que celui représentant la molécule de fullérène ($N = 60$). Ces configurations sont généralement construites à partir du plus grand polyèdre régulier : l'icosaèdre ($N = 12$). Elles consistent à subdiviser les 20 faces triangulaires et équilatérales de ce dernier, afin d'obtenir des triangles équilatéraux semblables, qui s'inscrivent sur ces faces (en subdivisant celles-ci par 4; puis par 16, etc.).

La figure 4.2 illustre une telle configuration. En projetant les sommets des triangles sur l'hémisphère, on obtient un 'pavage' semi-régulier de celle-ci par des triangles, des pentagones et des hexagones. Bien que cette configuration permette de recouvrir parfaitement l'hémisphère (moyennant une déformation des triangles), elle présente de sérieuses difficultés en ce qui concerne sa réalisation pratique (ajustement des éléments triangulaires sur la sphère, déformation, etc.); celle-ci a donc été abandonnée.

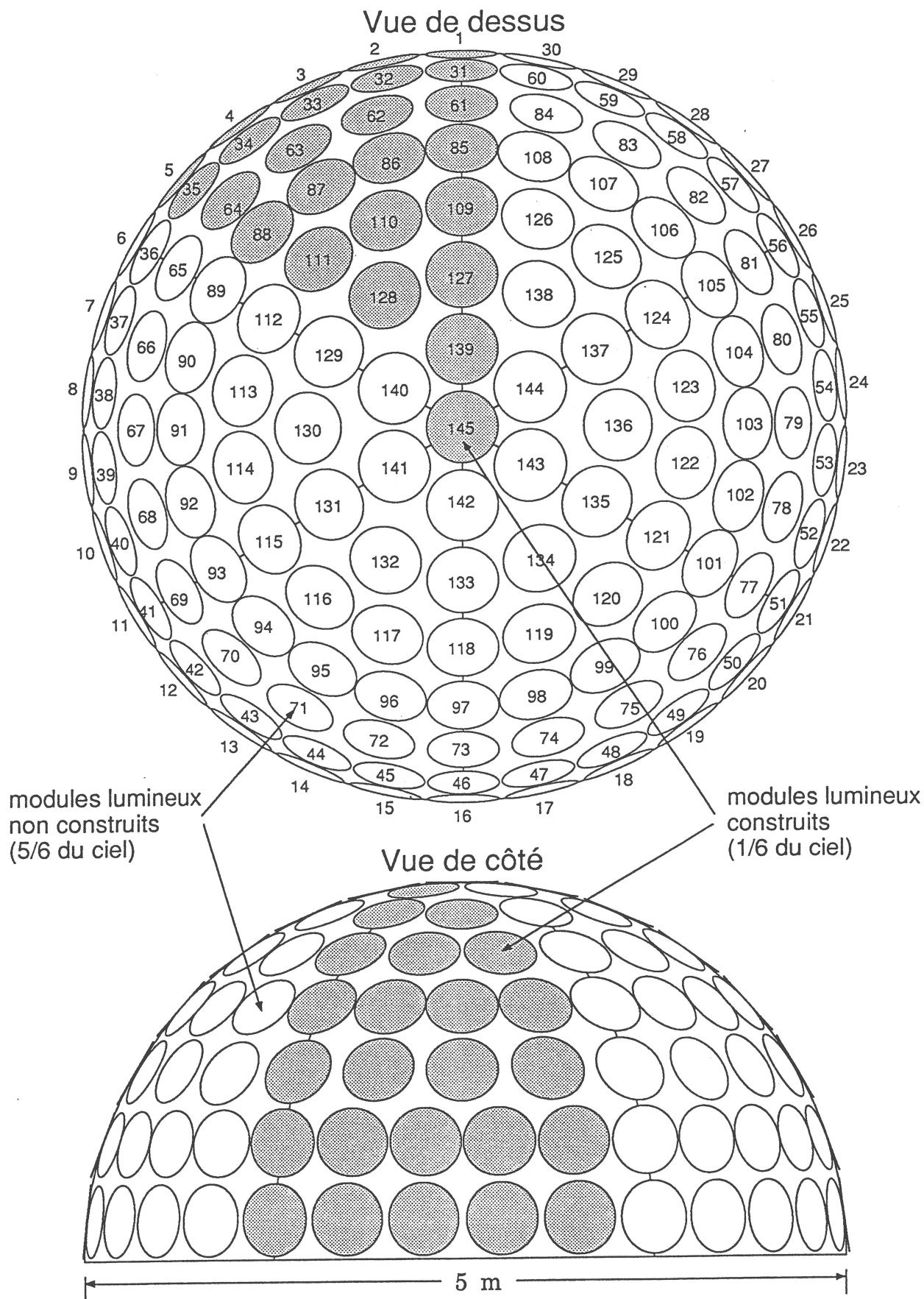


Fig. 4.3 : Configuration adoptée pour le simulateur de ciel.

Chambre d'obscurcissement

La chambre d'obscurcissement est constituée d'un rideau opaque de feutre noir (facteur de réflexion $\rho = 2.7 \%$), délimitant une surface au sol de 5×5 m. Le rideau est suspendu au plafond d'une halle de 8 m de hauteur; il est muni de jupes sur sa partie supérieure permettant d'assurer une étanchéité optimale à la lumière (infiltration de lumière parasite inférieure à 0.2 Lux).

Le sol est revêtu d'une moquette noire ($\rho = 1.4 \%$), limitant les réflexions de lumière parasite. Le simulateur est placé au centre de cette chambre; un dispositif de ventilation, placé au sommet de la chambre, permet d'évacuer les apports de chaleur dus aux sources de lumière artificielle.

Voûte lumineuse

La voûte lumineuse, reproduisant les caractéristiques de la voûte céleste, est constituée de 25 disques lumineux, répartis sur un hémisphère selon la configuration décrite précédemment [Tre87]. Ces disques représentent autant de luminaires, supportés par une structure métallique. Cette dernière a été réalisée à l'aide de trois tubes d'acier verticaux, arrondis en quart de cercle (diamètre du tube 60.3 mm / épaisseur 6.3 mm) et raccordés par neuf arcs de cercle horizontaux (diamètre du tube 48.3 mm / épaisseur 2.9 mm). Sept tubes droits permettent d'asseoir la structure sur le sol.

L'ensemble de la structure a été dimensionné du point de vue statique. Un coefficient de sécurité important a été adopté (accrochage d'un poids de 80 kg au sommet de la structure possible sans déformation significative). L'accrochage des 25 luminaires, sans flexion, ni déformation, est donc garanti.

Les tubes sont reliés entre eux par des noix d'échafaudage, qui assurent la rigidité de l'ensemble. La structure est revêtue d'une peinture noire mate, limitant les réflexions parasites. L'alimentation et le câblage des disques lumineux est réalisé par l'arrière du dispositif, de manière à faciliter l'accès et à éviter toute ombre portée. L'ensemble est démontable pour des raisons d'entretien et de maintenance.


Nom de l'étude: LESO 03		<input type="radio"/> Automatique <input checked="" type="radio"/> Manuel		FIN
28.01.1994				
Type de ciel		Azi 360 Ht 44	SIMULATION	
Serein Propre (campagne) 		Latitude 46.5	<input checked="" type="checkbox"/> Images Vidéo <input checked="" type="checkbox"/> Mesures FLJ	
Orientation 22 °		12 H 00		
		21 mars		
IMAGE		Ouvrir	Excel	
<input type="checkbox"/> Info sur l'image Variante n°1		Sauver	<input checked="" type="radio"/> Excel visible CLEAR <input type="radio"/> Excel invisible	
		Geler	Envoyer dans Excel	
Facteur de Lumière du Jour				
Ref. 3.6 [Lx] A 167.9 % B 172.5 % C 147.9 % D 112.0 % E 102.6 % F 88.5 % G 105.5 % H 143.5 % I 137.3 %		Mesure FLJ	* LESO 01 * LESO 02 * LESO 03	
		Mesure		
		Enregistrement		
		Légende		
		Variante n°1		
Simulation unique		1e sixième		
Niveau des lampes		001	REPOS	
		"n" = changer de nom		

Fig. 4.5: Ecran graphique caractéristique du programme d'interface de contrôle du simulateur (environnement WINDOWS).

Chaque opération peut être effectuée à l'aide de la 'souris'. Certaines sont accompagnées de signaux visuels et acoustiques prévenant l'utilisateur de la mise en mouvement de l'installation. Des aides visuelles facilitent le choix des diverses opérations et guident l'utilisateur dans sa démarche.

Unité de mesure

L'unité de mesure fait appel au même ordinateur personnel que l'unité de contrôle; elle comprend :

- 9 micro-photomètres PRC Krochman de précision (surface sensible : \varnothing 4 mm; précision supérieure à 2%);
- une carte d'acquisition de données possédant, en particulier, 8 entrées analogiques différentielles (WorkMate™, Strawberry Tree Inc. 12 bits de résolution).

Chaque photomètre est monté sur un support métallique. La hauteur de ce dernier correspond, dans la maquette, à celle de la surface de travail (échelle 1:10 à 1:100). Huit photomètres sont placés à l'intérieur de celle-ci; le neuvième est utilisé pour mesurer l'éclairement horizontal disponible à l'extérieur. La figure 4.6 illustre ces photomètres, employés dans ce cas pour

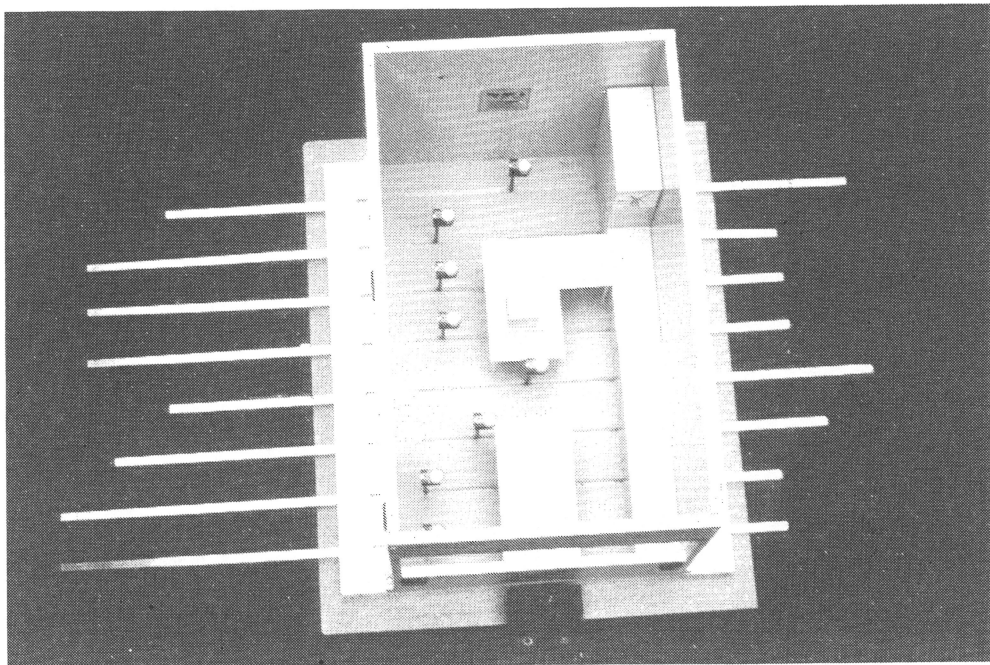


Fig. 4.7: Vue du dispositif facilitant la mesure de profils de facteurs de lumière du jour dans les maquettes.

La visualisation des résultats de mesure sur l'écran est immédiate. Ceux-ci sont automatiquement représentés dans un format graphique approprié (l'illustration d'un tel graphique est donnée au paragraphe 4.4.2, figure 4.32).

Unité de visualisation

L'unité de visualisation fait aussi appel à l'ordinateur PC 486. Elle comprend :

- une caméra CCD couleur miniature Kappa CF 16/2 MC à haute définition (dimensions : 68 mm x Ø 30 mm, résolution : 681 x 582 pixels, seuil d'éclairement standard : 5 Lux)
- un objectif endoscopique à correction d'optique (Ø 1 cm)
- un objectif grand-angulaire (Ø 4,5 cm, focale : 3,6 mm, angle d'ouverture : ~90°)
- un dispositif électronique d'amplification et de commande (rapport S/B : 44 dB, sorties : Y-C, VHS et S-VHS)
- une carte de digitalisation d'image vidéo (Vision plus-AT, Imaging Technology Inc.; 512 x 512 pixels et 256 niveaux de gris)
- un écran cathodique Sony Trinitro.

De cette calibration dépend, en particulier, la possibilité d'utiliser l'unité de visualisation pour évaluer des indices d'éblouissement (vidéo confimètre). L'illustration de cette application du dispositif fait l'objet du paragraphe 5.2.

L'affichage des images numériques sur l'écran est automatique. L'utilisateur peut, par ailleurs, les stocker sur mémoire de masse (disque dur, disquettes). La possibilité de transférer ces dernières par réseau est aussi offerte : cela s'avère nécessaire, en particulier, pour l'évaluation du confort visuel (Visual Comfort Probability VCP, par exemple) effectuée sur station de travail.

4.2 Caractéristiques de la voûte lumineuse

4.2.1 *Choix des luminaires*

Le nombre réduit de luminaires, constituant la voûte lumineuse du simulateur (modèle de P.R. Tregenza), a permis d'apporter un soin tout particulier à leur réalisation. Ces derniers doivent satisfaire les exigences suivantes :

- reproduire un disque lumineux visible sous un angle de 11° depuis le centre du simulateur (diamètre du simulateur : 5 m)
- être modulable en intensité de façon continue entre 0 et 100% (dynamique des luminances)
- représenter un disque de luminance uniforme et d'émission lumineuse lambertienne (diffuseur parfait)
- posséder une température de couleur proche de celle de la lumière naturelle (6500 K)
- posséder une durée de vie suffisante (réduction de la maintenance)
- être caractérisés par un rendement et une efficacité lumineuse élevés (consommation d'énergie et dissipation de la chaleur modérées)
- être de coût raisonnable.

Dans une première approche, divers produits commerciaux ont été considérés pour réaliser ces luminaires (lampes compactées à réflecteur anodisé par ex.). La plupart ne satisfaisant pas les exigences requises, des luminaires spécifiques à cette application ont été développés (voir figure 4.9).

La configuration finale de ces luminaires est donnée ci-après.

4.2.2 Description des luminaires

Les luminaires sont constitués essentiellement des trois éléments suivants :

- deux tubes fluorescents de forme torique (Circline Daylight, 32 et 40 W)
- trois réflecteurs en tôle d'aluminium (2 cônes, 1 disque), revêtus sur la face intérieure d'une couche d'aluminium pur (99.98 % de pureté)
- un disque diffuseur, placé sur le devant du luminaire (Plexiglas opal, facteur de transmission : 66 %).

La figure 4.11 représente une coupe de ces luminaires. Leur diamètre est de 47.9 cm; ils sont équipés de ballast à haute fréquence (VIP-90), pilotés par des variateurs électroniques (LEK/1400 VA, Starkstrom elektronik). Les signaux analogiques, commandant le fonctionnement de ces derniers, sont fournis par l'unité de contrôle du simulateur (convertisseur D/A); ils peuvent être modulés à l'aide du micro-ordinateur PC 486.

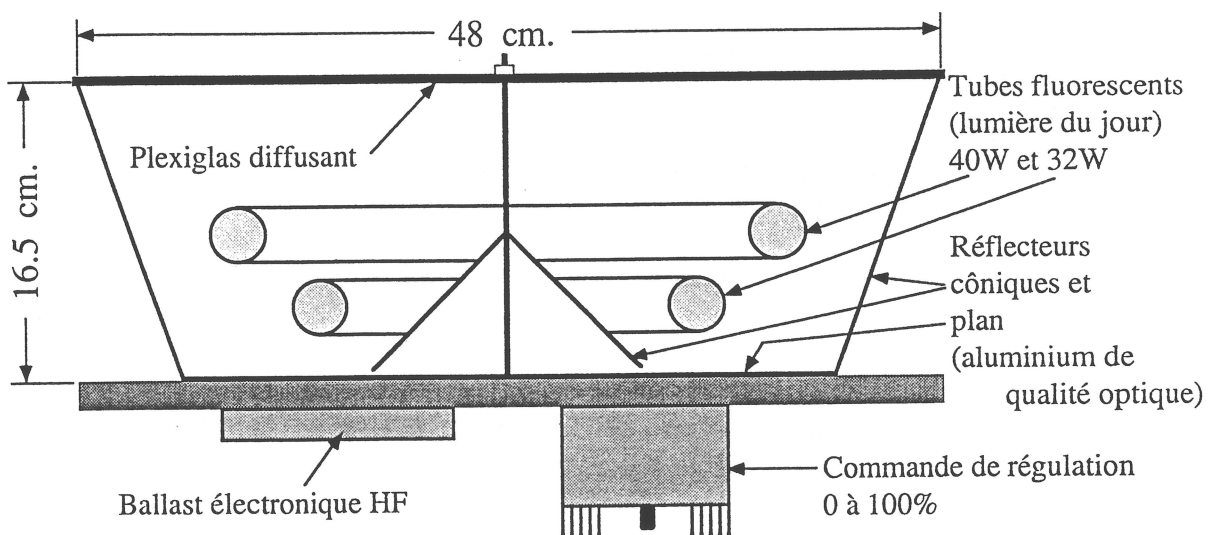


Fig. 4.11 : Coupe d'un luminaire constituant l'hémisphère lumineuse du simulateur.

4.2.3 Propriétés optiques des luminaires

Un luminaire prototype a été construit sur la base des résultats de simulation. L'adéquation de ses caractéristiques lumineuses aux exigences formulées a ainsi pu être vérifiée.

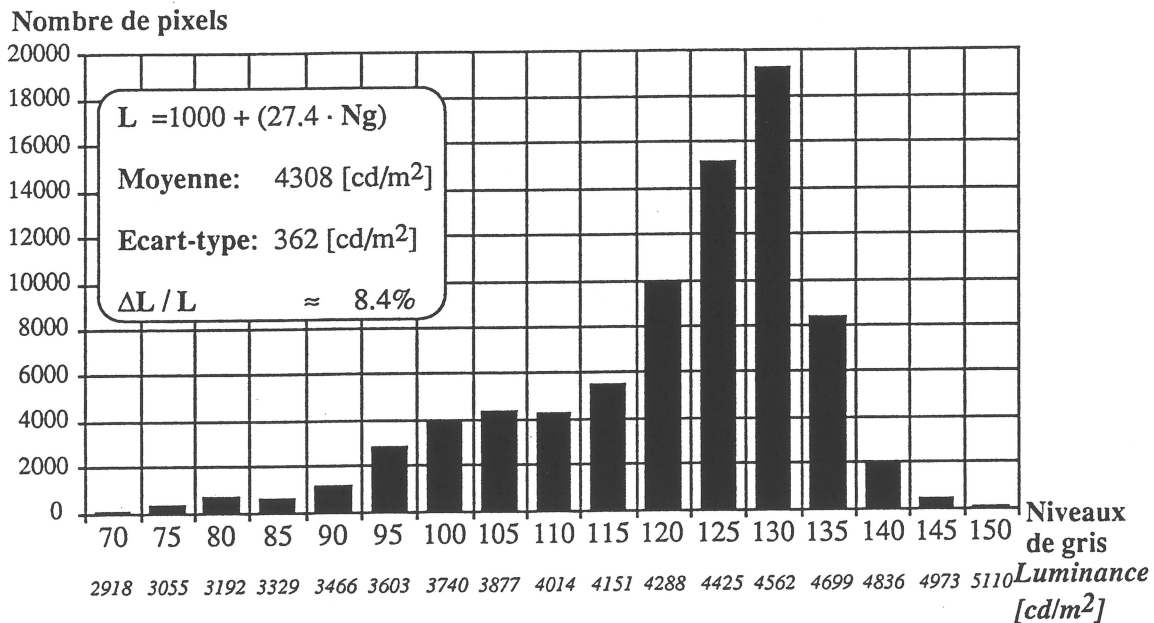


Fig. 4.13 : Histogramme des valeurs de luminance mesurées sur le diffuseur frontal d'un luminaire.

Les caractéristiques photométriques d'émission lumineuse du luminaire ont été déterminées à l'aide d'un photogoniomètre (installation de l'entreprise Regent à Bâle). La figure 4.14 donne les indicatrices d'intensité mesurées de ce luminaire.

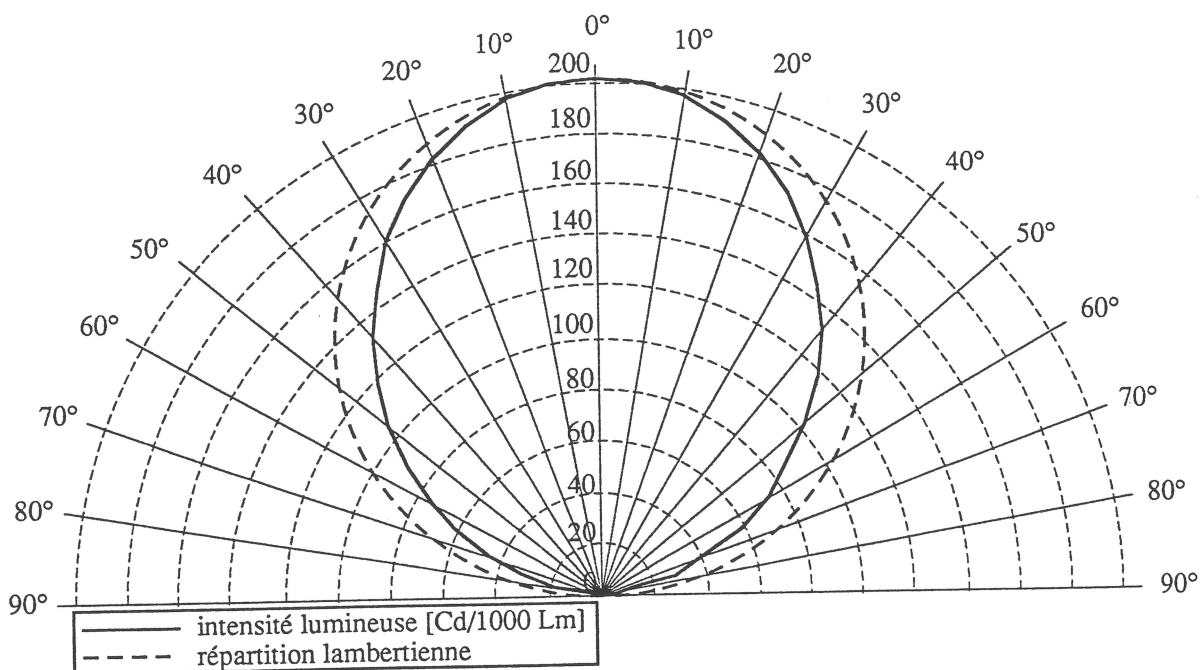


Fig. 4.14 : Solide photométrique caractéristique du luminaire (émission de type lambertien).

- les variations à court terme (évolution sur quelques minutes de fonctionnement)
- les variations à long terme (évolution sur plusieurs milliers d'heures de fonctionnement).

Le premier type de variations est dû au fait que le flux lumineux des tubes fluorescents dépend de la température du plasma à l'intérieur (mélange d'argon et de krypton). Cette température varie rapidement lors des premières minutes qui suivent l'enclenchement du tube. La figure 4.15 illustre l'évolution de ce flux lumineux dans le cas d'un tube fluorescent enclenché à froid (température initiale égale à la température ambiante).

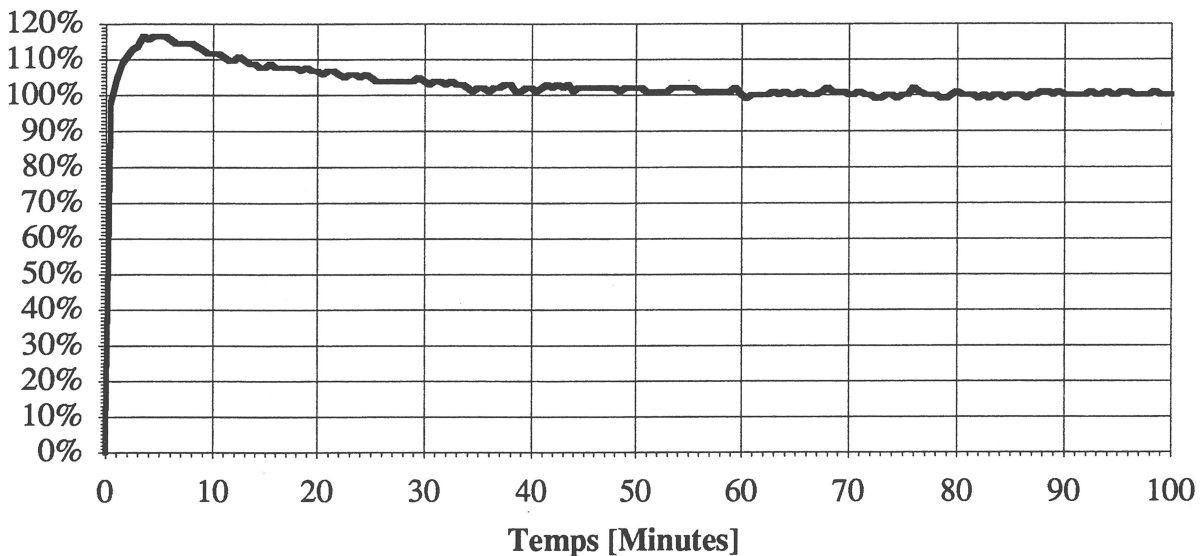


Fig. 4.15 : Variation à court terme du flux lumineux des sources du simulateur (tube fluorescent Circline).

Le flux varie de manière considérable pendant ce laps de temps pour atteindre un maximum après 3 à 4 minutes de fonctionnement. Il décroît légèrement par la suite et se stabilise après 3/4 heure environ. Du fait de ce comportement, le préchauffage des sources du simulateur s'avère nécessaire : il est réalisé, dans la pratique, en enclenchant ce dernier pendant une durée d'une heure avant d'effectuer toute opération.

Le vieillissement des tubes fluorescents est responsable du second type de variations (perceptible après un millier d'heures de fonctionnement). Il est principalement lié à l'empoussiérage des tubes sur leur face extérieure et à l'érosion graduelle de leurs électrodes à l'intérieur (noircissement du verre). On observe en général une stabilisation du flux lumineux d'un tube fluorescent après une certaine d'heures de fonctionnement (équilibre physico-chimique), puis une dégradation lente et continue de ce dernier durant toute sa durée de vie (8000 heures pour les tubes utilisés). Une calibration périodique du simulateur est donc préférable (tous les 3 mois),

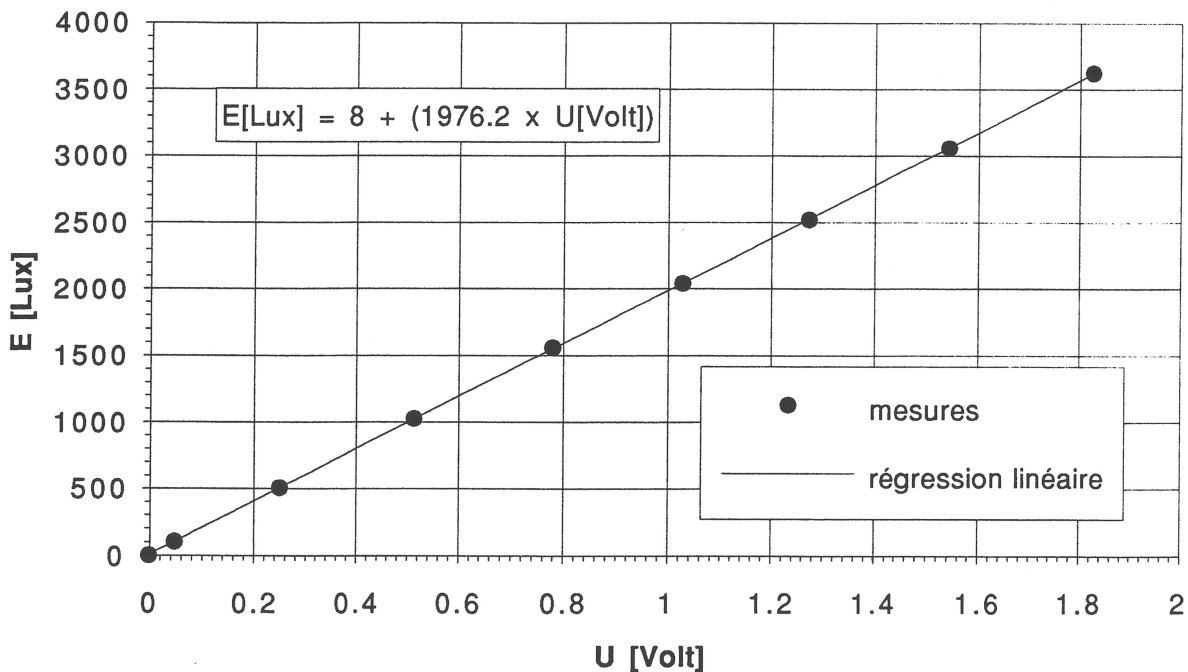


Fig. 4.17 : Courbe de réponse caractéristique "Tension versus éclaircissement" des micro-photomètres du simulateur (sonde PRC Krochmann).

Les sondes photométriques sont caractérisées par une excellente réponse en cosinus (déviations inférieures à 1 %); leur courbe de dépendance "Tension-éclaircissement" est linéaire (erreur de non-linéarité inférieure à 0.8 %).

4.3.3. Caractérisation des luminaires

Bien qu'ils soient construits de façon identique (voir paragraphe 4.2.2), chacun des 25 luminaires constituant la voûte céleste émet un flux lumineux caractéristique différent. Cela est principalement dû :

- à la variabilité des caractéristiques d'émission lumineuse des sources (produit industriel)
- aux différents composants électroniques des appareils auxiliaires (ballasts HF, convertisseur A/D)
- à la configuration de réglage des appareils auxiliaires (tension d'amorçage, alimentation de la cathode).

Cette différence est suffisamment importante pour influencer significativement la luminance apparente des 25 disques lumineux du simulateur (luminance moyenne). Une procédure de calibration, entièrement automatique, a été mise au point; elle permet de caractériser, en tout temps, l'émission lumineuse de chaque luminaire en fonction de la commande numérique (256 niveaux) attribuée à ce dernier par l'unité de contrôle, au travers du convertisseur D/A et des appareils auxiliaires. Cette

La figure 4.19 illustre les caractéristiques de transmission angulaire du luminance-mètre à concentrateur anidolique, en comparaison d'un dispositif traditionnel (tube cylindrique peint en noir, strié à l'intérieur).

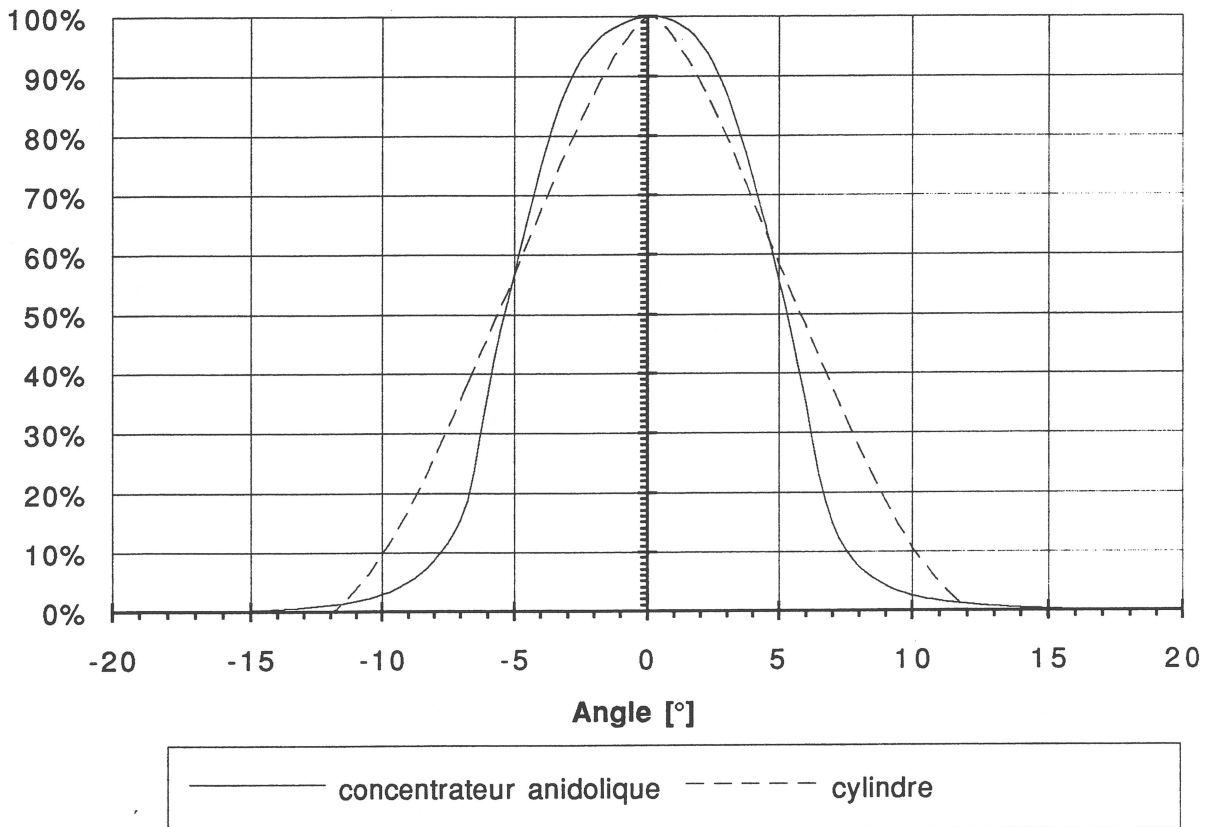


Fig. 4.19 : Caractéristiques de transmission angulaire du luminance-mètre à concentrateur anidolique en comparaison avec un dispositif traditionnel (tube cylindrique peint en noir, strié à l'intérieur).

La table suivante décrit la procédure automatique de calibration. Celle-ci dure 40 minutes environ, sans compter la durée de préchauffage des sources.

Un contrôle de la calibration est effectué en reproduisant un ciel particulier (ciel couvert CIE par ex.) et en comparant la distribution de luminance obtenue avec les valeurs théoriques.

4.4 Applications

4.4.1 Simulation des différents types de ciel

Le simulateur de lumière diffuse permet de reproduire les distributions de luminance caractéristiques de tous les types de ciel. Certaines de ces distributions, ayant fait l'objet d'une normalisation de la part de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), sont décrites à l'aide de fonctions bien définies. Ces distributions, caractérisant des "ciels de référence", sont utilisées généralement dans les études d'éclairage naturel. Bien que théoriques, ces dernières ont le grand avantage de permettre la comparaison des résultats obtenus, en particulier, sur le plan international [CIE70]. Les principaux "ciels de référence", qui peuvent être reproduits sur le simulateur, sont :

- le ciel couvert uniforme (ciel isotrope);
- le ciel couvert CIE [Moo73];
- le ciel serein CIE [CIE73];
- le ciel intermédiaire CIE [Mat87];
- des ciels statistiques [Mol93].

Un aperçu des possibilités de simulation, offertes par le simulateur, est donné ci-après. Une description détaillée des équations (ciels de référence) et des conditions de mesure (ciel statistique), caractérisant les différents ciels simulés, est présentée à l'Annexe C.

Ciel couvert uniforme

La simulation d'un ciel couvert uniforme est illustrée à la figure 4.21. Cette prise de vue a été réalisée à l'aide d'un objectif "Fish-eye", placé horizontalement sur le support des maquettes et se mouvant avec celle-ci. La précision mécanique des mouvements du support, ainsi que la qualité du contrôle de l'intensité des sources lumineuses, sont visibles sur cette photographie (disques lumineux uniformes).

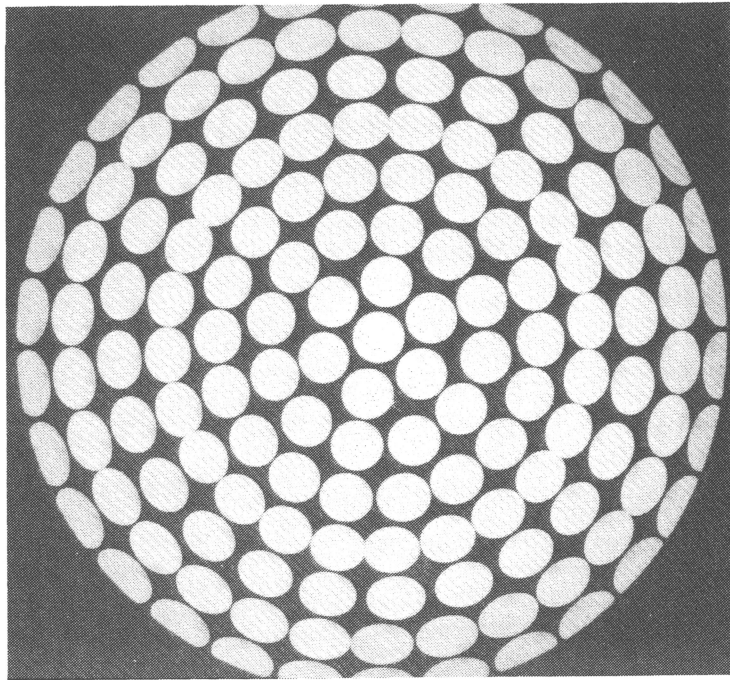


Fig. 4.22 : Simulation d'un ciel couvert CIE (modèle de Moon et Spencer) - prise de vue "Fish-eye".

La figure 4.23 donne une comparaison de la variation de la luminance mesurée sur un méridien, en fonction de la hauteur sur l'horizon, par rapport au comportement théorique (voir Annexe C). L'écart moyen relatif de la courbe de luminances simulées par rapport au modèle est de 2.1 %.

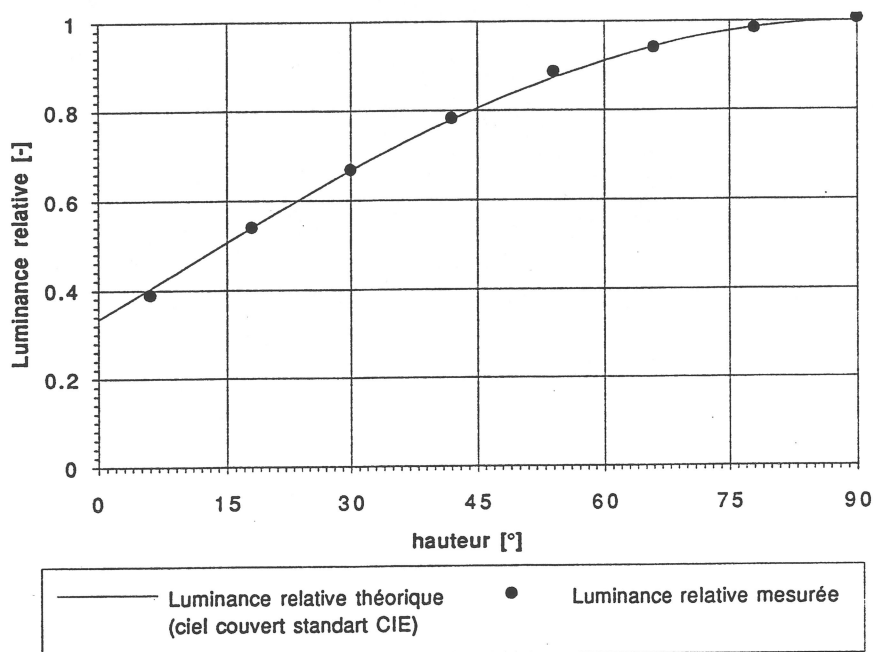


Fig. 4.23 : Comparaison d'un profil de luminances, mesuré sur un méridien, par rapport au modèle théorique (équation de Moon et Spencer).

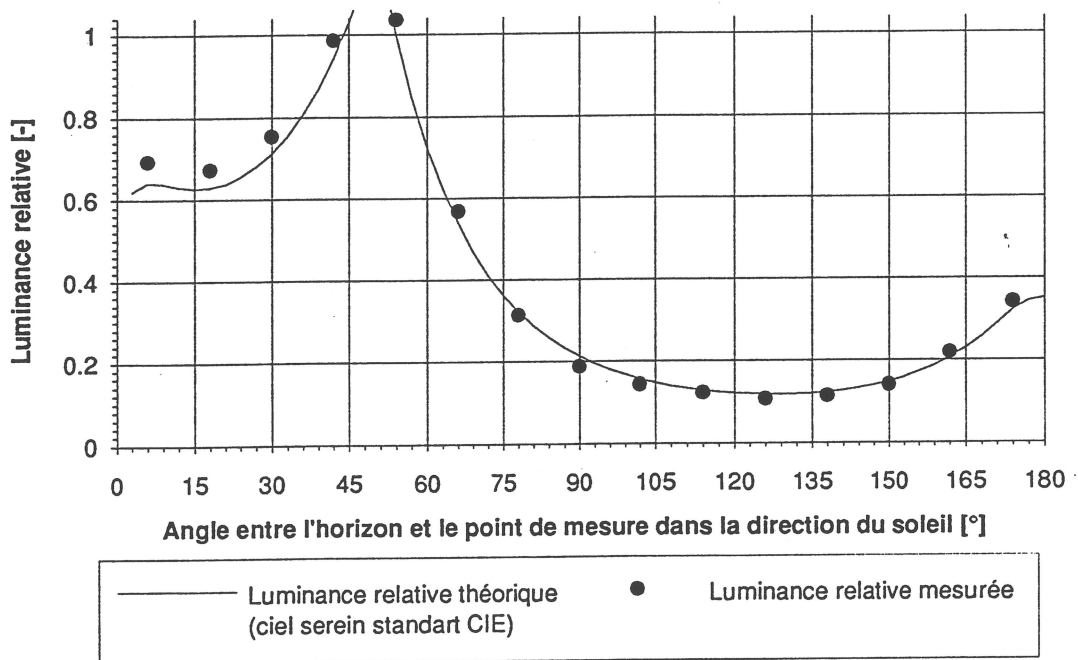


Fig. 4.25 : Comparaison du profil de luminances, mesurés dans le plan du méridien solaire, avec les valeurs théoriques du modèle de ciel serein CIE (voir Annexe C).

L'écart moyen relatif des profils expérimentaux par rapport aux courbes théoriques est de 2.4 %. La même conclusion s'applique aux autres plans méridiens.

Ciel intermédiaire CIE

Une photographie "Fish-eye" d'un ciel intermédiaire CIE est donnée à la figure 4.26. La distribution de luminances, observable sur cette dernière, est une conséquence des équations analytiques, qui définissent ce modèle de ciel [Mat87] (voir Annexe C).

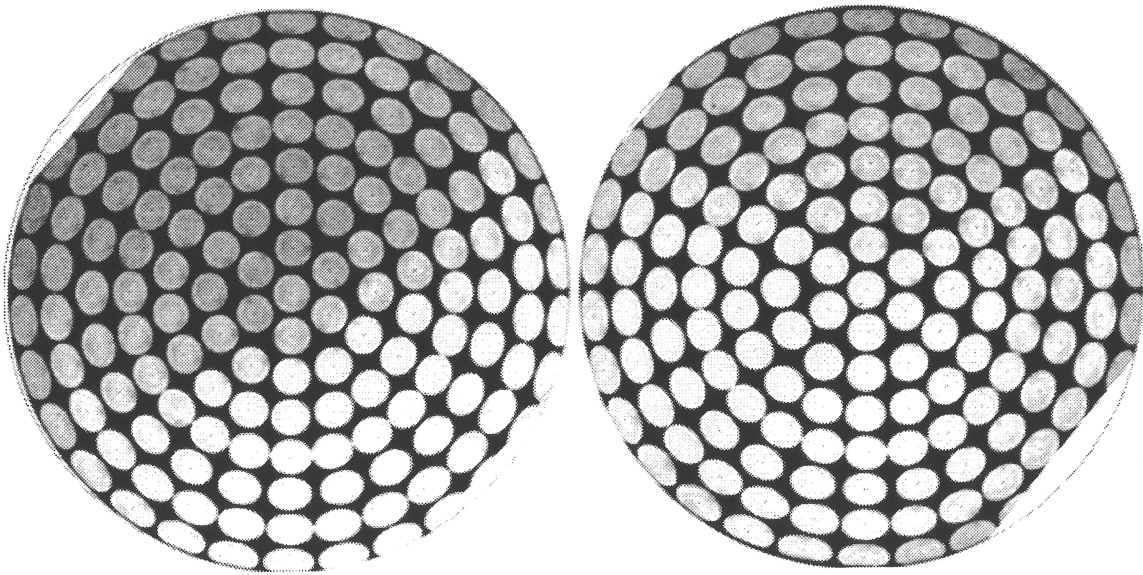


Fig. 4.27 : Ciels moyens mensuels caractéristiques des mois de janvier (gauche) et de juin (droite) à Genève.

La figure 4.28 donne un aperçu de la dynamique journalière du ciel, reproduite par le simulateur. Cette possibilité de simulation permet d'étudier le comportement journalier de l'éclairage naturel d'un local. Une appréciation qualitative de l'évolution dynamique de l'ambiance visuelle peut ainsi être réalisée.

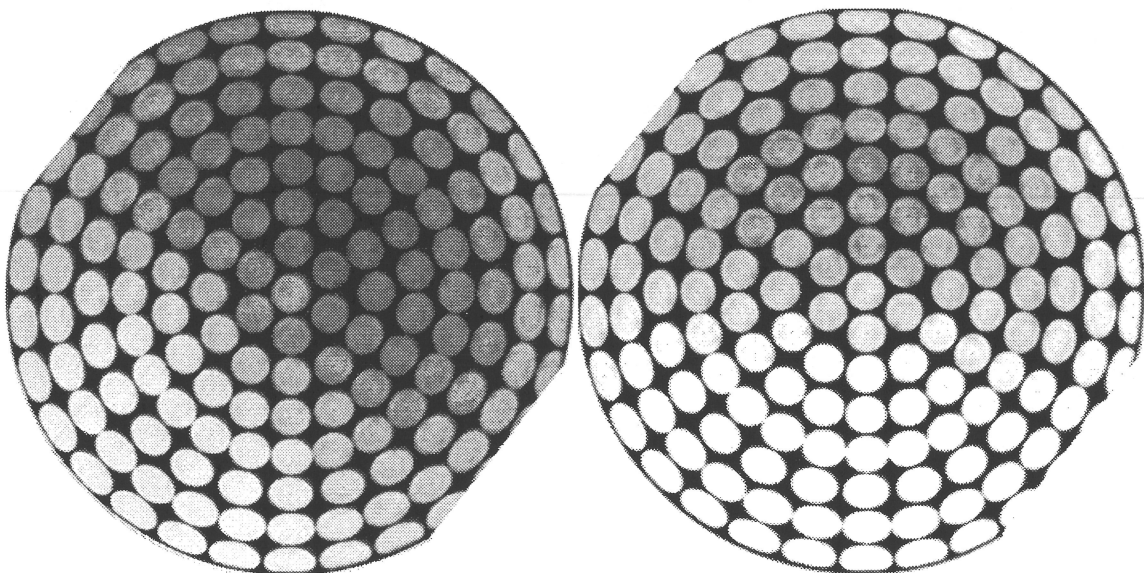


Fig. 4.28 : Evolution journalière de la distribution de luminances du ciel en Suisse romande (ciel moyen de 10h00 et 12h00).

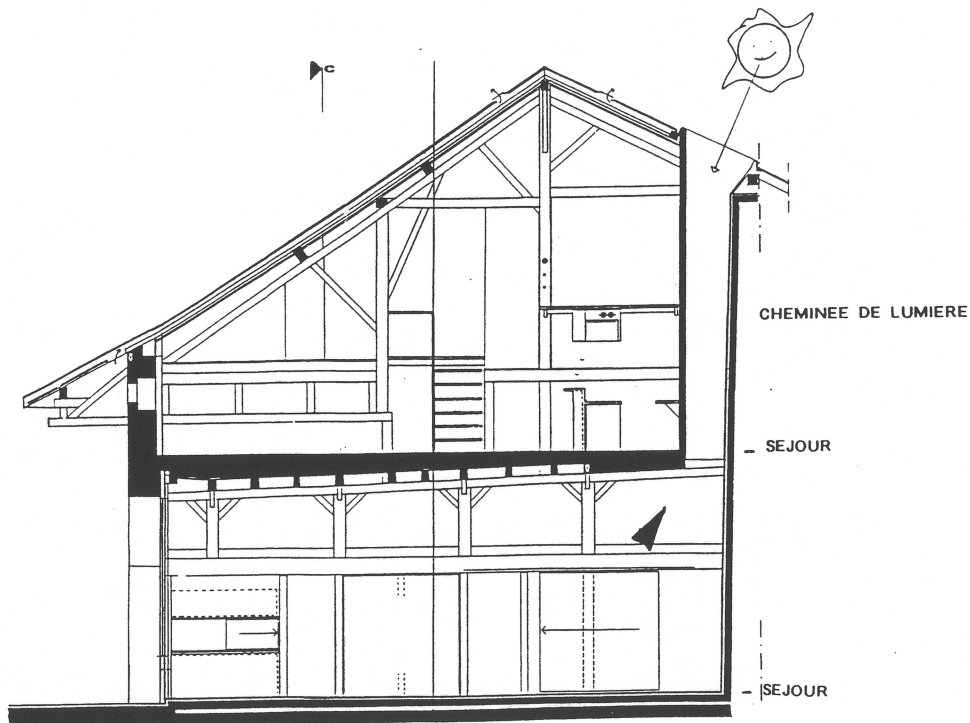


Fig. 4.29 : Coupe verticale de la maison Kunz après rénovation (l'emplacement de la cheminée de lumière est visible sur cette figure).

La maison est placée dans une situation défavorable, en ce qui concerne l'éclairage naturel, du fait de la présence de maisons mitoyennes sur les façades sud-est et sud-ouest [Cuc93].

L'appartement du rez-de-chaussée se trouve, par ailleurs, lesé sur le plan de la lumière naturelle, compte tenu de la disparition du volume vertical reliant ce dernier aux combles, entraînée par la subdivision horizontale de la maison.

Afin de maintenir un apport de lumière naturelle substantiel à cette habitation et afin d'atténuer l'"effet tunnel", causé par la profondeur relative de l'appartement du rez-de-chaussée (9 m de profondeur), plusieurs dispositions en matière d'éclairage naturel ont été prises. Ces dernières, conditionnées par les contraintes architecturales de protection du site, se rapportent essentiellement à des percements adéquats dans la toiture, sous la forme :

- d'une verrière filante placée sur le bord du pan de la toiture;
- d'une cheminée de lumière traversant les deux niveaux de l'habitation.

La figure 4.30 illustre les ouvertures créées en toiture; la figure 4.29 montre l'emplacement de la cheminée de lumière dans la maison.

La figure 4.31 donne les caractéristiques de la configuration optimale adoptée; la référence [Cuc93] présente l'ensemble des variantes considérées. La configuration de départ est constituée d'une cheminée droite, sans biais et sans revêtement réfléchissant (cheminée en bois).

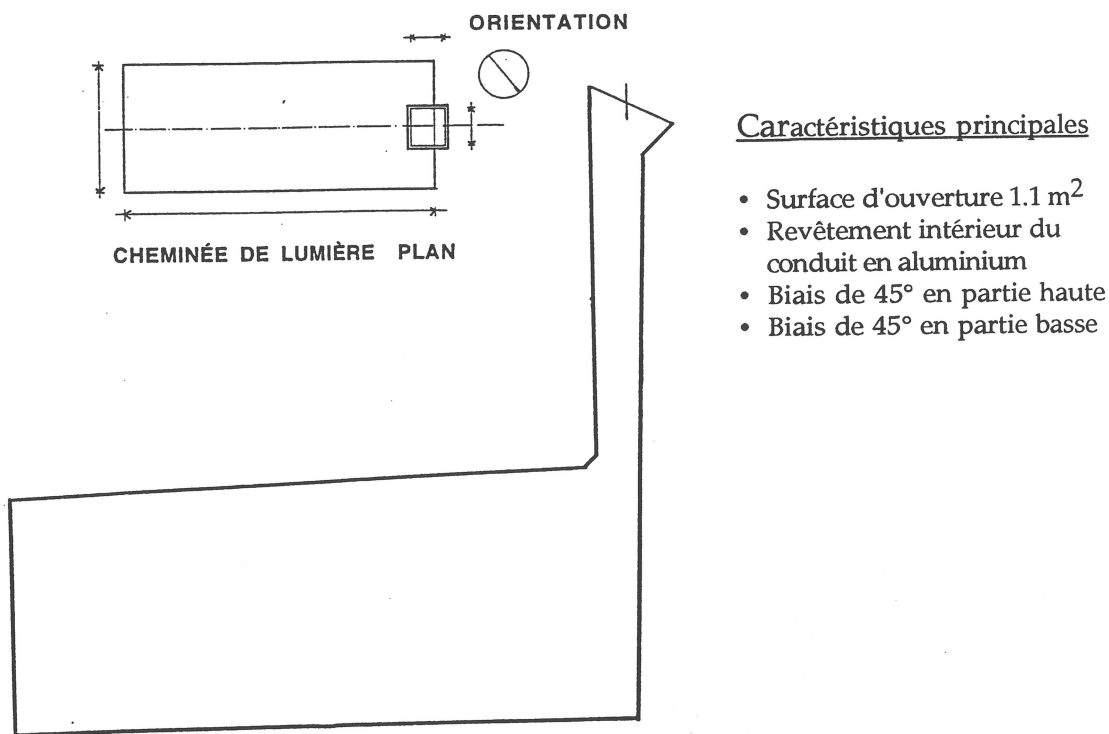


Fig. 4.31 : Configuration optimale de la cheminée de lumière (projet définitif).

Le profil de facteur de lumière du jour, obtenu pour cette configuration, est illustré à la figure 4.32. Ce dernier atteint la valeur de 2.9 % à l'aplomb de la cheminée, qui correspond aux conditions d'éclairage d'un local clair à comparer avec l'absence totale de lumière du jour sans cheminée.

Cette même figure permet de visualiser l'ambiance lumineuse créée par cette cheminée à l'intérieur de la maquette (simulation du ciel couvert uniforme et du ciel serein). Une prise de vue de la cheminée de lumière, après sa réalisation, permet de se rendre compte du résultat final (voir figure 4.33). Une mesure du facteur de lumière du jour réel, obtenu sous la cheminée (2.1 %), confirme la valeur prévue : l'effet des vitrages et des menuiseries n'ayant pas été pris en compte au cours de cette étude.

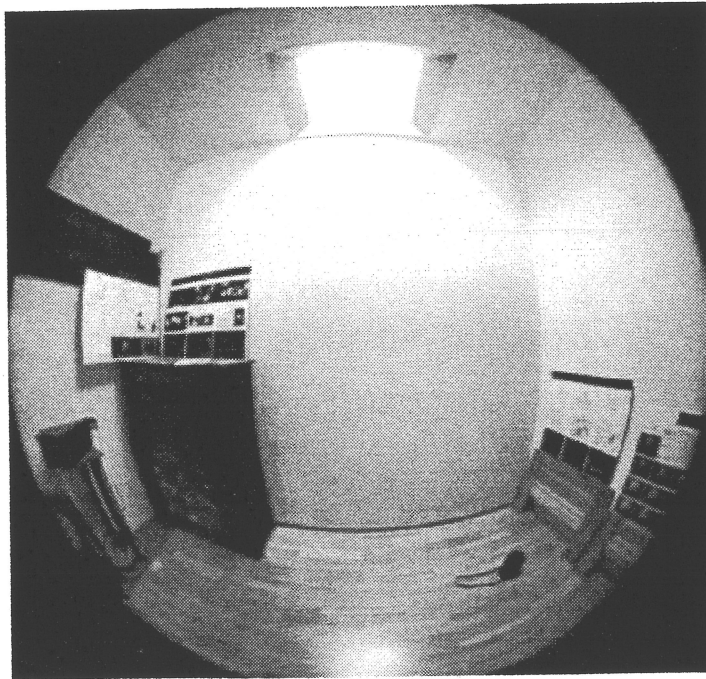


Fig. 4.33 : Prise de vue de l'intérieur de l'habitation après rénovation.

L'ensemble de l'étude a été mené en un temps relativement court (1 journée de travail). Celle-ci a, par ailleurs, permis aux architectes mandatés pour ce projet de participer pleinement à l'étude, améliorant ainsi les possibilités de dialogue et de synergie avec les spécialistes en éclairage naturel. Cette caractéristique essentielle est particulière aux outils expérimentaux en éclairage naturel (héliodon et ciel artificiel), qui impliquent tous deux l'usage de maquettes, familier à l'architecte.

5. EQUIPEMENT DE DIAGNOSTIC

La caractérisation détaillée d'un bâtiment, du point de vue de l'éclairage naturel, a généralement pour objectif :

- de quantifier la pénétration de lumière naturelle à l'intérieur des locaux;
- de déterminer l'importance des économies d'énergie imputable à cette dernière;
- d'identifier des situations d'inconfort visuel particulières.

Celle-ci nécessite un équipement de diagnostic approprié, constitué d'un certain nombre d'appareils de mesures. Cet équipement a été mis sur pied dans le cadre du projet; il comprend, en particulier :

- un ensemble d'appareils de mesures photométriques (mesure des performances lumineuses);
- un dispositif d'acquisition de données portable et compact (mesures de consommation d'énergie);
- un dispositif prototype de mesure du confort visuel (vidéo-confimètre).

Le vidéo-confimètre constitue un développement original, permettant de quantifier la sensation d'inconfort visuel (mesures d'indices d'éblouissement). Son rôle est en principe semblable au confimètre de Fanger, utilisé en thermique du bâtiment (mesure de l'inconfort thermique).

Ce matériel a été largement utilisé dans le cas de divers diagnostics de bâtiments [Chu89], [Chu90], [Chu91], [Gol93], [RAV91]. La description de ce dernier fait l'objet de ce chapitre; son utilisation est illustrée par l'intermédiaire d'exemples concrets d'application de ce dernier.

5.1 Mesures d'éclairage naturel

Les mesures d'éclairage naturel comprennent généralement les opérations suivantes :

- réalisation de prises de vue intérieures (ambiances lumineuses);
- mesures des caractéristiques photométriques des locaux (facteurs de réflexion, brillance);
- mesures de profils de facteurs de lumière du jour (pénétration de la lumière naturelle).

L'équipement de mesures nécessaire pour mener à bien cette tâche comprend :

- un appareil photographique Nikon F3, muni d'un objectif "Fish-Eye" (EQ 8 mm) et de deux grand-angulaires (20 et 28 mm);
- deux luxmètres-chromamètres Minolta xy-1;

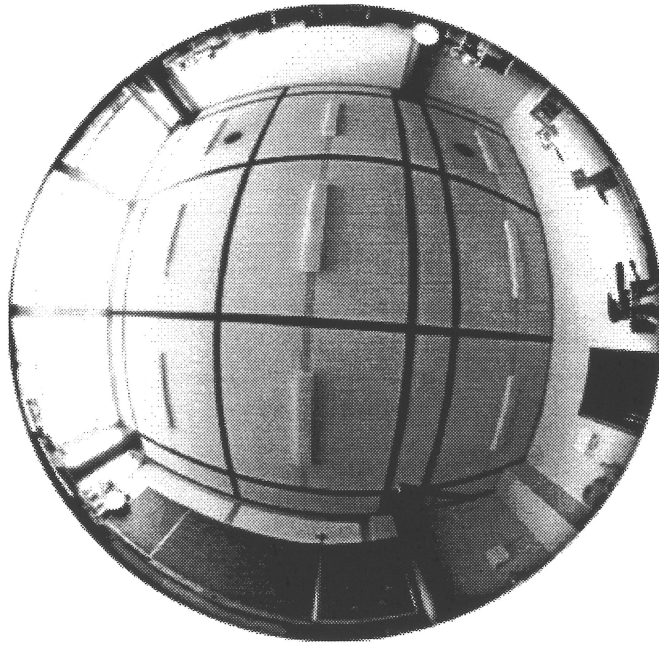


Fig. 5.1 : a) Photographie fish-eye dans le plan du tableau noir (salle de classe)
b) Photographie fish-eye dans le plan de travail (salle de classe).

L'importance de la contribution des fenêtres à l'éclairage du tableau noir (lumière naturelle) est mise en évidence sur la figure 5.1(a), celle de l'éclairage artificiel pour le plan de travail à la figure 5.1(b).

5.1.2 Caractéristiques photométriques des locaux

Avant d'effectuer des mesures de facteur de lumière du jour, il est nécessaire de caractériser le bâtiment et ses locaux du point de vue géométrique et photométrique.

La figure 5.2 illustre la description géométrique d'un bâtiment particulier (Collège des Pâles [Chu89]). Les surfaces d'une classe sont représentées en plan et en élévation; cette représentation permet de faciliter l'identification des points de mesure, ainsi que la visualisation des grandeurs mesurées (facteur de lumière du jour, température de couleur, etc.).

du facteur de réflexion peut être effectuée à l'aide d'un luminance-mètre et d'un chromamètre. Elle n'est possible, toutefois, qu'en conditions d'éclairage diffus et nécessite la mesure simultanée de la luminance L [cd/m^2] et de l'éclairement E [lx] sur cette surface. Le facteur de réflexion de la paroi est obtenu à l'aide de la relation :

$$\rho = \pi \cdot \frac{L}{E} \quad [-]$$

La figure 5.3 illustre une telle mesure.

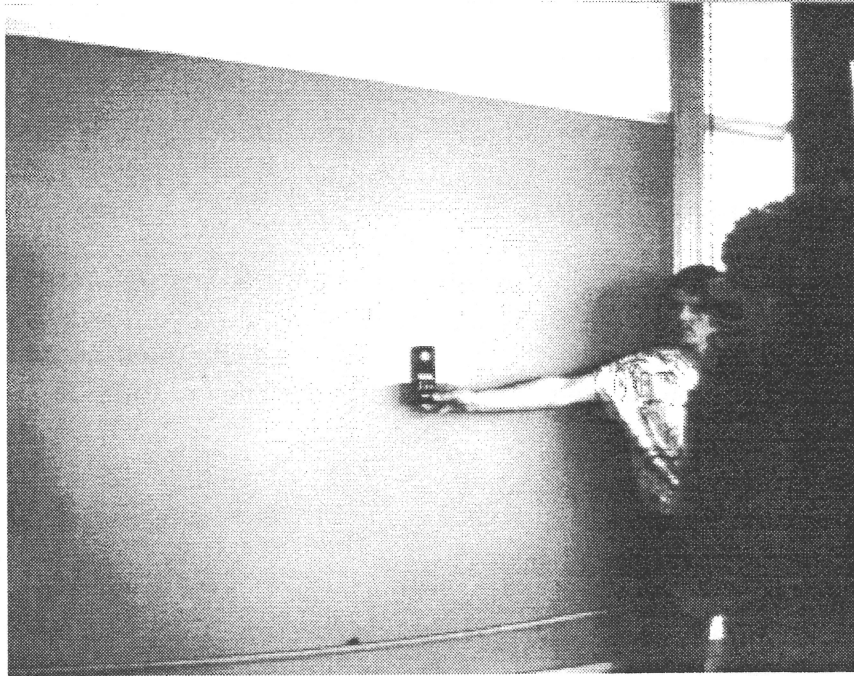


Fig. 5.3 : Mesure du facteur de réflexion d'une paroi en utilisant conjointement un photomètre et un luminancemètre.

La table 5.4 donne les caractéristiques photométriques principales des parois et des façades du local précédent. Celles-ci peuvent être complétées par la mesure des coordonnées chromatiques Y_{xy} des différentes parois [CIE86], réalisées à l'aide d'un chromamètre.

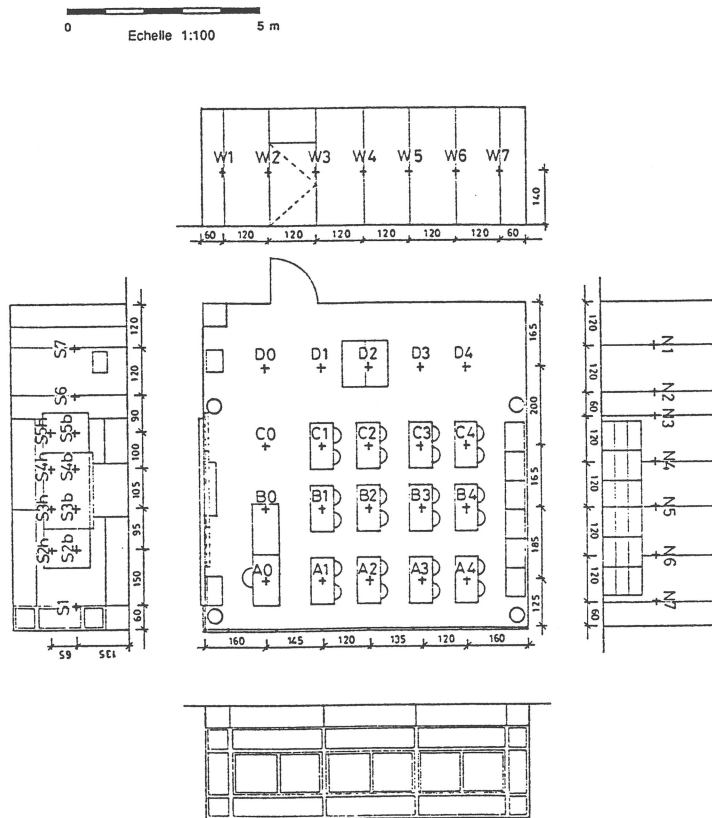


Fig. 5.5 : Répartition des points de mesure, adoptée dans le cas du local précédent.

Le facteur de lumière du jour D [%] permet de caractériser un local du point de vue de l'éclairage naturel (voir Annexe A).

Il se mesure par ciel couvert, de manière à prendre en compte les situations d'éclairage les plus critiques (niveau d'éclairement faible) et à s'affranchir du caractère changeant de l'éclairement, propre au ciel serein (mouvement relatif du soleil) et intermédiaire (passages nuageux).

Ce facteur est défini, en chaque point du local, comme le rapport entre l'éclairement intérieur E_i [Lux] et l'éclairement horizontal extérieur simultané E_h [Lux].

La table suivante donne la correspondance entre la valeur du facteur de lumière du jour mesuré et la sensation de clarté ressentie dans un local. Pour contribuer de façon significative à l'éclairage d'un local, ce facteur doit être supérieur à 3% [Sca93].

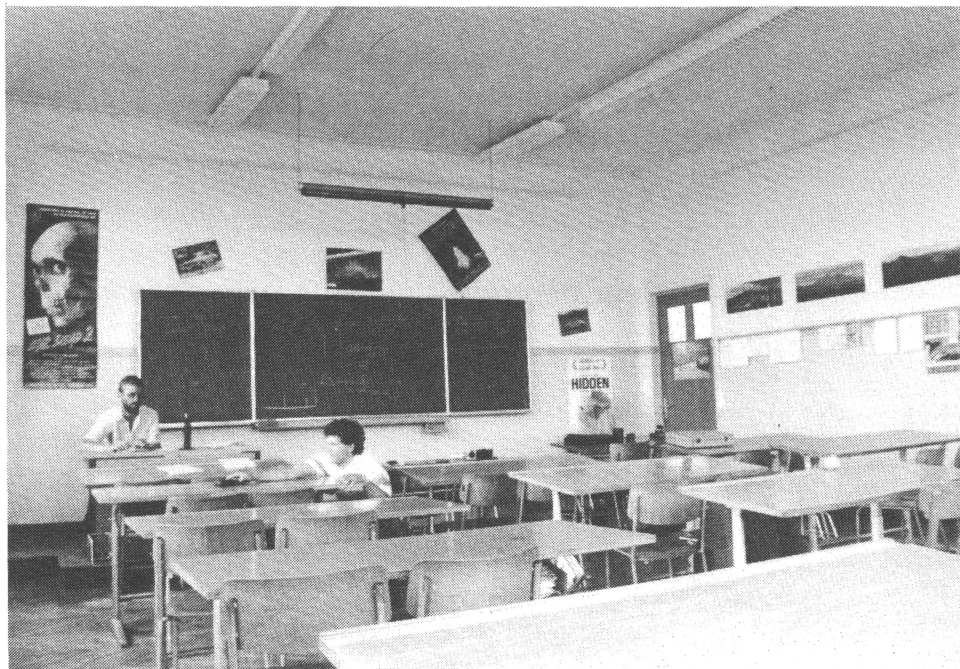
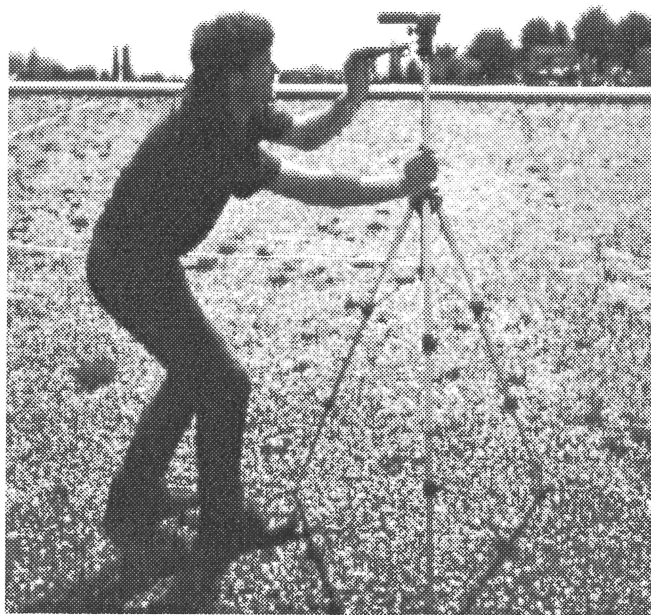


Fig. 5.7 : (a) Mesure de l'éclairement horizontal extérieur (1er opérateur)
(b) Mesure de l'éclairement intérieur (2ème opérateur).

La figure 5.8 donne la répartition du facteur de lumière du jour, mesurée dans la salle de classe. Celle-ci est caractéristique d'un local bien éclairé, s'expliquant principalement par l'indice d'ouverture (29%).

5.2 Mesure de l'inconfort visuel

L'utilisation intensive de l'éclairage naturel dans la pratique se heurte souvent aux contraintes, imposées par l'ergonomie sur le plan du confort visuel [Sca93b]. Ces mêmes contraintes sont responsables d'une réduction significative des performances de systèmes passifs à gain direct, en comparaison de leur potentiel théorique de captage de l'énergie solaire [Fai85].

L'amélioration des techniques de mesures de l'inconfort visuel est donc indispensable. Deux méthodes différentes sont proposées dans le cadre de ce projet :

- une méthode simple, basée sur la mesure du rapport de luminance;
- une méthode avancée, basée sur la mesure d'indices d'éblouissement.

La première de ces techniques a été appliquée à divers diagnostics de bâtiments; la seconde a été expérimentée à titre de prototype.

5.2.1 Mesure du rapport de luminances

L'ensemble des mécanismes conduisant à la sensation d'inconfort visuel est encore relativement mal connu. Il est toutefois possible de caractériser des situations d'inconfort visuel grâce à des mesures de luminance.

Lorsqu'une source lumineuse pénètre dans le champ visuel d'un observateur, sa luminance est parfois suffisamment élevée pour provoquer une gêne pour ce dernier (éblouissement psychologique). Il s'avère que cette gêne est fonction du rapport entre les différentes luminances observées dans le champ visuel. Celle-ci devient clairement perceptible lorsque ces luminances, par rapport à celles du plan de travail, dépassent :

- le rapport 1:3 dans le champ central de l'observateur (ergorama);
- le rapport 1:10 dans le champ panoramique;
- le rapport 1:40 dans le reste du champ visuel.

La caractérisation d'une situation d'inconfort visuel est illustrée à la figure 5.9. Le rapport des luminances, mesurées à l'aide du luminance-mètre en divers points du champ visuel, indique des valeurs supérieures à ces limites (rapport atteignant 160). La sensation d'éblouissement, ressentie par l'observateur, est intolérable.

5.2.2 *Mesure d'indices d'éblouissement*

Un équipement expérimental, permettant de contourner les inconvénients de la technique de mesure précédente, a été mis sur pied. Ce prototype, basé sur l'utilisation de techniques vidéo (vidéo-confimètre), permet de saisir une image sous forme numérique et d'évaluer des indices d'inconfort visuel à partir de cette dernière, grâce à des programmes adhoc (indices d'éblouissement, probabilité de confort visuel, zones d'éblouissement potentiel) [Com93c]. Bien qu'en cours de développement, cet équipement doit permettre de simplifier la procédure de mesure de l'inconfort visuel.

Description du dispositif

Le dispositif expérimental de diagnostic de l'inconfort visuel est constitué des éléments suivants :

- une unité de visualisation, composée d'une caméra CCD couleur à haute définition, d'un magnétoscope S-VHS et d'un moniteur vidéo (voir paragraphe 3.1.2);
- une unité de traitement d'images, composée d'un micro-ordinateur PC486 et d'une carte de digitalisation d'images-vidéo (voir paragraphe 4.1.3);
- un ensemble de logiciels d'analyse, opérant sur ordinateur IBM compatible et sur station de travail Unix, dédié au calcul des indices d'inconfort visuel (routines du programme RADIANCE [Sca93c]).

La figure 5.10 illustre ce dispositif expérimental; chaque élément est associé à une électronique de commande, qui permet de contrôler le mode de fonctionnement de ce dernier (caméra, magnétoscope, etc.).

La calibration préalable de la caméra est indispensable pour ce faire : elle consiste à déterminer précisément la relation "niveau de gris versus luminance" de cette dernière, et ceci pour toutes les valeurs de luminance observables dans la réalité (de quelques cd/m^2 à plusieurs dizaines de milliers de cd/m^2). Cela constitue un travail fastidieux et délicat, qui nécessite une procédure adéquate de calibration.

Une partie de cette procédure a été entreprise, dans le but de montrer la faisabilité de cette approche. Dans une première étape la "fonction gamma" de la caméra vidéo a été déterminée. Cette fonction, donnée par l'équation ci-dessous, lie la valeur du signal de sortie U [-], fournie par cette dernière, à la luminance L [cd/m^2] de l'objet observé :

$$\frac{U}{U_0} = C \cdot \left(\frac{L}{L_0} \right)^\gamma + D$$

U_0, L_0 signal de sortie et luminance de référence;
 C, D constantes de calibration;
 γ paramètre caractéristique de la caméra

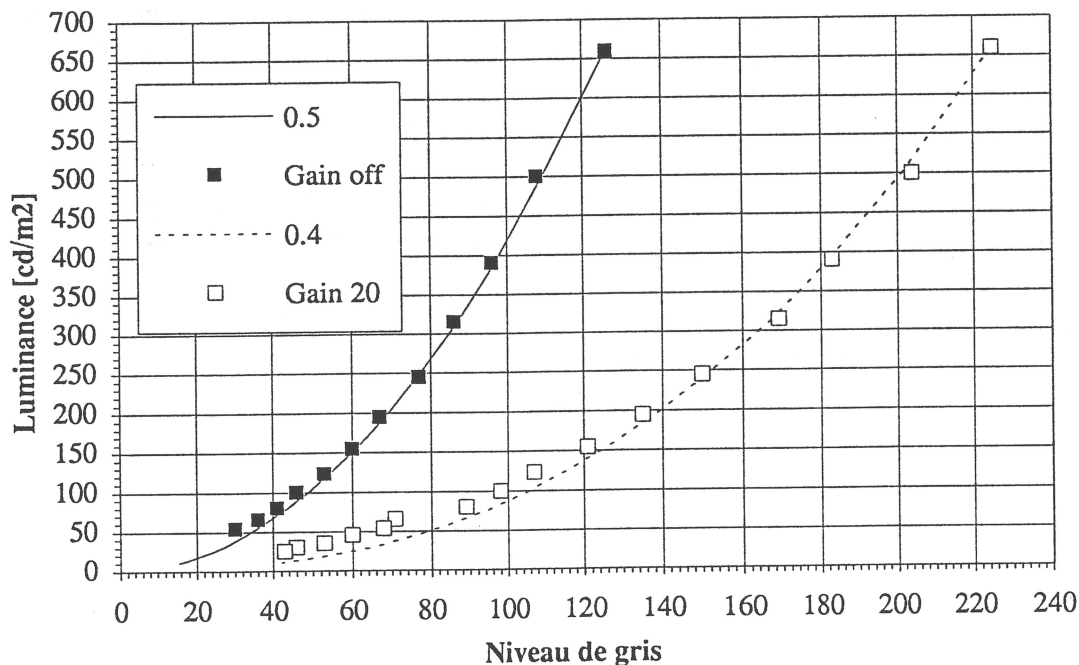


Fig. 5.11 : "Fonction gamma" de la caméra, obtenue pour différents gains d'amplification du signal vidéo primaire (ajustement par moindres carrés).

La figure 5.11 montre l'ajustement d'une "fonction gamma" de la caméra, obtenu pour deux valeurs différentes du gain g d'amplification du signal vidéo primaire (gain off, i.e. $g = 1$; gain de 20, i.e. $g = 20$). La valeur moyenne du paramètre γ , obtenue pour différents gains d'amplification, est de 0.45 ($\gamma = 0.45$).

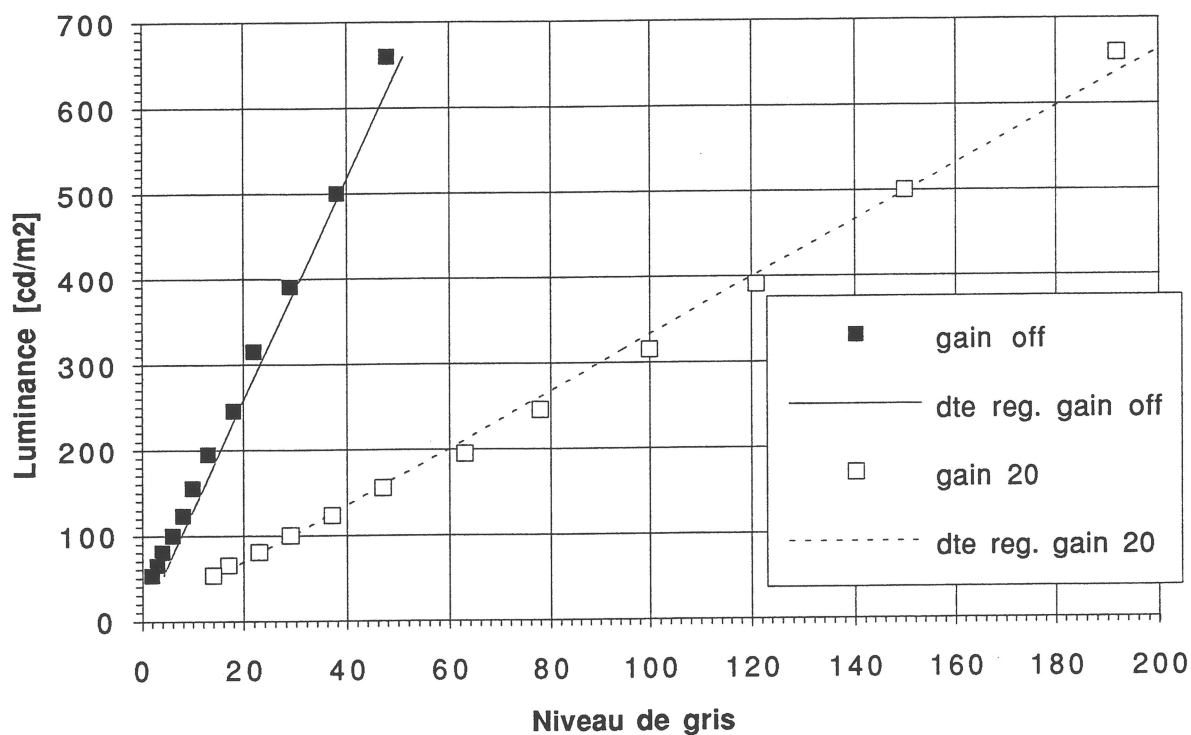


Fig. 5.12 : Relation linéaire "niveaux de gris vs. luminances" obtenue après calibration du dispositif (gain off, i.e. $g = 1$).

Indices d'éblouissement

Les indices d'éblouissement sont évalués, pour une situation visuelle donnée, à l'aide du programme RADIANCE [War91b], [Sca93]. Ceux-ci sont calculés à partir de l'image numérique correspondante, traduite en champ de luminances grâce aux fonctions de calibration. Ces indices dépendent des paramètres suivants :

- L_s [cd/m^2] luminance de la source d'éblouissement potentiel S , située dans le champ visuel
- ω_s [sr] angle solide, sous lequel est vu la source S
- P_s [-] facteur de position de Guth de la source S
(Ce facteur exprime le fait que l'éblouissement, causé par une source, dépend de sa position dans le champ visuel; il est donné par une fonction analytique [Lev75] [CIE83])
- L_v [cd/m^2] luminance moyenne du champ visuel
- L_b [cd/m^2] luminance moyenne du champ visuel sans les sources

où $Q_s = 20.4 \omega_s + 1.52 \omega_s^{0.2} - 0.075$
 N = nombre total de sources

Des cinq indices d'éblouissement, seul l'indice DGR est couplé à une estimation statistique de l'acceptabilité d'une situation d'éclairage sur le plan du confort visuel, exprimée par une "probabilité de confort visuel" (VCP : Visual Comfort Probability). Celle-ci est donnée, en fonction de l'indice DGR par la relation suivante [CIE83] :

$$VCP = \begin{cases} 279 - 110 \log DGR & \text{pour } 55 \leq DGR \leq 200 \\ 279 - 110 \log DGR + 350 (\log DGR - 2.08)^5 & \text{pour } DGR > 200 \end{cases}$$

L'indice VCP [%] indique la fraction d'utilisateurs qui considèrent l'effet d'éblouissement comme imperceptible. Il est possible d'obtenir la fraction prévisible d'insatisfaits (FPI) à partir du VCP :

$$FPI = 100 - VCP \quad (\%)$$

Il est généralement admis qu'un dispositif d'éclairage est bien conçu si FPI \leq 30 %.

Mise en oeuvre

L'exécution d'un diagnostic "in-situ" du confort visuel se divise en deux étapes : l'une sur le terrain (acquisition et enregistrement des images) et l'autre en laboratoire (digitalisation et analyse des images). Elle fait appel aux opérations suivantes :

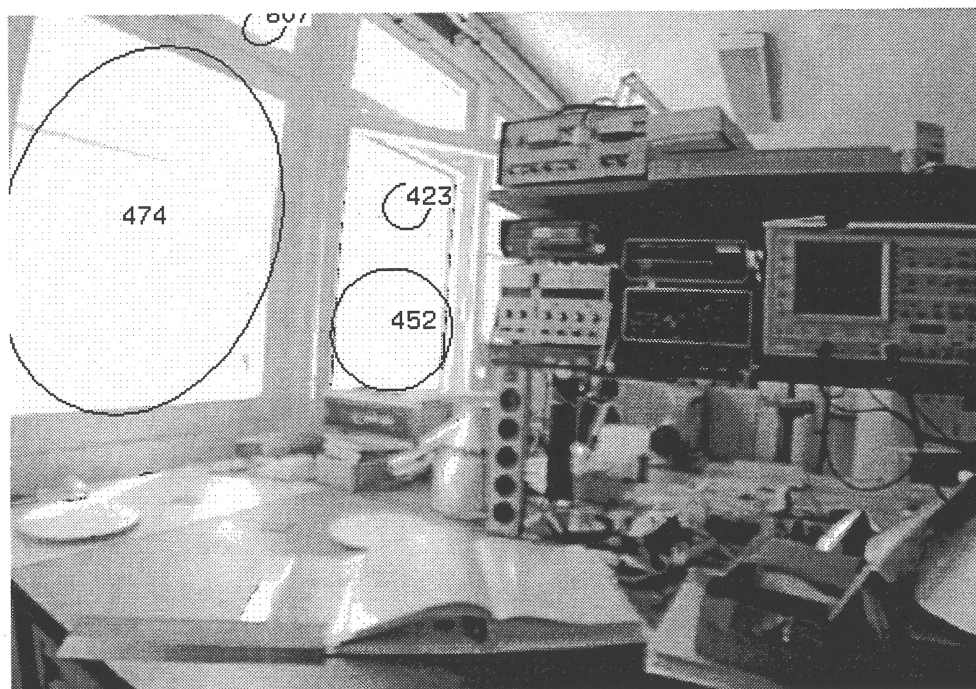
Sur le terrain

- Identification des situations d'inconfort visuel potentielles;
- Réalisation des prises de vue;
- Enregistrement des images vidéo.

Au laboratoire

- Conversion des images vidéo en images numériques;
- Traitement des images numériques à l'aide de la "fonction gamma" inverse;
- Transfert des images sur station de travail;
- Analyse des images à l'aide du programme RADIANCE.

Les figures 5.13 (a) et 5.13 (b) donnent un exemple d'application du dispositif : un même poste de travail (atelier d'électro-mécanique) a été analysé sur le plan



(b)

Fig. 5.13 : (a) Diagnostic "in-situ" d'un poste de travail : atelier d'électro-mécanique, ciel serein, stores relevés
 (b) Diagnostic "in-situ" du même poste par stores baissés. Les cercles sont centrés sur les zones d'éblouissement potentiel; la luminance moyenne de ces zones est indiquée en [cd/m²] au centre des cercles.

	Situation stores baissés	Situation stores relevés
Fraction prévisible d'insatisfaits (FPI)	29 %	80 %
Visual Comfort Probability (VCP)	71 %	20 %
CIE Glare Index (CGI)	17	29

Table 5.14 : Fraction prévisible d'insatisfaits (FPI) et indices d'éblouissement (CGI) des situations précédentes.

La table 5.14 donne la Fraction prévisible d'insatisfaits (FPI) et l'indice d'éblouissement (CGI) correspondant aux deux situations de la figure 5.13; celle-ci montre que :

- la situation de la figure 5.13 (a) (stores relevés) est inacceptable sur le plan du confort visuel (FPI > 30%; sensation d'éblouissement qualifiée d'"intolérable" selon la dénomination CGI [Sca93c], [CIE83].

Puissance installée :	$P = 12.75 \text{ W/m}^2$
Eclairage moyen sur le plan utile :	$E = 261 \text{ lx}$
Uniformité de l'éclairage :	$E_{\min}/E = 0.73$
Efficacité lumineuse :	$\eta = P/E = 20.5 \text{ lm/W}$

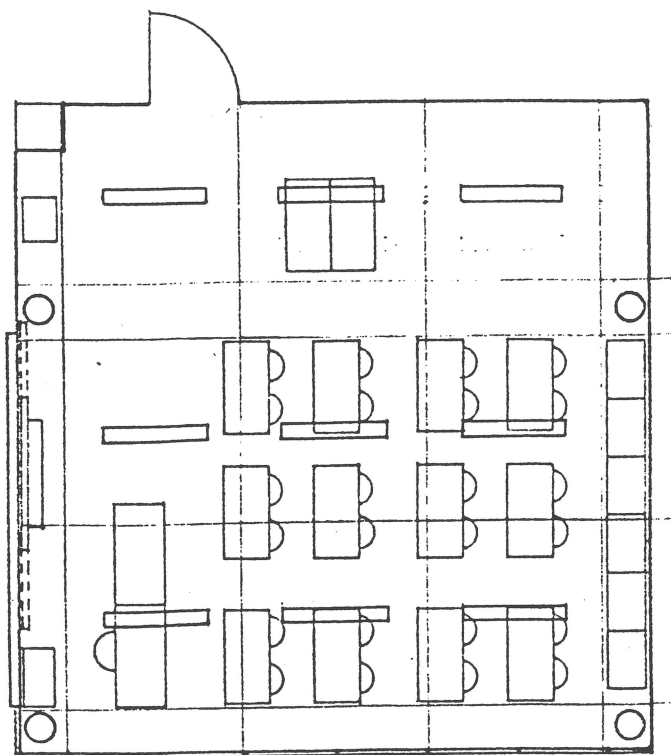


Fig. 5.15 : Principales caractéristiques de l'installation d'éclairage artificiel de la salle de classe présentée au paragraphe 5.1.

Un suivi continu de la consommation d'énergie est réalisé à l'aide de dispositifs intégrés d'acquisition de données. Les systèmes d'acquisition utilisés sont les suivants :

- μ Logger 2 channels, Maurer Instruments, Switzerland;
- Data Logger DL 592, Wicotec, Switzerland.

Ces dispositifs, installés à raison d'un par local, sont reliés à l'une des phases de l'installation d'éclairage artificiel, afin de mesurer la durée d'exploitation h_e [h] de cette dernière. Une sonde photométrique (luxmètre BBC MetraWatt) est connectée à ce dernier, afin de mesurer simultanément la quantité de lumière naturelle disponible.

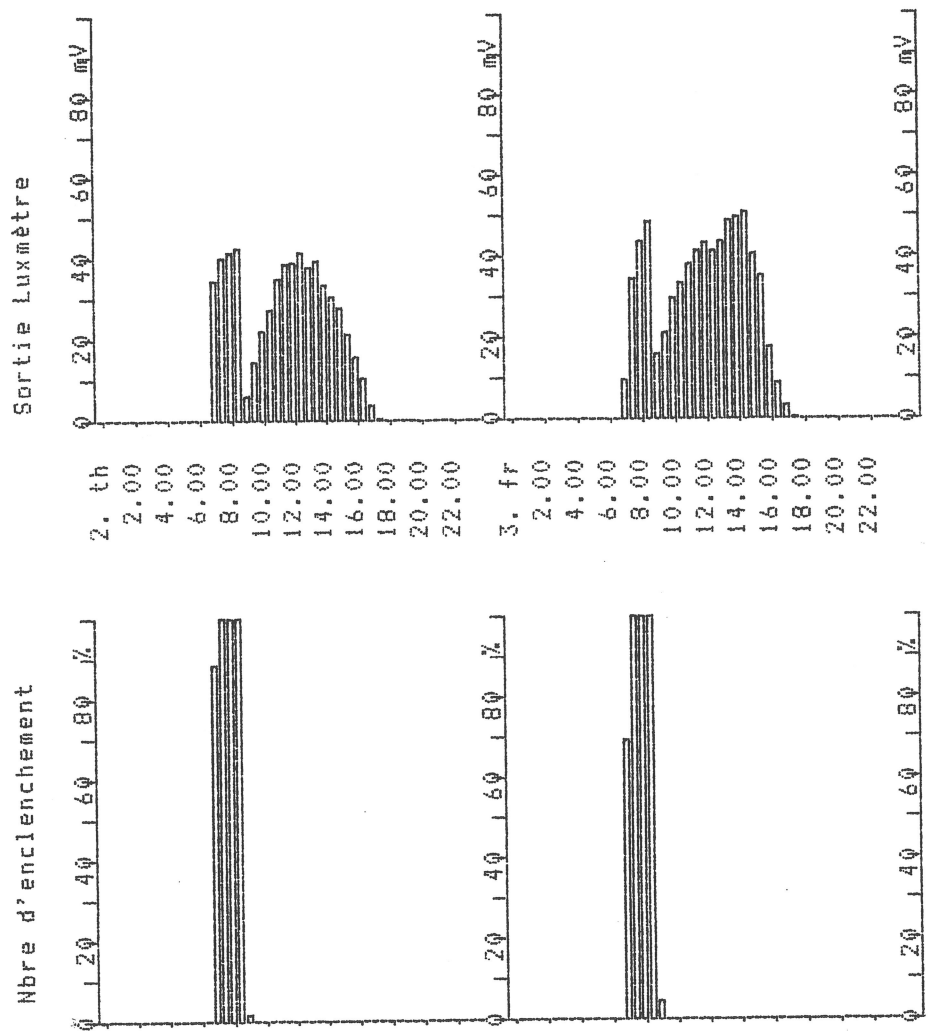


Fig. 5.17 : Consommation électrique d'une installation d'éclairage dans un atelier de menuiserie.

6. DISPOSITIFS D'ECLAIRAGE NATUREL LATERAL

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, permettant d'évaluer les performances de ces systèmes, sont pratiquement inexistantes. Les installations expérimentales, développées dans le cadre du projet, ont donc été utilisées conjointement à des programmes informatiques dans le but de déterminer ces dernières.

Un concept d'éclairage naturel nouveau a été proposé dans le même temps (systèmes anidoliques); l'amélioration des performances lumineuses, qui résulte de son application à l'éclairage des locaux, a été vérifiée grâce à des mesures expérimentales.

Ces deux systèmes sont brièvement présentés ici. Les références [Com93c] et [Sca93c] donnent une description particulièrement détaillée de leur caractéristiques et de leur simulation numérique.

6.1 Systèmes prismatiques

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.

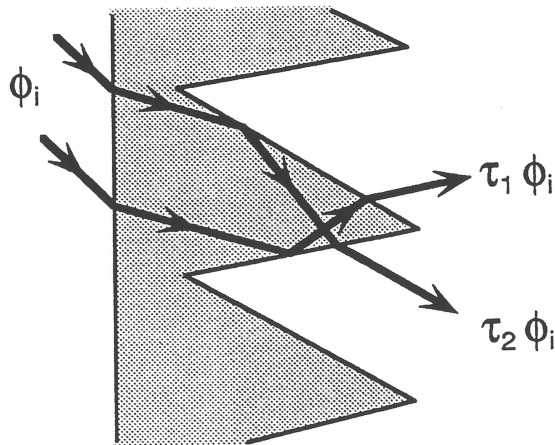


Fig. 6.2 : Cheminement de deux rayons incidents parallèles au travers d'un élément prismatique : la disposition des faces, ainsi que les réflexions multiples, subdivisent ces derniers en plusieurs faisceaux de direction et d'intensité différentes.

Un modèle général de simulation numérique de la propagation des rayons lumineux, au travers d'éléments prismatiques, a été développé [Pas91]. Celui-ci a été validé grâce à des mesures expérimentales sur l'héliodon; celles-ci ont, par ailleurs, permis de mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes.

Mesures expérimentales préliminaires

La propagation et la dispersion des rayons lumineux, au travers d'un panneau prismatique, a pu être observée expérimentalement sous le simulateur de lumière directe (héliodon automatisé). La figure 6.3 montre le nombre important de rayons transmis dans des directions diverses, et ceci pour différents angles d'incidence.

- L_s luminance de la source lumineuse [cd/m^2]
 ω_s angle solide sous lequel est vu cette source [sr]
 A surface de l'ouverture de la sphère [m^2]
 θ_i angle entre la direction de la source et la normale à l'ouverture de la sphère

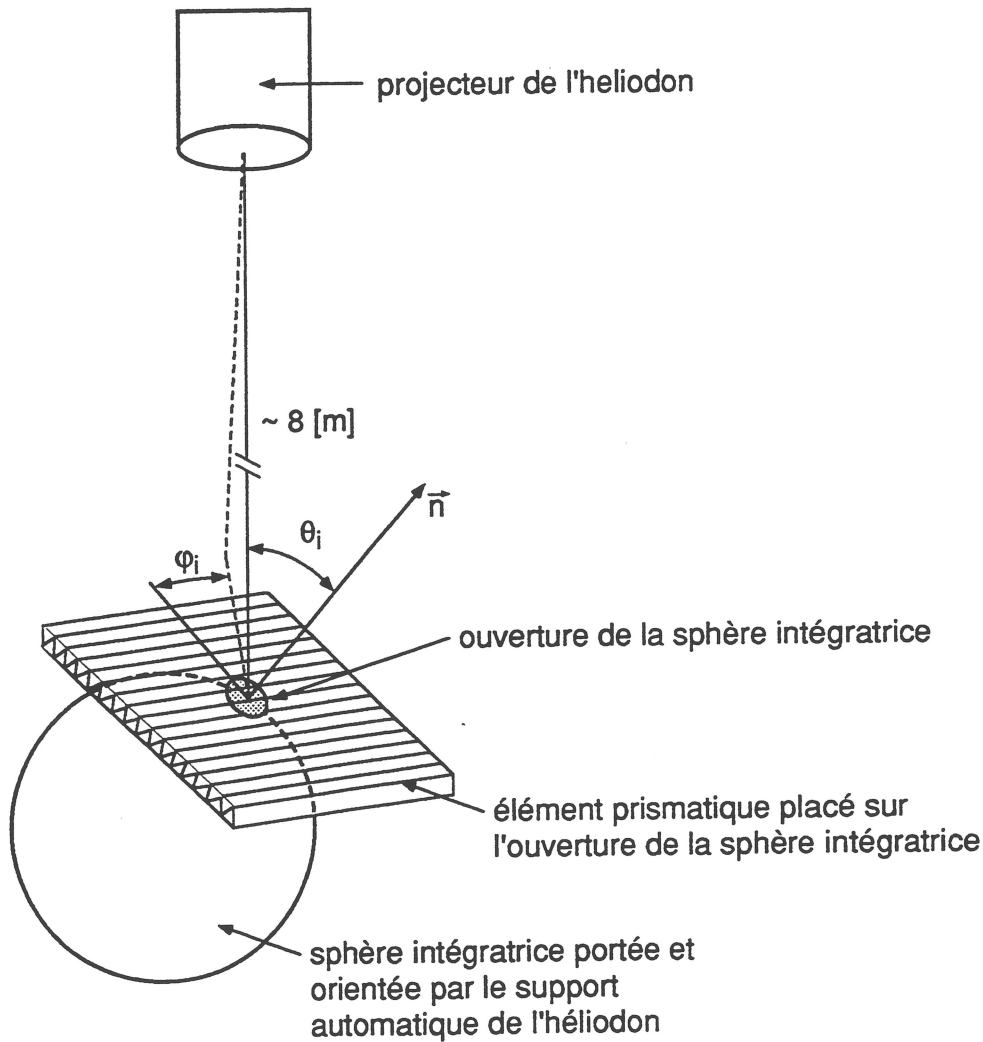


Fig. 6.4 : Dispositif expérimental utilisé pour mesurer l'indicatrice $I_\tau(\theta_i, \varphi_i)$ du facteur de transmission directionnel hémisphérique ($I_\tau(\theta_i, \varphi_i) = \tau_h(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i$)

En normant les valeurs mesurées $\phi_{\text{mes}}(\theta_i, \varphi_i)$ par ϕ_0 , obtenu pour un flux incident parfaitement perpendiculaire à l'ouverture de la sphère intégratrice, on obtient l'indicatrice de transmission $I_\tau(\theta_i, \varphi_i)$ donnée par :

$$I_\tau(\theta_i, \varphi_i) = \frac{\phi_{\text{mes}}(\theta_i, \varphi_i)}{\phi_0} = \tau_h(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i$$

Dispositif prismatique zénithal

Après validation grâce aux mesures expérimentales, le modèle de simulation numérique a été utilisé pour évaluer les performances lumineuses de systèmes prismatiques, employés dans la pratique. La figure 6.6 représente un système semblable à celui installé sur un bâtiment industriel aux environs de Berne (magasin Vaucher [Ate84]).

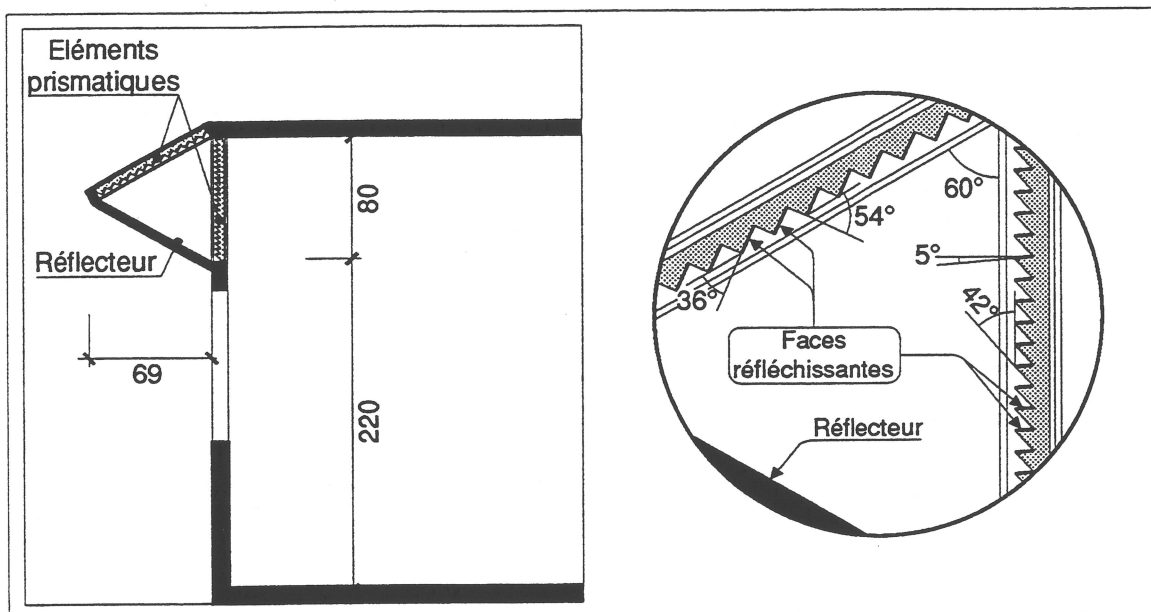


Fig. 6.6 : Système d'éclairage naturel, comprenant plusieurs éléments prismatiques, installé sur le bâtiment Vaucher à Berne.

Les fonctions théoriques de ce système d'éclairage naturel sont les suivantes :

- rejeter la lumière directe pour les angles d'incidence élevés (protection solaire estivale);
- dévier la lumière diffuse zénithale en direction du plafond (meilleur éclairage au fond du local).

La figure 6.7 montre, comme l'indiquent les mesures, que la fonction de déviation de la lumière zénithale au fond du local n'est pas réalisée dans la pratique: les nombreuses réflexions internes des rayons lumineux contribuent à disperser ces derniers dans des directions très diverses, qui ne correspondent pas toutes avec celle souhaitée (fond du local, plafond); ces réflexions ont, par ailleurs, pour effet de réduire considérablement la transmittance globale du dispositif ($\tau_h \approx 0.3$ au maximum, $\tau_g = 0.056$).

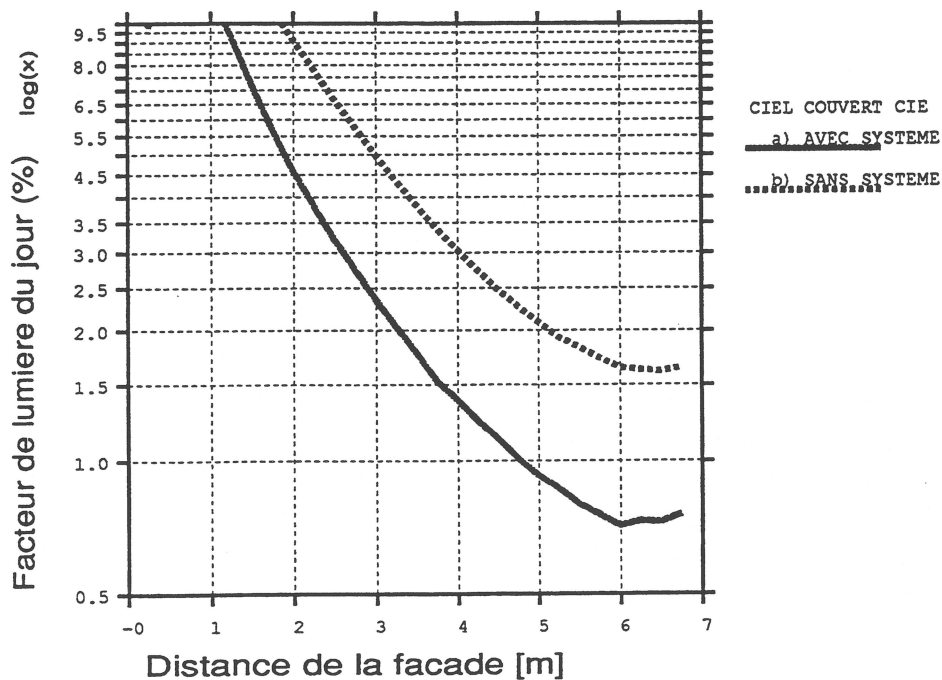


Fig. 6.8 : Simulation d'un système prismatique (facteur de lumière du jour).

Les performances lumineuses de ce système prismatique sont globalement décevantes. Elles se résument sous la forme des conclusions suivantes :

- le facteur de lumière du jour, obtenu au-delà de 5 m de l'ouverture est très faible; il est inférieur à celui correspondant à une ouverture pourvue d'un vitrage en position haute;
- la transmittance globale du dispositif est faible; elle est limitée par le grand nombre de réflexions internes.

Une analyse détaillée de ces performances, menée à bien pour la majorité des dispositifs existants, confirme ce bilan. Cette étude est rapportée dans la référence [Com93c].

6.2 Systèmes anidoliques

Propriétés générales

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 derniers 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.).

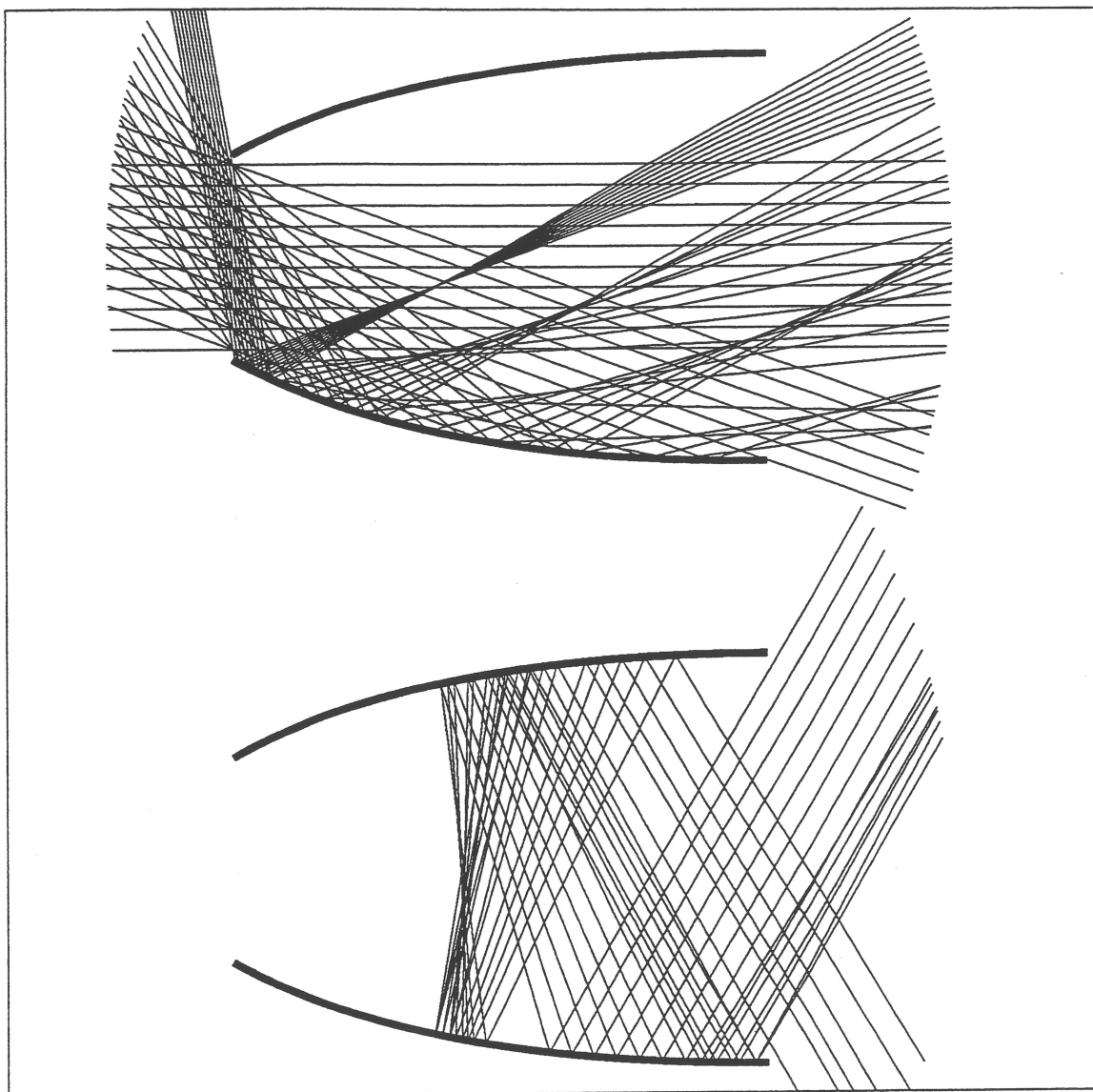


Fig. 6.9 : Section d'un concentrateur anidolique CPC (lignes grasses, $\theta_{\max} = 30^\circ$)
 en haut : les rayons incidents avec $|\theta| \leq \theta_{\max}$ traversent le concentrateur avec un minimum de réflexions
 en bas : les rayons incidents avec $|\theta| > \theta_{\max}$ sont rejetés après quelques réflexions.

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, 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

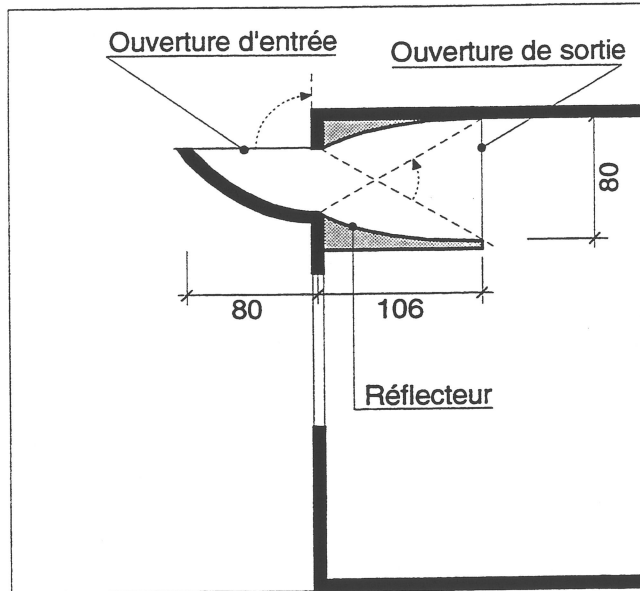


Fig. 6.10 : Coupe verticale du collecteur anidolique zénithal

Un modèle de simulation numérique de ce dispositif a été développé [Com93c], à partir duquel des profils de facteurs de lumière du jour ont été calculés. Afin de confirmer les valeurs obtenues, une maquette du système et du local a été réalisée à l'échelle 1:10. Nous avons ensuite procédé à une série de mesures sous le ciel artificiel en plaçant huit photomètres miniatures sur la section médiane de la maquette (cf. figure 6.11).

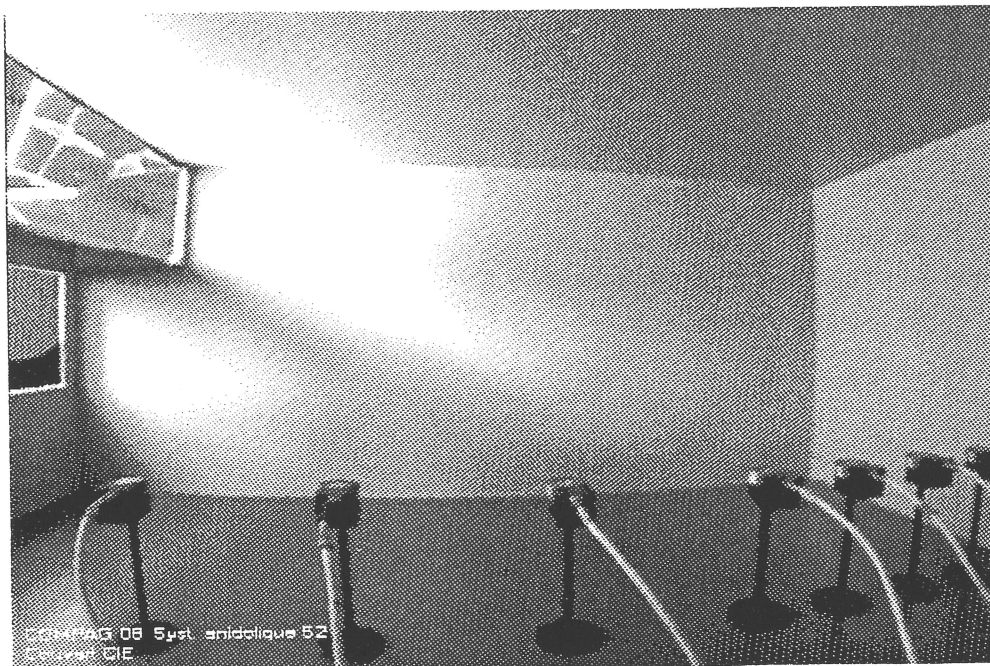


Fig. 6.11 : Vue intérieure de la maquette du local de référence équipé d'un collecteur anidolique zénithal (on distingue la série de photomètres).

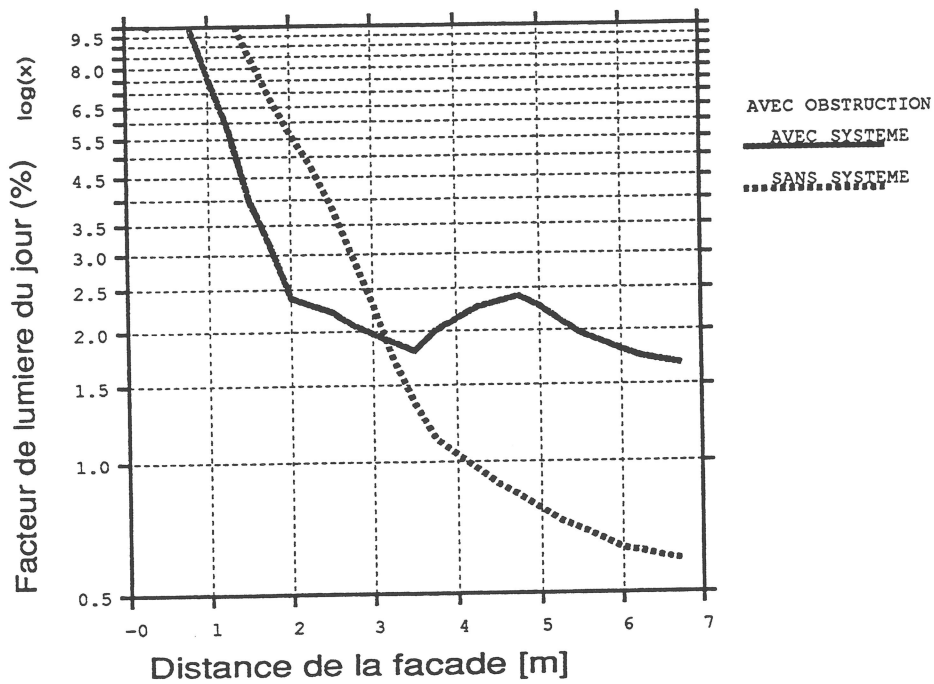
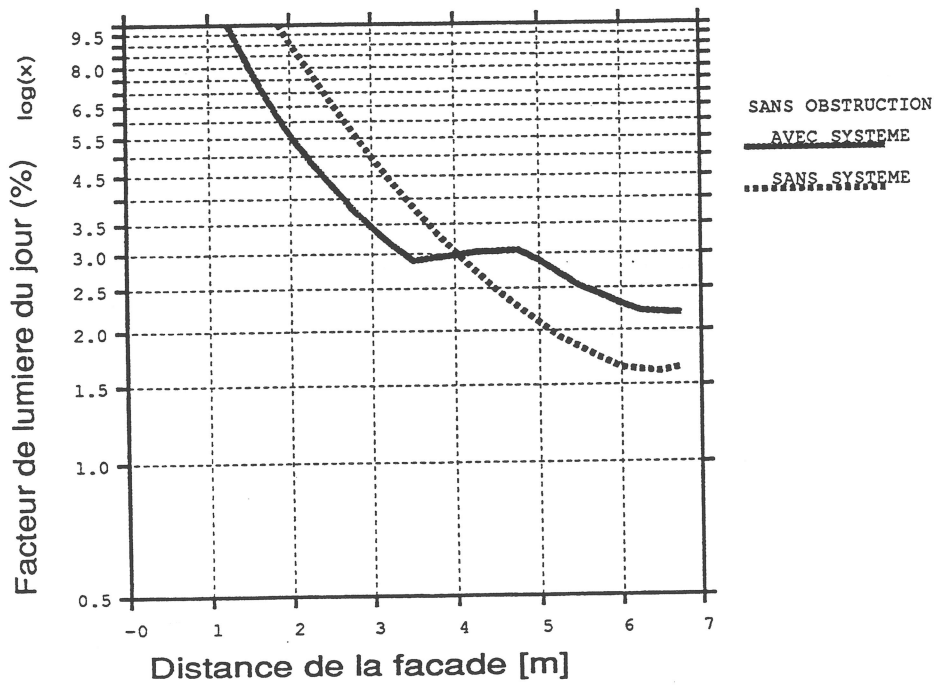


Fig. 6.13 : Profils du facteur de lumière du jour dans un local équipé d'un dispositif anidolique zénithal

7. CONCLUSION

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, afin de réduire leur consommation d'électricité. Il a pour but de mettre sur pied un équipement expérimental permettant de concevoir, d'étudier et d'évaluer des systèmes de gestion de la lumière naturelle, à partir de maquettes. Cet équipement, de conception originale, comprend :

- un simulateur de lumière directe (héliodon automatisé);
- un simulateur de lumière diffuse (ciel artificiel à balayage);
- un équipement de diagnostic en éclairage naturel (vidéo-confimètre, etc.).

L'ensemble des installations a été rassemblé dans le Laboratoire de Lumière Naturelle à l'EPFL. Il permet de mener simultanément :

- des études quantitatives, basées sur la mesure de grandeurs photométriques (facteurs de lumière du jour, indices d'éblouissement);
- des études qualitatives, basées sur l'utilisation d'un système vidéo (visualisation d'ambiances lumineuses).

Le laboratoire est opérationnel; il a été utilisé, dans une première phase, dans le cadre du développement et de l'étude de systèmes d'éclairage naturel latéral (systèmes prismatiques, systèmes anidoliques). Il a, d'ores et déjà, permis de réaliser un certain nombre d'études en éclairage naturel (enseignement universitaire, mandats ponctuels).

7.1 Simulateur de lumière directe

Ce dispositif permet d'étudier la contribution à l'éclairage des locaux de la lumière provenant directement du soleil. Cette composante, supérieure à celle associée à la lumière diffuse (provenant de la voûte céleste), est responsable de la plupart des situations critiques sur le plan du confort visuel. Le simulateur permet principalement de déterminer :

- les pénétrations de lumière directe dans le bâtiment (taches lumineuses);
- leur évolution au cours du temps (saison, journée);
- leur impact sur le confort visuel des usagers (éblouissement).

Le fonctionnement du simulateur repose sur l'utilisation conjointe :

- d'une source de lumière artificielle, reproduisant les caractéristiques photométriques de la lumière directe (spectre, rayons parallèles, éclairement uniforme);

7.2 Simulateur de lumière diffuse

Ce dispositif permet d'étudier la contribution de la composante diffuse de la lumière naturelle à l'éclairage des locaux. Cette étude repose principalement sur l'évaluation des performances lumineuses de systèmes de lumière naturelle, réalisée à partir de maquettes, et comprenant :

- des mesures de profils de facteurs de lumière du jour (grandeurs photométriques);
- la visualisation d'ambiances lumineuses à partir de prises de vue (évaluation qualitative).

Le fonctionnement du simulateur de lumière diffuse repose sur l'utilisation conjointe :

- de 25 sources de lumière artificielle, disposées de façon appropriée sur une structure formant un sixième d'un hémisphère (5 m de diamètre);
- de l'héliodon automatisé, placé en position horizontale, sur lequel sont fixées les maquettes;
- de matériel de mesures photométriques (9 micro-photomètres);
- de techniques de visualisation numérique (caméra CCD, convertisseur A/D).

Des opérations appropriées (rotations successives et additions) permettent d'obtenir les facteurs de lumière du jour et les images numériques correspondant à l'ensemble de la voûte céleste.

De par sa conception originale, ce simulateur présente de nombreux avantages par rapport à ses homologues :

- il peut reproduire tous les types de ciel (couvert, intermédiaire, serein);
- il reproduit fidèlement la température de couleur de la lumière du jour (5700 K);
- il se caractérise par une distribution optimale des sources lumineuses (145 disques lumineux uniformes);
- cette distribution est conforme aux plus récentes recommandations en matière de mesure de luminances du ciel (recommandations de la Commission Internationale de l'Eclairage);

Ce dernier constitue un développement original, permettant de quantifier la sensation d'inconfort visuel à partir d'images vidéo. Celles-ci sont converties en images numériques, sur la base de courbes de calibration "Luminances vs Niveaux de gris". Des indices d'éblouissement sont alors calculés à partir de ces dernières (CIE Glare Index, etc.).

L'équipement a été utilisé au cours de différents diagnostics en éclairage de bâtiments; d'autres équipes de recherche en ont bénéficié dans le cadre de leurs activités propres.

7.4 Dispositifs d'éclairage naturel

Les outils expérimentaux du Laboratoire de Lumière Naturelle ont été appliqués, en particulier, à l'étude et à la conception de systèmes de lumière naturelle à pénétration latérale. Deux types de systèmes ont fait l'objet d'une attention particulière :

- les systèmes prismatiques;
- les systèmes anidoliques.

Le premier type est un produit disponible sur le marché; le second fait appel à un concept d'éclairage naturel nouveau, basé sur la théorie de l'optique anidolique ("non-imaging optics").

Diverses mesures, complétant des simulations numériques, ont permis de déterminer les performances de ces systèmes. Il ressort de ces dernières :

- que de nombreuses réflexions internes contribuent, en ce qui concerne les systèmes prismatiques, à disperser les rayons lumineux transmis par ces derniers et à dégrader le facteur de lumière du jour au fond du local (par comparaison à un double vitrage);
- que les dispositifs anidoliques zénithaux permettent d'accroître substantiellement le facteur de lumière du jour en fond de pièce, sans diminution du confort visuel (augmentation de 150% dans le cas d'un bâtiment en site urbain).

L'optique anidolique s'avère donc être un cadre théorique rigoureux et efficace pour concevoir de nouveaux systèmes d'éclairage naturel.

7.5 Perspectives futures

Les outils expérimentaux, développés dans le cadre de ce projet et rassemblés dans le Laboratoire de Lumière Naturelle, sont opérationnels et performants. Ils complètent les logiciels informatiques élaborés dans le cadre du programme LUMEN (progiciel ADELINÉ).

REFERENCES

- [ASE89] Association Suisse des Electriciens, "Immenraumbeleuchtung mit Tageslicht", Norme Suisse SEV 8911, Berne, 1989.
- [Ate84] Atelier 5, "Architektur und Tageslicht - Haus Vaucher", Ammann Verlag, Zürich, 1984.
- [Bar86] C. Bartenbach, "Neue Tageslichtkonzepte", TAB, n° 4, 1986.
- [Ber92] M. Berger, "Les placements de cercles", Pour la Science n° 176, juin 1992.
- [Cai91] W. Cai, J.M. Gordon, P. Kashin, A. Rabl. "Reflectors for Efficient and Uniform Distribution of Radiation for Lighting and Infrared Based on Non-Imaging Optics". Nonimaging Optics : Maximum Efficiency Light Transfer, Roland Winston, Robert L. Holman, Editors, Proc. SPIE 1528, 1991.
- [Cha82] P. Chauvel, J.B. Collins, R. Dogniaux, J. Longmore, "Glare from Windows : Current Views of the Problem", Lighting Research and Technology, vol. 14, n° 1, 1982.
- [Cha85] Chauvel P., Garcia M., Brebion H., "Etude sur maquette éclairée en ciel artificiel", Publication du CSTB EN-ECL 85.11.C, Nantes, 1985.
- [Chu89] D. Chuard, M. Fontoynt, J.L. Scartezzini, Y. Golay, "Collège des Pâles, Diagnostic en éclairage", Sorane, Lausanne, 1989.
- [Chu90] D. Chuard, M. Fontoynt, J.L. Scartezzini, Y. Golay "Ecole Supérieure de Commerce, Diagnostic en éclairage", Sorane, Lausanne, 1990.
- [Chu91] D. Chuard, "Collège de l'Elysée, Diagnostic en éclairage", Sorane, Lausanne, 1991.
- [Chu92] P. Chuard et D. Chuard, "L'éclairage dans les écoles - Projet EFFENS", Office Fédéral de l'Energie, 1992.
- [CIE70] Commission Internationale de l'Eclairage, "Daylight", Publication CIE N° 16 (E-3.2), Paris (1970).
- [CIE73] Commission Internationale de l'Eclairage, "Standardization of Luminance Distribution on Clear Skies", Publication CIE n° 22 (TC-4.2), Paris, 1973.
- [CIE79] Commission Internationale de l'Eclairage, "Absolute Methods for Reflection Measurements", Publication CIE N° 44 (TC-2.3) 1979.
- [CIE83] Commission Internationale de l'Eclairage "Discomfort Glare in the Interior Working Environment", Publication CIE n° 55, Paris, 1983.
- [CIE86] Commission Internationale de l'Eclairage, "Colorimetry", Publication CIE N° 15.2, 1986.
- [Com92a] R. Compagnon, B. Paule et J.-L. Scartezzini, "Etude en éclairage naturel de la nouvelle imprimerie A.B.C. à Schoenbuehl (BE)", Série CUEPE N° 48, 53 p., 1992.
- [Com92b] R. Compagnon, F. Di Pasquale, B. Paule et J.L. Scartezzini, "Simulations de systèmes d'éclairage naturel complexes", CUEPE/LESO-PB, Proc. du 7. Energieforschung im Hochbau Status-Seminar, 17/18 sept.92, ETH-Zurich.

- [Lam86] William M.C. Lam, "Sunlighting as formgiver for architecture", Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA (1986).
- [Lev75] R.E. Levin "Position Index in VCP Calculations", Journal of IES, January 1975.
- [LUM89] Programme de recherche interdisciplinaire "LUMEN - Lumière naturelle et énergétique du bâtiment", EPFL, Université de Genève, 1989.
- [Mat87] Matsuura K., "Luminance Distributions of Various Reference Skies", CIE Technical Report of TC 3.09, Paris (1987).
- [Mic92a] L. Michel et J.-L. Scartezzini, "Etude des réflexions sur un vitrage incliné [...]", LESO-PB / EPFL, CUEPE / Université de Genève, 1991.
- [Mic92b] L. Michel, R. Compagnon et J.L. Scartezzini "Diagnostic in-situ du confort visuel au moyen d'un système vidéo", CUEPE/LESO-PB, Proc. du 7. Energieforschung im Hochbau Status-Seminar, 17/18 sept. 92, ETZ-Zurich.
- [Mic93a] L. Michel, C. Roecker et J.-L. Scartezzini, "Développement d'un ciel artificiel à balayage", Proc. CISBAT'93, EPFL, 30 sept-1er oct. 1993.
- [Mic93b] L. Michel, C. Roecker et J.-L. Scartezzini, "A New Scanning Sky Simulator", Proc. of ISES 1993 Solar World Congress, Budapest, 1993.
- [Mol93] Molineaux B., Ineichen P. et Guisan O., "Mesures d'éclairage à Genève", GAP/CUEPE, Université de Genève (1993).
- [Moo73] Moon P. and Spencer D., "Illumination from a Nonuniform Sky", Illuminating Engineering, 37, 707-726 (1942).
- [Moo85] F. Moore, "Concepts and practice of architectural daylighting", Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA (1985).
- [Nic91] P. Nicolas, "L'héliodon", Projet d'ingénieur, LESO-PB / EPFL, 1991.
- [Olg63] V. Olggay, "Design with climate - Bioclimatic approach to architectural regionalism", Princeton University Press, Princeton, USA (1963).
- [OSR90] OSRAM, Lumière pour la photo, le cinéma, la télévision et l'éclairage scénique, Munich (1990).
- [Par90] S. Parhofer, "Prise en compte du rayonnement solaire dans l'éclairage naturel des locaux : simulation expérimentale", Rapport de stage au LESO-PB/EPFL, Ludwig Maximilian Universität, München, RFA, 1990.
- [Pas91] F. Di Pasquale, "Etude de la transmission lumineuse d'un vitrage prismatique", Travail de diplôme, EPFL LESO-PB, Décembre 1991.
- [Qua90] Quartz Color, Eclairage pour vidéo film et télévision, Ianiro (1990).
- [RAV91] Programme d'action RAVEL, "Confort et utilisation de la lumière naturelle", Projet de diffusion 11.03, OFQC, Berne, 1991.
- [Rhy91a] Rhyner R. et al., Héliodon automatisé: rapport technique, 56 p, LESO-PB/EPFL, Lausanne (1991).

- [Sze86] Selkowitz S.E. and Griffith J.W., "Effective Daylighting in Buildings - Revivited", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-21256, Berkeley (1986).
- [Sze89] Szerman M, "Künstlicher Himmer - Quantifizierbare Tageslichtplanung im Entwurfsstadium", IBP Mitteilung No 174, 16 (1989).
- [Tre87a] Tregenza P.R., "Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement - General class stations", Supplement to CIE Journal, 6 (2), Paris (1987).
- [Tre87b] Tregenza P.R., "Subdivision of the Sky Hemisphere for Luminance Measurements", Lighting Research Technology, 19, 13-14 (1987).
- [Tre89] P.R. Tregenza, "Daylight Measurements in Models : New Type of Equipment", Lighting Res. Technology, 21(4), 193-194, 1989.
- [Tus66] E. Tuchschild, W. Mathis, "Etudes sous maquettes effectuées sous ciel artificiel", Schweizerische Technische Zeitschrift N° 38/39, 29 sept. 1966.
- [War91b] G.J. Ward, "RADIANCE visual comfort calculation", Rapport interne, LESO-PB, EPFL, 1991.
- [Win70] R. Winston. "Light Collection within the Framework of Geometrical Optics", J. of Optical Society of America, vol. 60, n° 2, 1970.
- [Win79a] R. Winston, W.T. Welford. "Geometrical vector flux and some new nonimaging concentrators", J. of the Optical Society of America, vol. 69, n° 4, 1979.
- [Win79b] R. Winston, W.T. Welford, "Ideal Flux Concentrators as Shapes that do not Disturb the Geometrical Vector Flux Field : A New Derivation of the Compound Parabolic Concentrator", J. of the Optical Society of America, vol. 69, n° 4, 1979.
- [Win86] R. Winston, "Nonimaging Optics for Illumination, SPIE vol. 692, Materials and Optics for Solar Energy Conversion and Advanced Lighting Technology, 1986.
- [Win91a] R. Winston, W.T. Welford, "Les concentrateurs optiques", Pour la Science, n° 163, mai 1991.
- [Win91b] R. Winston, "Nonimaging Optics : Optical Design at the Thermodynamic Limit", Nonimaging Optics : Maximum Efficiency Light Transfer, Roland Winston, Robert L. Holman, Editors, Proc. SPIE 1528, 1991.

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 [Cd/m^2] et une luminance de référence L_0 [Cd/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 $E [\text{Lux}], E = \frac{d\phi}{dS}$

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

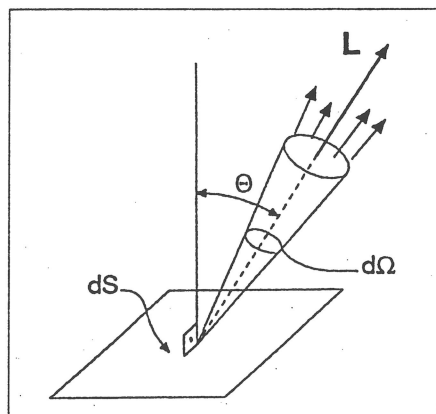
Efficacité lumineuse $\eta [-], \eta = \frac{\phi}{\phi_e}$

Quotient du flux lumineux ϕ [lm], caractéristique d'un rayonnement électromagnétique, par le flux d'énergie ϕ_e [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 [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/ 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 [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 : "Eléments d'éclairagisme", Manuel OFQC, Programme d'action RAVEL, Berne (1993)

ANNEXE B

EQUATIONS DE LA GEOMETRIE SOLAIRE

La position du soleil sur la voûte céleste est déterminée, en un lieu donné, par deux angles :

- l'azimuth a [rad], relatif au plan du méridien ($a < 0$ à l'est, $a > 0$ à l'ouest)
- la hauteur h [rad] sur l'horizon.

L'azimuth a , appelé aussi angle horaire, peut être calculé à l'aide de l'équation suivante, exprimant sa variation en fonction du temps :

$$a = \pi \cdot \frac{HSV - 12}{12} \quad [\text{rad}]$$

où HSV représente l'heure solaire vraie, liée à l'heure légale HL par la relation :

$$HSV = HL + \Delta H + 4 \cdot l - F \quad [\text{min}]$$

avec ΔH [min] équation du temps donnée par le diagramme ci-dessous;
 l [°] longitude du lieu ($l = 6.62^\circ$ pour Lausanne);
 F [min] décalage horaire par rapport au fuseau horaire de Greenwich ($F = +60$ min pour la Suisse, heure d'hiver).

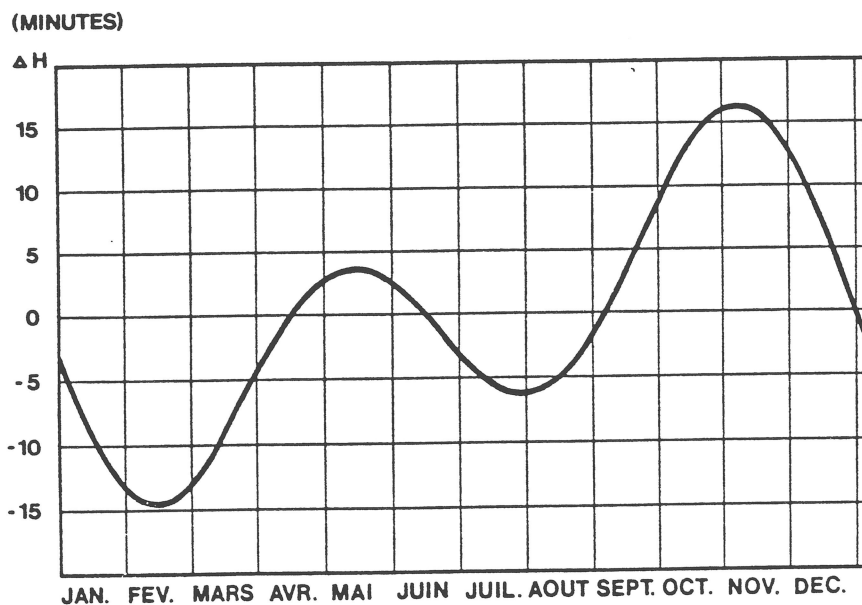


Figure B.1 : Diagramme de l'équation du temps.

ANNEXE C

CIELS DE REFERENCE

Les fonctions analytiques, caractérisant la distribution de luminance des "ciels de référence", font l'objet de publications de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE).

Ces fonctions décrivent les valeurs de luminance L_P [cd/m^2], en chaque point de la voûte céleste, normalisées par rapport à la valeur au zénith L_Z [cd/m^2]. Des coordonnées angulaires permettent de repérer le point P considéré; les symboles utilisés sont ceux préconisés par la CIE dans les publications respectives.

Ciel couvert uniforme

Le ciel couvert uniforme (ciel isotrope) est donné par l'équation :

$$L_P = L_Z \quad \forall P \in \text{hémisphère supérieure}$$

Ciel couvert CIE

Le modèle de ciel couvert CIE a été adopté en 1955. Il a été proposé par Moon et Spencer et obéit à l'équation suivante :

$$L_P(\theta) = L_Z \cdot \frac{1 + 2 \sin \theta}{3}$$

où θ est la hauteur du point P au-dessus de l'horizon.

Référence : Commission Internationale de l'Eclairage, "Daylight", Publication CIE N° 16 (E - 3.2), Paris (1970).

Ciel serein CIE

Le modèle de ciel serein CIE a été adopté en 1973. Il a été proposé par Kittler et nécessité, de par sa complexité, la définition d'un certain nombre de grandeurs angulaires, illustrées à la figure C.1 :

- ζ distance angulaire zénithale du point P
- α angle azimutal du point P
- z_0 distance angulaire zénithale du soleil
- γ distance angulaire séparant P du soleil

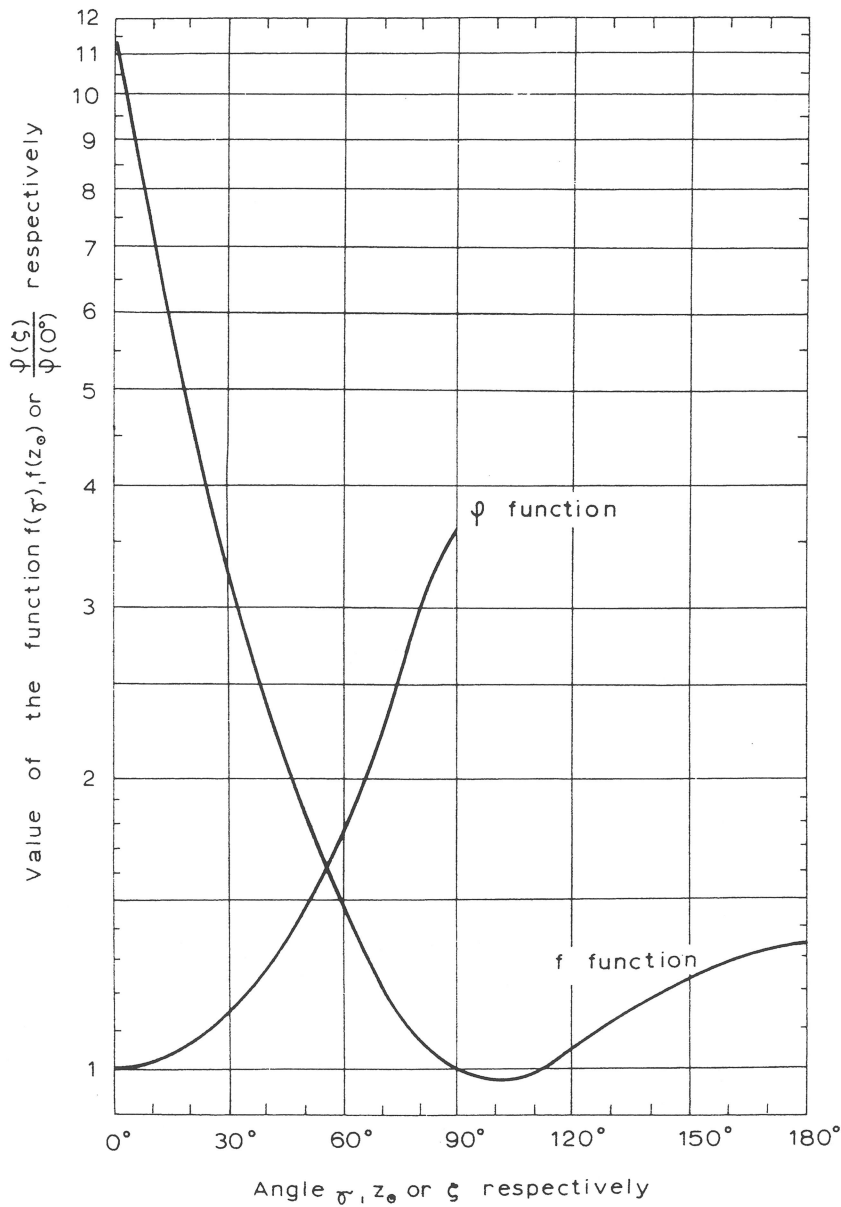


Figure C.2: Fonctions caractéristiques du modèle de ciel serein CIE (f (γ) : indicatrice de diffusion normalisée).

Une indicatrice de diffusion f'(γ) a été définie pour des conditions d'atmosphère polluée (villes, zones industrielles).

$$f'(\gamma) = 0.856 + 16 \cdot \exp(-3\gamma) + 0.3 \cdot \cos^2\gamma$$

Référence : Commission Internationale de l'Eclairage, "Standardization of luminance distribution on clear skies", Publication CIE N° 22 (TC - 4.2), Paris (1973).

REMERCIEMENTS

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

- l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), qui a assuré le financement des ressources humaines du projet;
- l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), qui a assuré le financement du matériel expérimental du projet;
- l'Université de Genève, qui conjointement à l'EPFL, a soutenu ce dernier;
- le Prof. A. Baer et le Dr. G. Schriber (OFEN), qui nous ont accordé leur confiance;
- M. R. Hastings (OFEN), qui a assuré le rôle du parrain;

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

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

ANNEXE D

ETUDES SUR SIMULATEURS

La table suivante donne la liste des principales études en éclairage naturel, réalisées à l'aide des simulateurs de lumière directe et diffuse.

D'autres travaux ont été menés par simulation numérique (progiciel ADELINÉ).

<i>Nature de l'étude</i>	<i>Objet</i>	<i>Lieu</i>
Etude des réflexions sur un plan vitré incliné	Bureau	Estavayer
Etude d'une ouverture zénithale	Rénovation	Bâle
Optimisation d'une cheminée de lumière	Rénovation	Genève
Etude d'un système de couverture à transparence	Université	Chypre
Optimisation de l'éclairage naturel latéral (dalle en biseau)	Bureau	Jura
Etude de divers systèmes prismatiques	Bureau	Allemagne
Optimisation de la position de stores à lamelles	Bureau	Neuchâtel
Optimisation des performances d'un bandeau lumineux	Bureau	Lausanne
Etude des performances d'un éclairage bilatéral	Ecole	Genève
Optimisation de l'éclairage latéral (isolation translucide)	Imprimerie	Winterthur
Etudes typologiques	Divers	Divers
