



**HAL**  
open science

# Maîtrise de l'éclairage naturel dans le projet architectural

Bernard Paule, Marc Fontoyont

► **To cite this version:**

Bernard Paule, Marc Fontoyont. Maîtrise de l'éclairage naturel dans le projet architectural. [Rapport de recherche] 536/88, Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports / Bureau de la recherche architecturale (BRA); Ecole nationale des travaux publics de l'Etat / Laboratoire Sciences de l'habitat (LASH); FORMEQUIP. 1988. hal-01904693

**HAL Id: hal-01904693**

**<https://hal.science/hal-01904693v1>**

Submitted on 25 Oct 2018

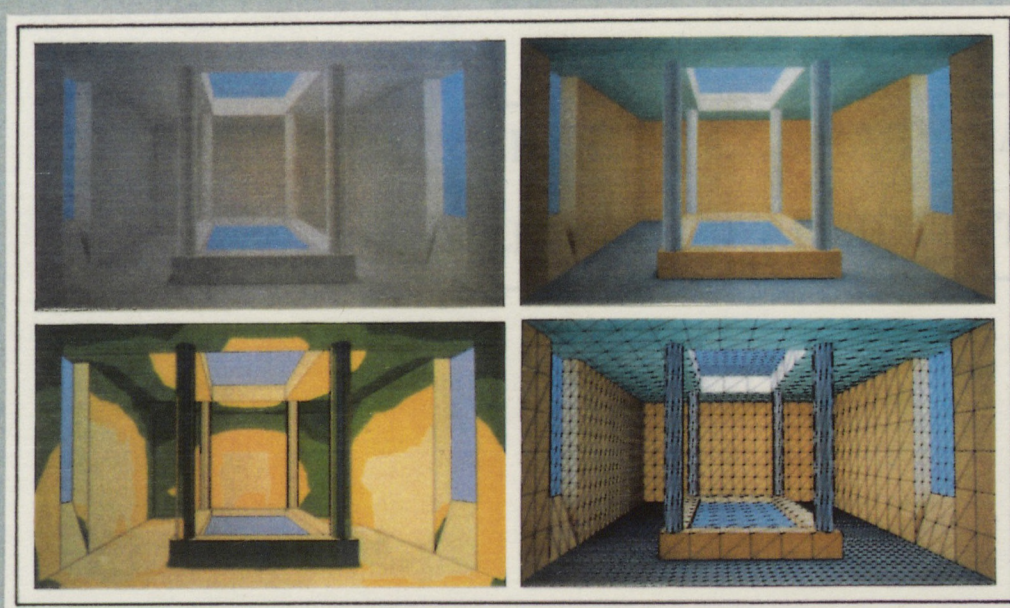
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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



536

# MAITRISE DE L'ECLAIRAGE NATUREL DANS LE PROJET ARCHITECTURAL



Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Bernard PAULE  
Marc FONTOYNONT





LASH / E.N.T.P.E.

Bernard PAULE  
Marc FONTOYNONT

---

**MAITRISE DE L'ECLAIRAGE NATUREL**  
**DANS LE PROJET ARCHITECTURAL**

---

AVRIL 1988

**RAPPORT FINAL**

rendant compte de travaux financés par le  
Ministère de l'Équipement et du Logement.

CONVENTION N° 87 01276 00 223 75 01

Ministère de l'Équipement, du Logement,  
Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme,  
Sous-Direction de l'Enseignement de l'Architecture  
et de la Recherche.  
Bureau de la Recherche Architecturale.

Contractant: FORMEQUIP, Association loi 1901,  
Ecole Nationale des T.P.E.  
Rue Maurice Audin,  
69120, Vaulx en Velin.

Exécutant: Laboratoire Sciences de l'Habitat,  
Ecole Nationale des T.P.E.  
Rue Maurice Audin,  
69120, Vaulx en Velin.

## Résumé.

Après une revue d'éléments qui justifient l'intérêt de l'éclairage naturel à la fois sur le plan qualitatif et quantitatif, divers moyens permettant de caractériser les modes de pénétration de la lumière dans un bâtiment sont présentés. Suit alors une critique d'outils destinés à permettre aux architectes de prédire les performances lumineuses de leurs projets: méthodes graphiques, maquettes ou simulations par ordinateur.

Une fois ces bases établies, nous présentons une évolution dans les solutions architecturales, susceptibles de répondre le mieux possible aux exigences lumineuses. La partie la plus innovante concerne la gestion de la lumière solaire, ainsi que la recherche d'une pénétration de la lumière naturelle le plus en profondeur à l'intérieur d'un bâtiment.

Une revue générale de matériaux est ensuite exposée, étant donné que les performances des systèmes d'éclairage naturel apparaissent comme étroitement liées aux surfaces des matériaux utilisés. La clarté, la couleur, la brillance, voire la spécularité de ces surfaces sont autant de caractéristiques qu'il importe de sélectionner avec soin. Cette revue se termine par une critique de nouveaux composants arrivant sur le marché: ceux-ci devraient permettre d'apporter des solutions simples à des problèmes lumineux complexes.

En conclusion, ce rapport fait état de la nécessité d'aborder les problèmes de qualité d'ambiances lumineuses avec davantage de rigueur, rigueur qui s'appuie sur une observation pertinente des phénomènes lumineux, et le cas échéant, sur leur évaluation par des outils appropriés.



SOMMAIRE

AVANT PROPOS	1	4.2- LES SYSTEMES D'OUVERTURE EN TOITURE	17
INTRODUCTION	2	4.2.1- LES SYSTEMES COURANTS D'OUVERTURE EN TOITURE	17
-I- LES ATTRAITES DES TECHNIQUES D'ECLAIRAGE NATUREL	3	4.2.2- EXEMPLE DE SHED PRENANT EN COMPTE LES PENETRATIONS SOLAIRES	19
1.1- ASPECTS QUALITATIFS	3	4.2.3- LES PATIOS	20
1.2- ASPECTS ENERGETIQUES	4	4.2.4- LES CHEMINEES DE LUMIERE	21
1.2.1- ASPECTS THERMIQUES	4	-V- CHOIX DES MATERIAUX	23
1.2.2- ASPECTS LUMINEUX	4	5.1- REFLECHIR LA LUMIERE	23
-II- CARACTERISATION DE L'ECLAIRAGE DES ESPACES SOUMIS AUX PENETRATION DE LUMIERE NATURELLE	6	5.1.1- LE FACTEUR DE REFLEXION	23
2.1- PERFORMANCES PAR CIEL COUVERT	6	5.1.2- LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE	23
2.2- CARACTERISATION DES AMBIANCES LUMINEUSES	7	5.1.3- INFLUENCE DE LA PHOTOMETRIE DES PAROIS D'UN LOCAL QUELCONQUE SUR LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE DANS CE LOCAL	28
2.3- CARACTERISATION DE LA VARIATION DES AMBIANCES LUMINEUSES	7	5.1.4- LES MATERIAUX REFLECHISSANTS	30
-III- LES OUTILS DE DECISION	8	5.2- TRANSMETTRE LA LUMIERE	32
3.1- INSTRUMENTS DE MESURE / LUXMETRES	8	5.2.1- LE FACTEUR DE TRANSMISSION	32
3.2- ABAQUES PERMETTANT L'EVALUATION DU FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR	8	5.2.2- LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE TRANSMISE	32
3.3- CONSTRUCTION DE MAQUETTE	9	5.2.3- INFLUENCE DE LA PHOTOMETRIE DU VITRAGE SUR LA REPARTITION ET LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE DANS UN VOLUME QUELCONQUE	33
3.4- LES SIMULATEURS SOLAIRES	11	5.3- LES NOUVEAUX MATERIAUX	34
3.5- LA SIMULATION INFORMATIQUE	13	5.3.1- LES CONCENTRATEURS FLUORESCENTS	34
-IV- SYSTEMES D'ECLAIRAGE NATUREL	14	5.3.2- LES MATERIAUX PRISMATIQUES	35
4.1- LES SYSTEMES D'OUVERTURES EN FACADE	15	5.3.3- LES FILMS HOLOGRAPHIQUES	36
4.1.1- LES BANDEAUX LUMINEUX	15	-VI- CONCLUSION	37
4.1.2- LES SYSTEMES A LAMELLES	16	BIBLIOGRAPHIE	38
4.1.3- AUTRES SYSTEMES D'OUVERTURES EN FACADE	16	REFERENCES MATERIAUX	38



## AVANT PROPOS

Ce document n'a pas pour objectif de faire état de réalisations exemplaires en matière d'éclairage naturel, car la qualité de l'éclairage est un aspect de la qualité de l'architecture, et toute critique sur le sujet doit être formulée avec prudence.

Cependant, si l'on se place dans la problématique du projet architectural, et en particulier très tôt dans le processus de décision, on se rend compte que les architectes sont fort démunis quant aux méthodes de prévision des ambiances lumineuses qu'ils vont volontairement - ou involontairement - générer.

Sur le plan de l'éclairage naturel, la qualité des ambiances dépendra des choix avancés en matière de forme, de taille et d'emplacement d'ouvertures, mais aussi des matériaux choisis pour les ouvrants comme pour l'aménagement intérieur.

A une époque où les occupants, et par voie de conséquence, les maîtres d'ouvrages deviennent de plus en plus exigeants sur la qualité des bâtiments sur le plan de l'agrément, les préoccupations concernant la qualité de la lumière occupent une place de choix.

Ce document aura atteint son objectif si le lecteur comprend que derrière le discours de la qualité des ambiances lumineuses il existe des lois physiques, bien définies, qui pilotent les divers modes de pénétration de la lumière naturelle dans un bâtiment. Pour approcher ces lois, des outils sont disponibles, les plus attrayants consistant aux études sur maquettes et aux simulations à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur de haute qualité graphique.

De tels outils sont régulièrement utilisés dans le cadre de projets réels et comme support d'enseignement au Laboratoire Sciences de l'Habitat, sur le campus de l'Ecole Nationale des T.P.E et de l'Ecole d'Architecture de Lyon.

Les systèmes et solutions qui sont présentés dans ce document ne doivent pas être assimilés à des modèles du genre. Ils représentent des voies à explorer, tester et améliorer. Chaque projet architectural doit pouvoir trouver son expression propre sur le plan de la lumière.



Bernard PAULE  
diplômé de l'Ecole d'Architecture de Lyon



Marc FONTOYNONT  
Docteur en Energétique



## INTRODUCTION:

L'avènement de l'électricité, ainsi que l'élargissement de sa diffusion à tout un chacun, a été en son temps le moteur de formidables changements, dont nous n'avons d'ailleurs peut-être pas encore fini de mesurer toutes les conséquences.

En ce qui concerne l'art de bâtir, la possibilité de faire appel, en toute sécurité, à une source artificielle de lumière, a contribué à libérer l'architecte d'un certain nombre de contraintes autrefois incontournables, dans le domaine du confort visuel: disponibilité des sources, souplesse dans la maîtrise des niveaux d'éclairage, sécurité, etc...

Ceci a permis d'accéder à une finesse dans le contrôle et la modulation des ambiances lumineuses jusque là inabordable.

C'est alors un profond bouleversement qui s'est opéré dans la façon de concevoir et d'organiser les espaces: réduction de la taille des ouvertures (hauteur), possibilité d'augmentation de la profondeur des bâtiments, utilisation de vitrages teintés ou réfléchissants (afin de réduire l'inconfort lié à l'éblouissement), multiplication des volumes complètement aveugles (stationnement, espaces de circulation, ...), etc...

Au bout de ce processus, on en est arrivé à observer le développement de la démarche suivante, qui consiste à prévoir le dimensionnement de l'installation électrique des espaces conçus, de façon à pouvoir se passer de tout apport de lumière naturelle.

A l'extrême, ce phénomène s'est parfois doublé d'un "désinvestissement" de l'architecte vis à vis du poste éclairage, celui-ci étant souvent confié à un spécialiste qui le traite en totale déconnexion de la phase de conception.

Cette façon d'aborder le problème soulève cependant un certain nombre de questions: coûts de fonctionnement et d'entretien, coûts énergétiques, problèmes de sécurité en cas de pannes de courant, etc... D'autre part, s'il est indéniable que l'éclairage artificiel offre un certain nombre de garanties en ce qui concerne les quantités de lumière disponible dans un local, celui-ci présente de réelles limites quant à la qualité des ambiances lumineuses qu'il procure.

Nous allons voir dans la suite de ce travail, comment il nous est possible d'affirmer que l'utilisation des techniques d'éclairage naturel peut et doit être envisagée de façon à inscrire la démarche conceptuelle de l'architecte dans une logique d'amélioration de la qualité des ambiances lumineuses telles que celles-ci peuvent être perçues par les utilisateurs. L'impact peut s'avérer gigantesque pour l'amélioration de la qualité des locaux du secteur tertiaire, comme de notre environnement urbain.

Nous verrons dans les pages qui vont suivre, que le contrôle et la gestion de la lumière naturelle passent par l'emploi de techniques et d'outils de conception spécifiques, dont certains sont d'ores et déjà disponibles et méritent d'être connus de la profession.

**-I- LES ATTRAITS DES TECHNIQUES D'ECLAIRAGE  
NATUREL:**

**1.1- ASPECTS QUALITATIFS:**

La lumière naturelle est tout d'abord la source lumineuse de référence à laquelle notre oeil s'est lentement adapté au cours de sa croissance. De nombreuses études ont à ce sujet montré que cette source de rayonnement était indispensable au développement de l'enfant et à l'équilibre physique et psychologique de l'homme. En effet, au delà de sa faculté de pouvoir éclairer des locaux, la lumière naturelle est susceptible de fournir un certain nombre d'informations qualitatives. Par ailleurs, la conjonction d'une température de couleur élevée (6000 à 20000 °K), et d'un spectre continu dans le domaine visible, permet à la lumière naturelle de procurer un rendu des couleurs actuellement inégalable par le biais de l'éclairage artificiel.

**-Besoins Qualitatifs:**

En fait, le niveau d'éclairement n'est pas le seul critère de confort visuel: l'homogénéité de la lumière, sa direction, la propension qu'elle a de créer des ombres portées, ou des contrastes, etc..., sont autant de facteurs qu'il convient de prendre en compte afin de bien maîtriser les ambiances lumineuses d'un local.

"Il est généralement reconnu qu'à l'intérieur d'un bâtiment la lumière du jour est un facteur important de la qualité de la vie, et qu'elle satisfait nos tendances sociales par le lien qu'elle nous assure avec le monde extérieur. Ainsi la pénétration de la lumière du jour fait participer l'occupant d'un bâtiment aux événements météorologiques extérieurs, aux variations du niveau d'éclairement (parfois plusieurs centaines de lux par minutes), à ses changements de coloration." (\*)

"Ainsi donc, à la satisfaction de notre tendance sociale s'ajoute l'effet stimulant de la dynamique naturelle (la lumière électrique "animée" étant une tentative de recréer cette variation horaire et saisonnière de la lumière du jour)." (\*)

"De plus, lorsque, dans le parti architectural, la lumière du jour participe à l'éclairage des locaux elle permet, selon la manière dont elle pénètre, de mettre un espace en valeur, de créer un dégradé lumineux ou une focalisation visuelle, d'assurer une sensation d'intimité ou au contraire d'ouvrir largement le local vers l'extérieur, et satisfait ainsi d'autres aspirations esthétiques, physiologiques et psychologiques." (\*)

"Par ailleurs, la variation de composition spectrale de la lumière du jour et, par suite, sa coloration, peut permettre par une combinaison colorée des surfaces intérieures du local, d'accentuer ou de diminuer l'impression de chaleur ou de profondeur de celui-ci." (\*)

"De manière statistique, on peut rappeler que pour les latitudes tempérées, la lumière venant du nord est ressentie comme froide et uniforme, celle du sud chaude et variable. Les teintes en provenance de l'est et de l'ouest étant à prédominance respectivement verte et rouge. Ces données générales de coloration varient évidemment en fonction des données météorologiques, de l'état du ciel, de l'heure et de la saison." (\*)

(\*) in La Lumière du Jour dans les Espaces Intérieurs: Guide pour le Projet d'Eclairage Naturel, rédigé par l'Association Française pour l'Eclairage, novembre 1983, ed. LUX, Paris.



## 1.2- ASPECTS ENERGETIQUES:

### 1.2.1- ASPECTS THERMIQUES:

Sur le plan thermique, disons pour simplifier, qu'à tout rayonnement lumineux est associé un flux énergétique qui contribuera au confort (ou à l'inconfort), des occupants. Pour mesurer l'intérêt que peuvent revêtir les techniques d'éclairage naturel, il faut en fait comparer, à niveau d'éclairage résultant égal, les apports thermiques suivant le mode d'éclairage (électrique ou naturel). Une première approche consiste à comparer les flux lumineux (lumens) associés aux flux énergétiques (watts), par le biais de l'efficacité lumineuse (lm/W). Voici quelques ordres de grandeur.

Rayonnement diffus : 110 à 140 lm/W suivant le type de ciel.

Rayonnement solaire: 60 à 100 lm/W suivant la hauteur du soleil sur l'horizon.

Lampe fluorescente : 60 à 70 lm/W y compris la puissance dissipée dans les ballasts.

On voit bien que la lumière naturelle possède une efficacité lumineuse plus élevée que la lumière d'origine électrique. Ceci signifie qu'à éclairage résultant identique, celle-ci a tendance à fournir moins de chaleur. Cette comparaison peut cependant être modifiée lors de l'emploi de vitrages teintés ou si une grande partie des apports thermiques des lampes est évacuée par une ventilation adaptée

Conséquences: si l'on substitue la lumière naturelle à la lumière artificielle, on peut espérer réduire les besoins en climatisation. Lorsque la lumière naturelle arrivera en excès par rapport aux besoins, le flux associé pourra contribuer à réduire les consommations de chauffage, mais il faudra alors se prémunir des risques de surchauffe (en été), de façon à ne pas augmenter les frais de climatisation pendant cette période.

## 1.2.2- ASPECTS LUMINEUX:

### A) Quantités disponibles:

Le rayonnement naturel dont nous pouvons disposer, qu'il provienne du ciel seul ou du soleil, possède une puissance très importante. A titre d'exemple, en région Parisienne, l'éclairage horizontal extérieur dépasse 10000 lux pendant près de 70% du temps entre le lever et le coucher du soleil. Lorsque l'on sait qu'un éclairage interne compris entre 300 et 600 lux est suffisant pour permettre le bon déroulement de la quasi-totalité des activités de caractère tertiaire, on imagine aisément le profit que l'on pourrait tirer d'une utilisation rationnelle de cette source "gratuite" de lumière. L'enjeu consiste donc à réaliser des bâtiments ou le rapport entre les éclairages internes utiles et les éclairages extérieurs simultanés par ciel couvert soient au moins de l'ordre de 3 à 6% sur la plus grande partie du bâtiment. Ce rapport sert de base aux calculs d'éclairage naturel, on l'appelle Facteur de Lumière du Jour (voir 2.1).

### B) Besoins Quantitatifs:

Du point de vue de ses capacités d'adaptation, l'oeil humain est un instrument dont les possibilités sont formidablement étendues. A titre d'exemple, on peut citer le fait que le soleil délivre par ciel serein, des éclairages de l'ordre de 100 000 lux, et qu'à l'autre extrême, on observe par une nuit de pleine lune un niveau d'éclairage proche de 1 lux. Dans les deux cas, un homme dont les facultés visuelles sont considérées comme normales, est parfaitement capable de distinguer son environnement, et de s'y diriger sans problèmes majeurs. Pour des activités plus complexes que celle qui consiste à se déplacer, la fourchette est bien entendu plus réduite.

Ainsi que nous l'avons vu précédemment, un éclairage intérieur compris entre 300 et 600 lux est considéré comme suffisant pour procurer un niveau de confort acceptable pour la majorité des activités tertiaires. A titre indicatif, la C.I.E. recommande un niveau d'éclairage de 400 lux sur le plan utile de travail dans les locaux scolaires, ainsi qu'un éclairage minimum de 500 lux sur le tableau de ces mêmes locaux.

En conclusion de cette première partie, nous identifierons trois axes prioritaires autour desquels devra s'articuler toute démarche visant à prendre en compte la lumière naturelle dans le projet architectural.

-En premier lieu, il est nécessaire de caractériser les espaces en fonction de la pénétration de la lumière naturelle naturelle par ciel couvert, (cas que l'on considère généralement comme le plus défavorable). L'enjeu consiste à garantir des niveaux d'éclairement sur le plan utile de travail, et l'on doit pour ceci déterminer les Facteurs de Lumière du Jour aux points considérés.

-En second lieu, il est primordial de se donner les moyens de visualiser les ambiances lumineuses internes, ceci afin de pouvoir analyser de façon qualitative la répartition de la lumière, (contrastes, luminances, directionnalité de la lumière, zones d'ombre, etc...).

-Enfin, il est indispensable de pouvoir tester la variation de ces ambiances suivant l'heure de la journée, la saison, et les conditions climatiques.



**-II- CARACTERISATION DE L'ECLAIRAGE DES ESPACES  
SOUIS AUX PENETRATIONS DE LUMIERE NATURELLE:**

**2.1- "PERFORMANCES" PAR CIEL COUVERT:**

**-Le Facteur de Lumière du Jour:**

On sait qu'il y a quasi-proportionnalité entre l'éclairage relevé en un point donné situé à l'intérieur d'un volume, et l'éclairage simultané observé à l'extérieur de ce volume, sur un plan horizontal (le soleil étant caché).

Il est donc possible de caractériser les performances d'un espace du point de vue de la pénétration de la lumière naturelle. Pour ceci, on utilise le rapport entre la lumière disponible à l'extérieur du local en question, et la quantité de lumière qui a effectivement pénétré à l'intérieur de celui-ci.

Ce rapport est appelé **FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR (FJ)**  
(cf. figure 1)

Une fois connus les facteurs  $FJ(P)$ , aux points  $P$  d'un local, on peut en déduire les éclairagements internes en ces points, selon le niveau d'éclairage extérieur.

A l'inverse, les besoins lumineux prévisibles d'un espace peuvent nous conduire à concevoir celui-ci (notamment ses ouvertures), de façon à garantir un certain niveau de facteur de lumière du jour.

Pour reprendre l'exemple que nous avons cité précédemment, si l'on se trouve en région Parisienne, et que l'on désire obtenir un éclairage de 400 lux pendant 70% de la journée, en un point précis d'un local, il faudra qu'en ce point, le  $F(J)$  soit égal à 4% (l'éclairage horizontal extérieur considéré étant de 10 000 lux dans ce cas).

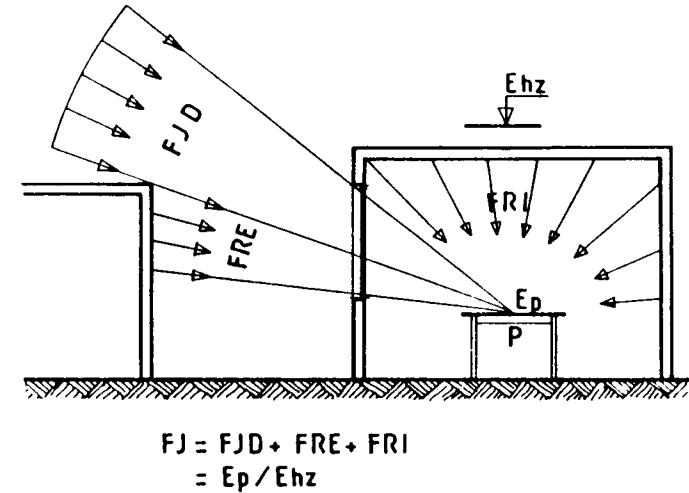


FIGURE 1

FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR  
FJD - Composante Directe  
FRE - Composante Réfléchie Externe  
FRI - Composante Réfléchie Interne  
Ehz - Eclairage Horizontal Extérieur

## 2.2- CARACTERISATION DES AMBIANCES LUMINEUSES:

La meilleure façon d'aborder les ambiances lumineuses d'un local, consiste à visualiser directement les pénétrations de lumière à l'intérieur de celui-ci. Rien ne peut en effet remplacer les formidables capacités d'analyse de l'oeil humain.

Pour ceci, nous verrons plus loin quels sont les outils susceptibles de fournir le maximum d'information visuelles (maquettes, photographies, images vidéo, simulations graphique par l'intermédiaire de la C.A.O., etc...).

A titre indicatif, Le Tableau 1 (\*), (d'après une recommandation suisse sur les locaux scolaires (063)), donne, par comparaison entre l'éclairage dans un local et celui de l'extérieur, la variation des impressions visuelles de clarté et d'ambiance.

## 2.3- CARACTERISATION DE LA VARIATION DES AMBIANCES LUMINEUSES:

Les problèmes soulevés par l'aspect dynamique de la lumière naturelle concernent en tout premier lieu la maîtrise des pénétrations solaires. La gestion de la position du soleil en fonction de l'heure de la journée et de la saison, revêt une complexité nécessitant l'emploi d'outils adaptés.

Les abaques des hauteurs solaires autorisent une première approche de la question, en permettant de connaître avec une bonne précision la hauteur et l'azimut du soleil suivant la période considérée. Il est néanmoins difficile de prévoir l'impact des pénétrations solaires sur les ambiances lumineuses internes grâce aux seules abaques, celles-ci nous donnant somme toute que des renseignements relativement abstraits.

Nous verrons dans les pages qui suivent qu'il existe un outil permettant de prendre en compte de façon extrêmement fine les pénétrations solaires, et ce, avec une lecture "directe" des ambiances lumineuses internes (voir 3.4-Simulateurs Solaires, Héliodon).

Tableau 1: Variation des impressions visuelles de clarté et d'ambiance en fonction du Facteur de Lumière du Jour

Facteur de Lumière du Jour sur un plan horizontal	en %	sous 1 %	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	plus de 12 %
			très faible	faible	modéré	moyen	élevé
zone intéressée	Dans la zone éloignée des fenêtres distance env. 3 à 4 fois la hauteur des fenêtres			à proximité des fenêtres ou sous des lanternaux			
impression de clarté	sombre à peu éclairé		peu éclairé à clair		clair à très clair		
impression visuelle du local	cette zone		semble être séparée		de cette zone		
Ambiance	le local semble être séparé de l'extérieur (chambre, foyer)			le local s'ouvre vers l'extérieur (local de travail)			

(\*)in La Lumière du Jour dans les Espaces Intérieurs, Guide pour le Projet d'Eclairage Naturel rédigé par l'Association Française de l'Energie, novembre 1983, ed. LUX Paris.



-III- LES OUTILS DE DECISION:

3.1- INSTRUMENTS DE MESURE / LUXMETRES:

Il existe un grand nombre d'instruments de mesure des éclairage (lux-mètres), permettant d'établir avec précision les Facteurs de Lumière du Jour d'un volume quelconque.

G. LOHR, professeur à l'Ecole d'Architecture d'Aix la Chapelle, en a décrit pour sa part plus d'une cinquantaine, en les classant selon leurs coûts, leurs performances (gamme de sensibilité), et leur aspect pratique.

On remarque que la tendance actuelle est à l'abaissement du prix de ce type de matériel: à titre d'exemple, on peut aujourd'hui se procurer un luxmètre d'une précision acceptable pour un coût voisin de deux mille francs, ce qui paraît tout à fait raisonnable en regard de l'utilité d'un tel outil.

En dépit de cette relative accessibilité, il nous a paru intéressant de citer d'autres moyens permettant d'évaluer le Facteur de Lumière du Jour dans un bâtiment.

3.2- ABAQUES PERMETTANT L'EVALUATION DU F.J.:

Certains organismes comme la C.I.E. (1) ou l'A.F.E. (2), ont développé des méthodes permettant, à l'aide d'abaques, de prévoir le F(J) d'un local, en fonction des caractéristiques de son ouverture (dimensions, forme, position en hauteur, etc...), et de l'éloignement par rapport à cette ouverture.

(cf. figure 2 )

Si ces méthodes s'avèrent pratiques et efficaces dans le cas de locaux de forme simple, (baies rectangulaires ou carrées, pièces parallélépipédiques), elles sont en revanche très rapidement inefficaces dès que l'on a affaire à des géométries plus complexes. Il est alors nécessaire d'avoir recours à d'autres moyens afin de cerner les répartitions lumineuses.

(1) Commission Internationale de l'Eclairage.

(2) Agence Française pour l'Eclairage.

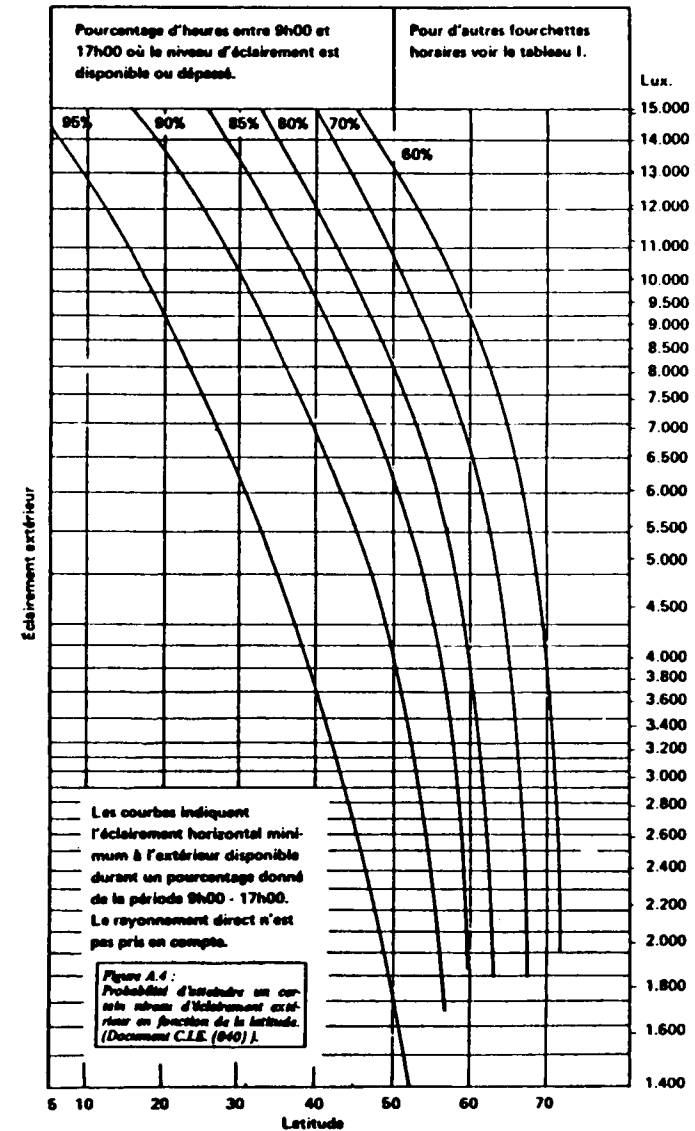


FIGURE 2

Abaque universel établi pour les climats tempérés.

### 3.3- CONSTRUCTION DE MAQUETTES:

Avant toute chose, il convient de préciser que les mécanismes d'inter-réflexion de la lumière ne sont pas sensibles aux phénomènes d'échelle. Cela signifie que l'on peut parfaitement connaître la distribution de la lumière dans un local en construisant une maquette de celui-ci. Le seul véritable problème consiste à reproduire la source de lumière (position, direction, intensité)

Le principal avantage de la construction de maquettes est la visualisation de la répartition des éclairagements en trois dimensions. Cette méthode nous donne aussi le moyen de "prévoir" la présence de taches solaires sur les différents plans du local testé, nous réservant ainsi la possibilité de prévenir les éventuels éblouissements pouvant en résulter. Pour toutes ces raisons, la construction de maquettes constitue un outil de grande valeur quant à la maîtrise des phénomènes lumineux dans un volume quelconque.

#### METHODE ET PRECAUTIONS:

Avant de construire la maquette d'un local que l'on veut tester d'un point de vue lumineux, il convient de soulever certains problèmes dont les répercussions sont loin d'être négligeables.

##### A) Echelle de la Maquette:

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, les inter-réflexions lumineuses sont tout à fait reproductibles sur une maquette puisqu'elles ne sont pas sensibles à la variation des échelles.

Ce qui va en fait déterminer la taille de la maquette va être la possibilité de visualiser les ambiances lumineuses.

S'il s'agissait juste de permettre le regard à l'intérieur, La maquette pourrait être de dimension très réduite, du fait des grandes capacités d'adaptation de l'oeil.

En fait, l'utilisation d'appareils photographiques ou même de caméra vidéo demandent des maquettes de taille supérieure afin de rendre possible la mise au point de l'objectif sur l'une au moins des parois du local.

En règle générale, les objectifs d'appareils photographiques les plus adaptés à ce type de manipulation sont les objectifs "grands angles" (< 28mm.). Ils permettent d'une part d'obtenir une image nette à une distance très proche, et d'autre part de prendre en compte une grande partie de la pièce, du fait de leur angle de vision très large.

La taille minimum des maquettes devra donc tenir compte de l'utilisation de ce type d'objectif. Ceci nous conduit à prévoir des hauteurs sous plafond minimales, voisines des 10 centimètres, et des profondeurs de pièces n'étant pas inférieures à 30 / 35 centimètres.

##### B) Possibilités d'Evolution:

Ces maquettes doivent pouvoir être modifiées de façon très aisées. Il est en effet fréquent que l'on soit amené à agrandir les ouvertures, à les repositionner, à modifier leur géométrie, ...etc. Il faudra donc privilégier les moyens de fixation non définitifs des différents éléments (épingles, ...), au détriment de l'emploi de colles, qui elles, ne permettent pas de faire des modifications sans détérioration.

##### C) Choix des Matériaux:

Ainsi que cela est exposé plus loin, il est très important de tenir compte de la photométrie des matériaux que l'on emploie pour réaliser ce type de maquette. Il est en effet impératif pour les surfaces internes du local (murs, plafond et plancher), d'utiliser des matériaux (papiers, cartons, etc...), dont les facteurs de réflexion soient le plus proche possible des matériaux devant être mis en oeuvre dans la réalité (bétons, plâtres, papiers peints, revêtements divers, etc...).

A ce sujet, nous avons établi les facteurs de réflexion correspondant à la gamme des papiers "mi-teinte" commercialisée par CANSON, ceci afin de fournir des éléments de comparaison et des points de repère accessibles facilement. (Voir plus loin)



D) Quantification:

L'utilisation de maquettes permet non seulement d'approcher de manière assez fine l'aspect qualitatif des ambiances d'un volume quelconque, mais elle autorise aussi une quantification des performances de ce volume vis à vis de la lumière naturelle. L'emploi de lux-mètres nous donne en effet la possibilité d'établir les Facteurs de Lumière du Jour du local testé de la même manière que dans la réalité.

Dans le cas général, on positionne un de ces lux-mètres à l'extérieur de la maquette, sur un plan horizontal, afin qu'il puisse servir de référence. Les autres lux-mètres sont placés à l'intérieur de la maquette, aux endroits dont on désire plus particulièrement connaître les niveaux d'éclairage. Il suffit ensuite de faire le rapport entre les résultats obtenus à l'intérieur, et ceux obtenus à l'extérieur de la maquette, pour connaître les Facteurs de Lumière du Jour correspondants aux points testés.

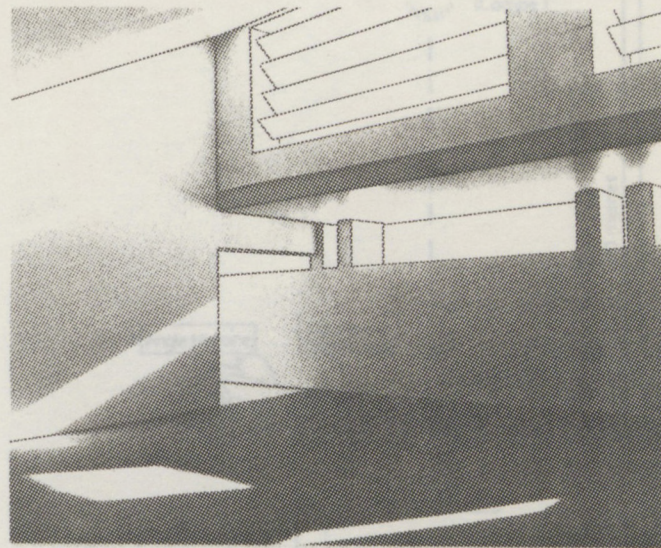
"... permettant la sélection des trois angles fondamentaux qui sont la latitude, la déclinaison solaire, et l'angle horaire. Une possibilité de rotation dans le plan terrestre simulé permet de faire varier l'azimut de la maquette du bâtiment." (\*)

"Deux moteurs électriques à courant continu permettent de faire varier à vitesse constante les angles des heures et des déclinaisons. Outre les avantages sur le plan des manipulations, la rotation continue de l'angle horaire permet, en filmant l'intérieur des maquettes, de suivre en accéléré les fluctuations de la pénétration des rayons de soleil dans un local, au cours de journées types. Cette technique s'est avérée être une phase particulièrement déterminante dans la conception d'ouvertures destinées à utiliser au mieux le rayonnement solaire." (\*)

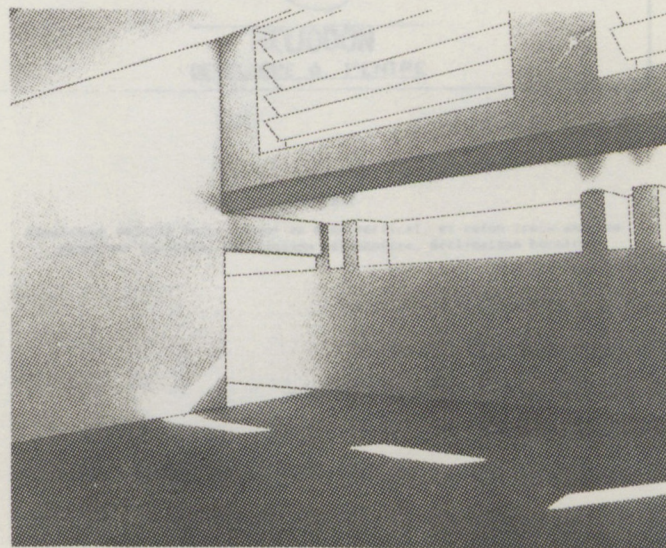
"Sur le plan qualitatif, la détermination des facteurs solaires s'obtient en mesurant simultanément à l'aide de cellules les éclairagements en des points spécifiques à l'intérieur, ainsi que sur le plan horizontal relatif à l'extérieur". (\*)

(\*) in "Travaux en Compte du Rayonnement Solaire dans l'Eclairage Naturel de Locaux: Méthode et Perspectives" Marc FONDATIONIST, S.N.T.P.L.

VUES PHOTOGRAPHIQUES DE L'INTERIEUR D'UNE MAQUETTE  
(Ecole primaire à Collioures)  
(Architectes SCP GERBER - POUS, Etude LASH / ENTPE)



21 DECEMBRE



21 MAI



### 3.4- LES SIMULATEURS SOLAIRES:

Parmi les outils permettant de gérer la lumière naturelle dans le projet architectural, on peut citer, au tout premier plan, les simulateurs solaires pour maquettes, ou HELIODON. L'intérêt de ces appareils est qu'ils permettent de reconstituer les déplacements du soleil dans le ciel, et ce, quelque soit l'heure, le jour de l'année, ou la latitude du lieu considéré. On a ainsi la possibilité de prendre en compte l'aspect dynamique de la lumière naturelle provenant du soleil.

Divers systèmes de simulateurs solaires ont été mis au point à travers le monde. Pour sa part, le Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, a développé, sous l'égide de M. FONTOYNONT, un Héliodon fonctionnant en mode vertical dont nous pouvons observer le principe sur la figure 3.

"Il possède trois axes permettant la sélection des trois angles fondamentaux que sont la latitude, la déclinaison solaire, et l'angle horaire. Une possibilité de rotation dans le plan terrestre simulé permet de faire varier l'azimuth de la maquette du bâtiment." (\*)

"Deux moteurs électriques à courant continu permettent de faire varier à vitesse constante les angles des heures et des déclinaisons. Outre les avantages sur le plan des manipulations, la rotation continue de l'angle horaire permet, en filmant l'intérieur des maquettes, de suivre en accéléré les fluctuations de la pénétration des rayons de soleil dans un local, au cours de journées types. Cette technique s'est avérée être une phase particulièrement déterminante dans la conception d'ouvertures destinées à utiliser au mieux le rayonnement solaire." (\*)

"Sur le plan qualitatif, la détermination des facteurs solaires s'obtient en mesurant simultanément à l'aide de cellules les éclairagements en des points spécifiques à l'intérieur, ainsi que sur le plan horizontal relatif à l'extérieur". (\*)

(\*) in "Prise en Compte du Rayonnement Solaire dans l'Eclairage Naturel de Locaux: Méthode et Perspectives" Marc FONTOYNONT, E.N.T.P.E.

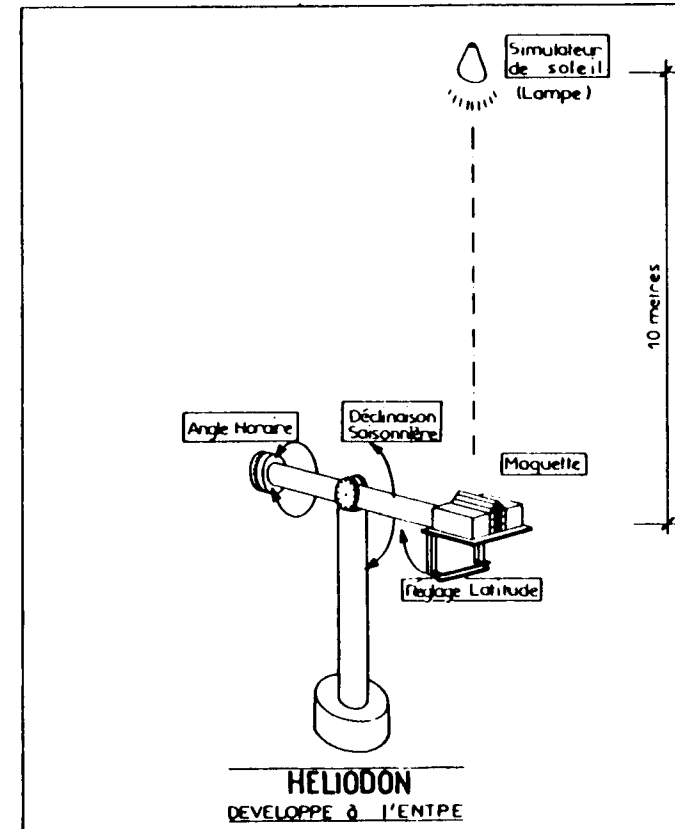


FIGURE 3

Simulateur solaire fonctionnant en mode vertical, et selon trois axes de rotation: latitude, déclinaison saisonnière, déclinaison horaire.



### "L'Héliodon à Domicile":

Le recours au type de matériel dont nous venons de parler suppose une infrastructure très coûteuse et développée, ce qui ne plaide pas en faveur de son accessibilité. Il est cependant possible, avec des moyens plus limités, de constituer un héliodon qui conviendrait mieux à la pratique de l'architecte. La figure 4 nous montre que l'on peut par exemple disposer une maquette sur un plan inclinable qui comporterait une sorte de cadran solaire permettant de repérer le jour et l'heure de l'année.

Pour constituer ce cadran solaire, il suffit de prendre une abaque des hauteurs solaires correspondant à la latitude souhaitée (\*), et de lui adjoindre en son centre une tige métallique perpendiculaire de hauteur donnée. En inclinant ensuite le plan, puis en le faisant tourner, on peut alors lire sur l'abaque l'heure solaire affichée par l'ombre de la tige métallique (cf. figure 5 )

(Il est recommandé à cet effet de se placer à l'extérieur, et de se servir du soleil comme source de lumière, afin de bénéficier d'un flux lumineux parallèle).

(\*) L'E.N.T.P.E. a pour sa part développé un logiciel permettant d'obtenir ce type d'abaques, selon la latitude du lieu considéré.

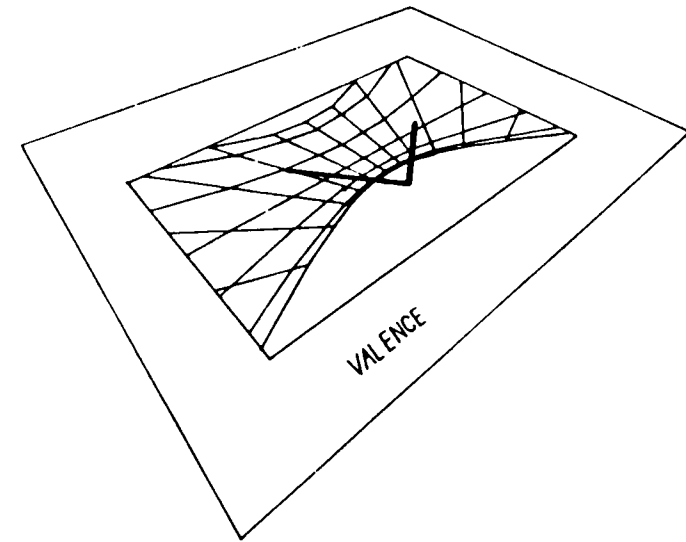


FIGURE 5

Abaque reprenant le principe du cadran solaire, et permettant de positionner la maquette afin de reproduire la position du soleil au jour et à l'heure choisie.

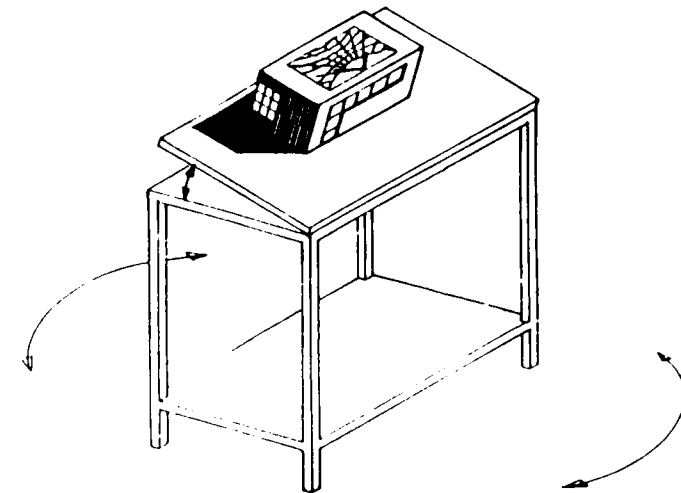


FIGURE 4



### 3.5- LA SIMULATION INFORMATIQUE:

Après avoir décrit l'apport qualitatif que représente l'Héliodon dans l'étude des pénétrations solaires, il convient de citer ici l'outil de l'avenir par excellence, à savoir la Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.). En relation avec l'imagerie numérique, celle-ci semble en effet représenter l'outil susceptible de répondre de la façon la mieux adaptée à la demande des concepteurs.

L'intérêt des techniques informatiques, est que celles-ci permettent de mener des études paramétriques sur un bâtiment. Il est en effet envisageable de tester très rapidement l'influence de la géométrie d'un volume, de faire varier la photométrie de ses différentes parois, de modifier son orientation, etc... Cette possibilité de vérifier "instantannément" l'impact de tel ou tel choix sur la répartition des éclairages dans le volume considéré, constitue véritablement un moyen réel et efficace d'aide à la conception.

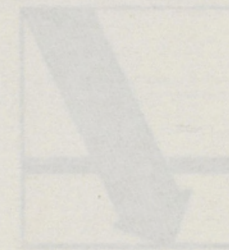
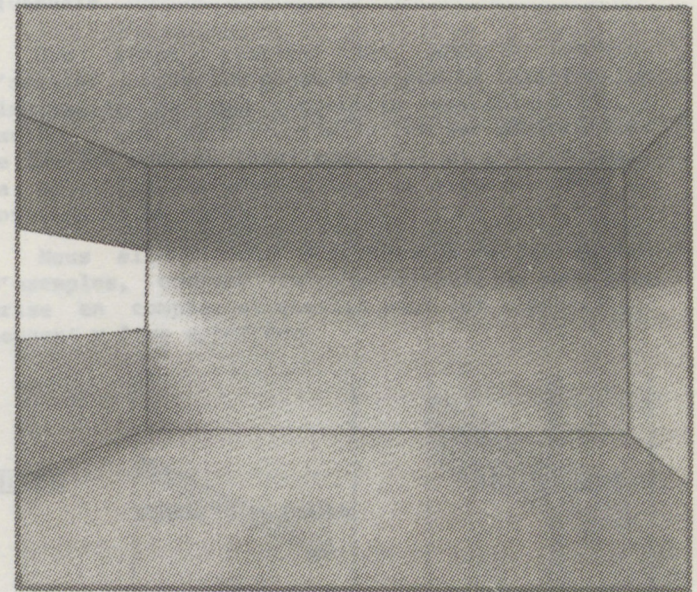
De nombreuses équipes de recherche travaillent actuellement à la mise au point de programmes de calculs qui puissent prendre en compte les inter-réflexions lumineuses dans un volume. Le Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'E.N.T.P.E. a pour sa part développé le logiciel GENELUX. Ce logiciel nous donne non seulement les informations nécessaires sur les quantités de lumière pénétrant effectivement dans le local testé, mais nous permet aussi, grâce à l'utilisation d'une station graphique, de pouvoir visualiser à l'écran, sur une image en trois dimensions, la répartition de cette lumière, (voir figure ). De plus, la faculté nous est donnée de nous "déplacer dans le bâtiment, en modifiant le point d'observation, la direction de visée ou la distance focale.

Outre les renseignements quantitatifs fournis par ce logiciel, cette possibilité de produire des images des espaces éclairés, fait donc de ce logiciel un outil fort appréciable de communication et de dialogue entre le concepteur et son "client".

Le matériel informatique utilisé actuellement pour faire fonctionner le logiciel GENELUX est relativement lourd et coûteux (station graphique APOLLO), mais il sera possible à très court terme,

d'effectuer ce type de simulations sur un matériel standard (IBM PS, APPLE, etc...). Dans la perspective de l'informatisation croissante des agences d'architecture, il ne paraît donc pas du tout utopique de prévoir une large diffusion de ce type d'outil.

SIMULATION DE L'ECLAIRAGE D'UN LOCAL RECTANGULAIRE A L'AIDE DU PROGRAMME GENELUX (CIEL COUVERT)





**-IV- SYSTEMES D'ECLAIRAGE NATUREL:**

Avant toute chose, il convient de rappeler ici les principes fondamentaux qui doivent guider toute démarche concernant l'éclairage naturel du projet architectural. On distingue principalement les trois objectifs suivants:

- Captation de la lumière diffuse.
- Sélection des pénétrations solaires directes, en fonction de la saison.
- Distribution homogène de la lumière dans les espaces intéressés.

Ceci étant posé, nous distinguerons deux grandes familles de systèmes d'éclairage naturel, suivant que la captation de la lumière s'effectuera au moyen d'ouvertures en façade ou par l'intermédiaire d'ouvertures zénithales.

En première approximation, nous pouvons dire que la lumière qui sera disponible en un point d'un local, est à peu près proportionnelle, par ciel couvert, au produit de l'éclairement horizontal extérieur, par l'angle solide associé sous-tendu par l'ouverture, et le cosinus de l'angle d'incidence moyen de cette lumière sur le plan considéré (cf. figure 6).

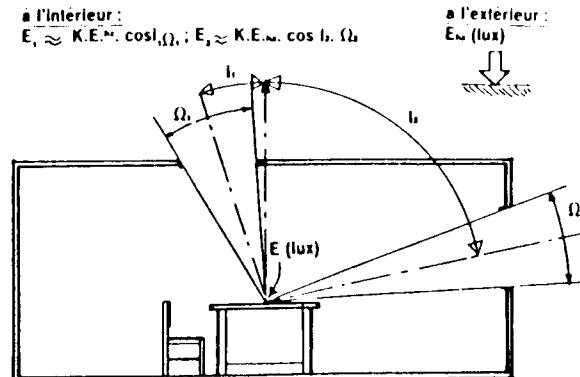


FIGURE 6

Comparaison des éclairagements obtenus sur le plan utile, suivant que l'ouverture se trouve en façade ou en toiture (hypothèse du ciel couvert uniforme).

De cette relation, on déduit que les ouvertures en toiture sont beaucoup plus performantes, à surface égale, que les ouvertures latérales, pour produire des éclairagements intérieurs élevés sur un plan horizontal.

En revanche, nous pouvons remarquer sur la figure 7, qu'en ce qui concerne les pénétrations solaires directes, les ouvertures verticales sont beaucoup plus favorables, dans la mesure où elles assurent un début de sélection de ces pénétrations en fonction de la saison. Au contraire, les ouvertures zénithales procurent un maximum de soleil en été, tout en pénalisant l'insolation hivernale.

Une bonne gestion des apports lumineux d'origine naturelle passe donc par la satisfaction simultanée de deux objectifs contradictoires, à savoir d'une part l'optimisation des pénétrations de lumière diffuse (ciel couvert), et d'autre part, la sélection des pénétrations solaires directes en fonction de la saison.

Nous allons voir à travers un certain nombre d'exemples, comment cette problématique peut être prise en compte, et quelles sont les réponses qui peuvent y être apportées.

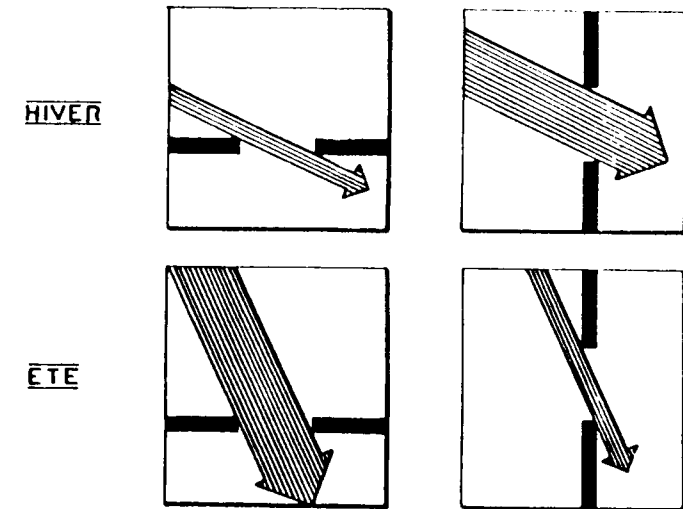


FIGURE 7

Sélection des pénétrations solaires en fonction de la position de l'ouverture.

#### 4.1- LES SYSTEMES D'OUVERTURE EN FACADE:

L'éclairage naturel des locaux au moyen d'ouvertures pratiquées en façade correspond au cas le plus fréquemment rencontré. Ainsi que nous l'avons vu précédemment, (cf. figure 7), les ouvertures verticales en façade sont assez performantes dans la sélection des pénétrations solaires en fonction de la saison.

En revanche, le principal problème que soulève ce type d'ouverture concerne la disparité de la répartition de la lumière. On constate en effet un déséquilibre très important entre les niveaux d'éclairement relevés à proximité de l'ouverture, et ceux relevés en fond de pièce. La lumière rencontre une difficulté certaine à pénétrer en profondeur dans un volume.

Une des solutions les plus intéressantes, à ce problème consiste à dévier la lumière lors de son passage au travers de l'ouverture, afin de la diriger vers le fond du local à éclairer. Plusieurs "systèmes" d'ouverture tendent vers cet objectif.

##### 4.1.1- LES BANDEAUX LUMINEUX (LIGHTSHELVES)

La figure 8 nous montre le principe de fonctionnement de ce système développé aux Etats-Unis au début des années soixante dix. La lumière est réfléchi au plafond, par un miroir.

##### Avantages:

- Augmentation du niveau d'éclairement en fond de pièce.
- Réduction du niveau d'éclairement à proximité de l'ouverture.
- Protection solaire en été.
- Protection contre les éblouissements (élimination des taches solaires directes).

##### Inconvénients:

- Efficacité limitée par ciel couvert (le miroir constitue un masque pénalisant le passage de la lumière diffuse).

- complexité du système (problèmes d'intégration, coût élevé).

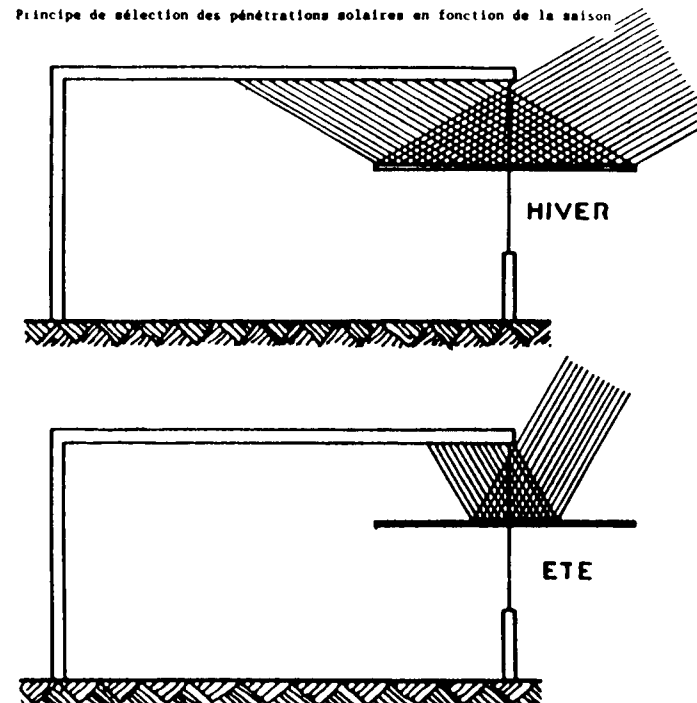
##### Préconisation:

- La complexité de mise en oeuvre de ce type de système, ainsi que son peu d'efficacité par ciel couvert peuvent faire hésiter quant à sa préconisation. En revanche, il peut être très intéressant de reprendre le principe de la surface horizontale réfléchissante, en l'intégrant au niveau des appuis de baies dans le cas où ceux-ci présentent une largeur suffisante. Ceci permet en effet de conserver le bénéfice de la réflexion de la lumière au plafond, sans que l'effet de brise-soleil ne vienne pénaliser la pénétration de lumière diffuse.

FIGURE 8

#### BANDEAU LUMINEUX

Principe de sélection des pénétrations solaires en fonction de la saison



#### 4.1.2- LES SYSTEMES A LAMELLES:

On retrouve ici le principe du store vénitien, à ceci près que les lames sont fixes, et que leur forme est calculée de façon à sélectionner les pénétrations solaires en fonction de la saison (cf. figure 9 ). En définitive, on se trouve en présence du même concept que pour le bandeau lumineux, à savoir la déviation de la lumière au plafond.

##### Avantages:

- Réduction de la luminance de la baie (moins de contrastes).
- Sélection des pénétrations directes (favorise les pénétrations hivernales tout en empêchant les pénétrations estivales).
- Elimination des taches solaires sur le plan utile.
- Possibilité d'insertion du système entre deux vitrages étanches (intégration dans l'épaisseur du mur, pas de problème d'entretien).

##### Inconvénients:

- Perte de la vision vers l'extérieur.
- Réduction des pénétrations de lumière diffuse.

##### Préconisation:

- Les problèmes liés à la perte de la transparence visuelle des ouvertures ainsi équipées nous conduisent à penser que ce type de système aurait avantage à être utilisé pour des ouvertures dont la fonction se limite à l'apport de lumière (ouvertures telles que les sheds par exemple).

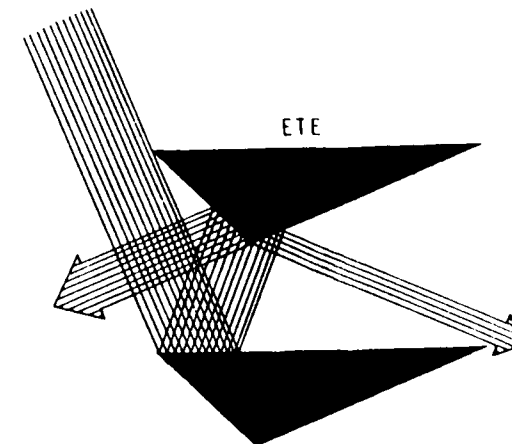
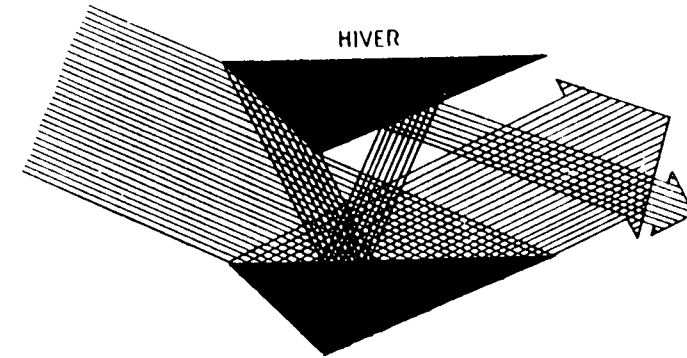


FIGURE 9

Principe de fonctionnement de lamelles fixe soleil, permettant la sélection des pénétrations solaires en fonction de la saison, (éléments compris entre deux vitrages, système fonctionnant en façade sud).

#### 4.1.3- AUTRES SYSTEMES D'OUVERTURES EN FACADE:

Nous verrons, dans la partie de ce travail consacrée aux matériaux, qu'il existe d'autres moyens de dévier la lumière afin de la faire parvenir en fond de pièce, tout en gardant le principe d'ouverture en façade (cf. Matériaux Prismatiques / Films Holographiques).



#### 4.2- LES SYSTEMES D'OUVERTURE EN TOITURE:

Ainsi que nous l'avons exprimé au début de ce chapitre, la maîtrise de l'éclairage naturel dans le projet architectural passe par la résolution des problèmes de captation de la lumière diffuse (ciel couvert), de sélection des pénétrations solaires, et de distribution de la lumière

Nous allons voir à travers quelques exemples, dans quelle mesure les ouvertures zénithales sont susceptibles de répondre à ces objectifs.

Tout d'abord, et d'un point de vue général, nous avons vu précédemment que, par ciel couvert, plus l'ouverture est située en hauteur, plus on arrive à procurer un éclairage élevé sur un plan intérieur horizontal, (le facteur qui joue ici étant l'angle moyen d'incidence des rayons par rapport au plan de la surface à éclairer). De ce fait, les ouvertures zénithales sont donc a priori plutôt favorables à la captation de la lumière diffuse. D'autre part, il se trouve que les ouvertures en toiture ne subissent que rarement la présence de "masques" constitués par l'environnement (à l'inverse des ouvertures en façade).

Ces rapides constats nous induisent à considérer que les ouvertures zénithales répondent de façon satisfaisante au premier des objectifs que nous nous sommes fixés plus haut, à savoir la captation de la lumière diffuse. Nous allons voir maintenant à travers quelques exemples, ce qu'il en est des deux autres objectifs: la sélection des pénétrations solaires en fonction de la saison, et la distribution de la lumière dans les volumes intéressés.

##### 4.2.1- LES SYSTEMES COURANTS D'OUVERTURES ZENITHALES:

- La figure 10 nous montre les configurations d'ouvertures zénithales les plus fréquemment rencontrées. La captation de la lumière diffuse se fait ici de façon optimale (voir courbes de Facteurs de Lumière du Jour).

Par ailleurs, ces configurations ne posent pas de problèmes particuliers en ce qui concerne la distribution de la lumière: on considère en effet que les niveaux d'éclairage sont suffisamment homogènes pour satisfaire au confort visuel d'un bon nombre d'activités.

$\rho_{sol} = 0.3$  .  $\rho_{mur} = 0.5$  ;  $\rho_{plafond} = 0.7$   $l_0$  - INDICE D'OUVERTURE

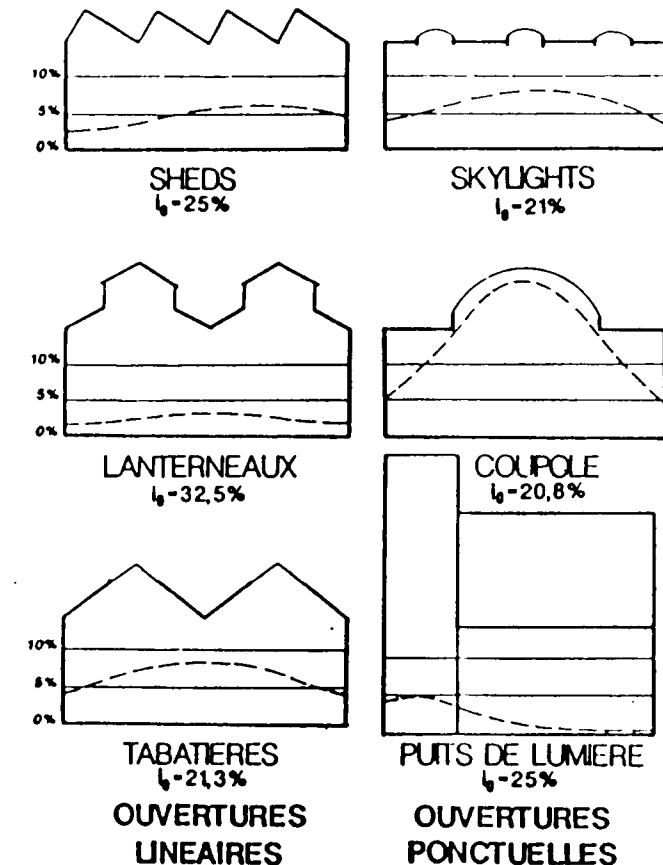


FIGURE 10  
Description des ouvertures en toiture les plus souvent rencontrées, notamment dans les bâtiments industriels. Les courbes correspondent aux Facteurs de Lumière du Jour sur le plancher, pour un ciel couvert C.I.E. (Les simulations ont été réalisées à l'aide du programme NATUREL C.S.T.B. NANTES).

En revanche, le problème de la sélection des pénétrations solaires directes n'est réglée que dans la première configuration de la figure 10 laquelle présente des surfaces transparentes orientées au nord. Pour les autres exemples, les pénétrations solaires seront très importantes en été, ce qui risque de constituer un gêne importante aux utilisateurs. (Nous verrons plus loin comment il est possible d'extrapoler à partir de la notion de "Puit de Lumière" présentée sur cette même figure, tout en gardant un contrôle satisfaisant des pénétrations solaires).

Ceci nous conduit donc à affirmer qu'aucune des solutions présentées sur cette figure n'est totalement satisfaisante du point de vue de la démarche que nous nous sommes fixés. (On ne peut en effet se contenter de se protéger des pénétrations solaires en s'orientant au nord, ceci revenant à trop se pénaliser d'un point de vue thermique pendant la saison hivernale).

#### 4.2.2- EXEMPLE DE SHEDS PRENANT EN COMPTE LES PENETRATIONS SOLAIRES:

La figure 11 nous montre un exemple d'ouverture zénithale, pour lequel on a essayé de favoriser la sélection des pénétrations solaires en fonction de la saison.  
(Ecole Primaire de La Chamberlière à Valence (Drôme), architectes GARIN, SALT, LAGOUTTE, étude LASH / ENTPE).

- Une première sélection des pénétrations est assurée par l'orientation sud-est / sud-ouest (configuration qui tend à augmenter les pénétrations solaires le matin et l'après-midi, au détriment de la période la plus chaude (midi).

- D'autre part, l'inclinaison de la toiture du shed, et son débordement en avant des vitrages ont été déterminés de façon à ce qu'à partir d'une certaine date (début de l'été), la majeure partie des rayons solaires ne pourront plus pénétrer à l'intérieur (effet de masque).

- Par ailleurs, des réflecteurs inclinés ont été positionnés devant les vitrages de façon à augmenter les pénétrations solaires en hiver (du fait de l'inclinaison de ces miroirs vers l'extérieur, les rayons solaires d'été sont réfléchis à l'extérieur).

- Enfin, un système de diffusion de la lumière a été installé en aval de l'ouverture, afin d'éviter la présence de taches solaires à l'intérieur (l'une des pièces équipées de ce type de shed étant une bibliothèque, il était donc nécessaire de lui procurer une protection particulière).

Une étude sur la satisfaction des utilisateurs de l'école de la Chamberlière a montré que l'impact de ces sheds était très positif, et que la qualité de la lumière disponible (qualité due aux spécificités de la lumière naturelle), était ressentie comme un des éléments essentiels du confort des espaces ainsi équipés. (Les quelques réserves émises par les personnes interrogées tenaient essentiellement à l'impossibilité d'apercevoir le paysage extérieur, phénomène inhérent à tous les systèmes d'ouvertures zénithales, et qui ne peut donc être imputé directement au système en question).

#### SHEDS DE LA CHAMBERLIERE (Valence)

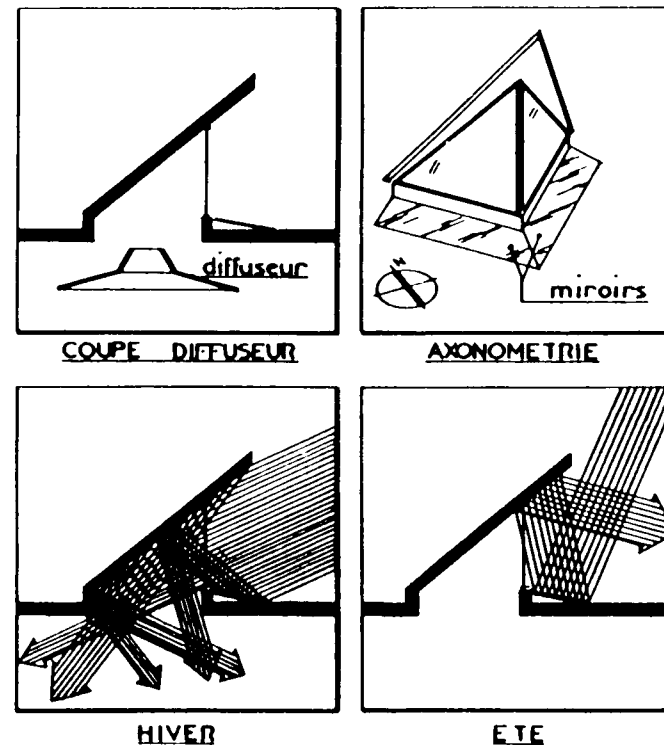


FIGURE 11

Sheds orientés Sud-Est / Sud-Ouest, et comportant un réflecteur externe (tôles inox poli miroir).

#### 4.2.3- LES PATIOS:

Les ouvertures zénithales sont très souvent utilisées pour fournir un apport lumineux à des espaces autres que ceux auxquels elles sont directement associées, notamment dans le cas de configurations communément appelées patios.

Le problème qui se pose alors, réside dans la difficulté de distribuer la lumière latéralement, et ce sur plusieurs étages. La figure 12 nous montre un exemple de traitement de ce type de problème (CES 600 à Modane, architectes BARBEYER-DUPUIS, étude LASH / ENTPE). L'effet recherché dans ce projet consistait à fournir un éclairage bi-latéral pour chacun des espaces d'enseignement, et à procurer du soleil à des volumes dont l'orientation était au nord.

Comptes tenus de l'altitude du site d'intervention, et de la période d'utilisation (année scolaire), le problème de la sélection des pénétrations solaires en été ne se posait pas de façon cruciale, ce qui explique le choix de l'orientation au sud de l'ouverture zénithale.

La solution a consisté ici à recréer des ouvertures zénithales au dessous de l'ouverture principale, de façon à fournir un éclairage bi-latéral aux salles de classe.

On remarque qu'à chaque étage, la prise de lumière en second jour provoque un rétrécissement de la largeur du "patio", ce qui limite donc le nombre d'étage que l'on peut ainsi éclairer.

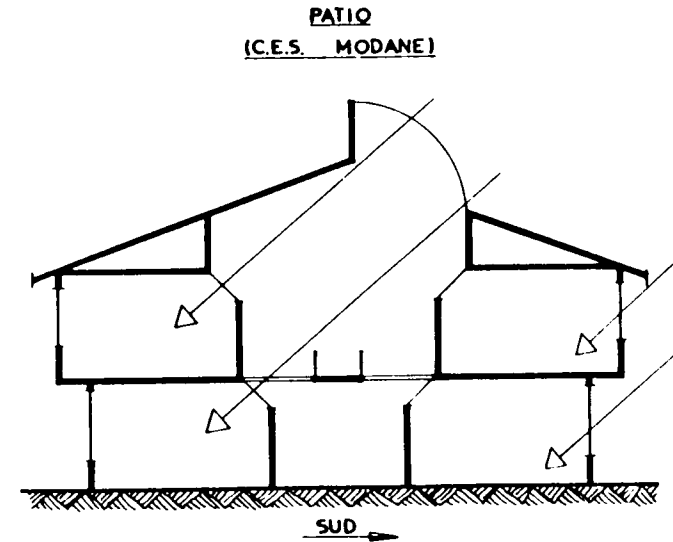


FIGURE 12

Principe d'éclairage de volume situés au nord d'un bâtiment, par l'intermédiaire d'un patio central.

#### 4.2.4- LES "CHEMINES DE LUMIERE":

De nombreux espaces, du fait de leur position centrale (au coeur des bâtiments), n'ont pas de possibilité de communication directe avec l'extérieur, il faut donc que la lumière naturelle traverse d'autres volumes pour parvenir jusqu'à eux. L'exemple du patio exposé précédemment présentait un début de réponse à ce type de problème. Cependant, nous avons pu voir combien il était difficile de faire descendre la lumière à travers plusieurs étages.

Aussi, avons nous voulu reprendre l'idée développée par Rafael SERRA (Ecole Technique Supérieure d'Architecture de Barcelone (ETSAB)), qui consiste à créer des "conduits" de lumière: conduits spécifiques dont l'unique fonction est de

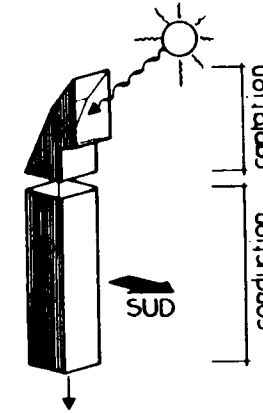


FIGURE 13  
CHEMINÉE DE LUMIÈRE: AXONOMETRIE

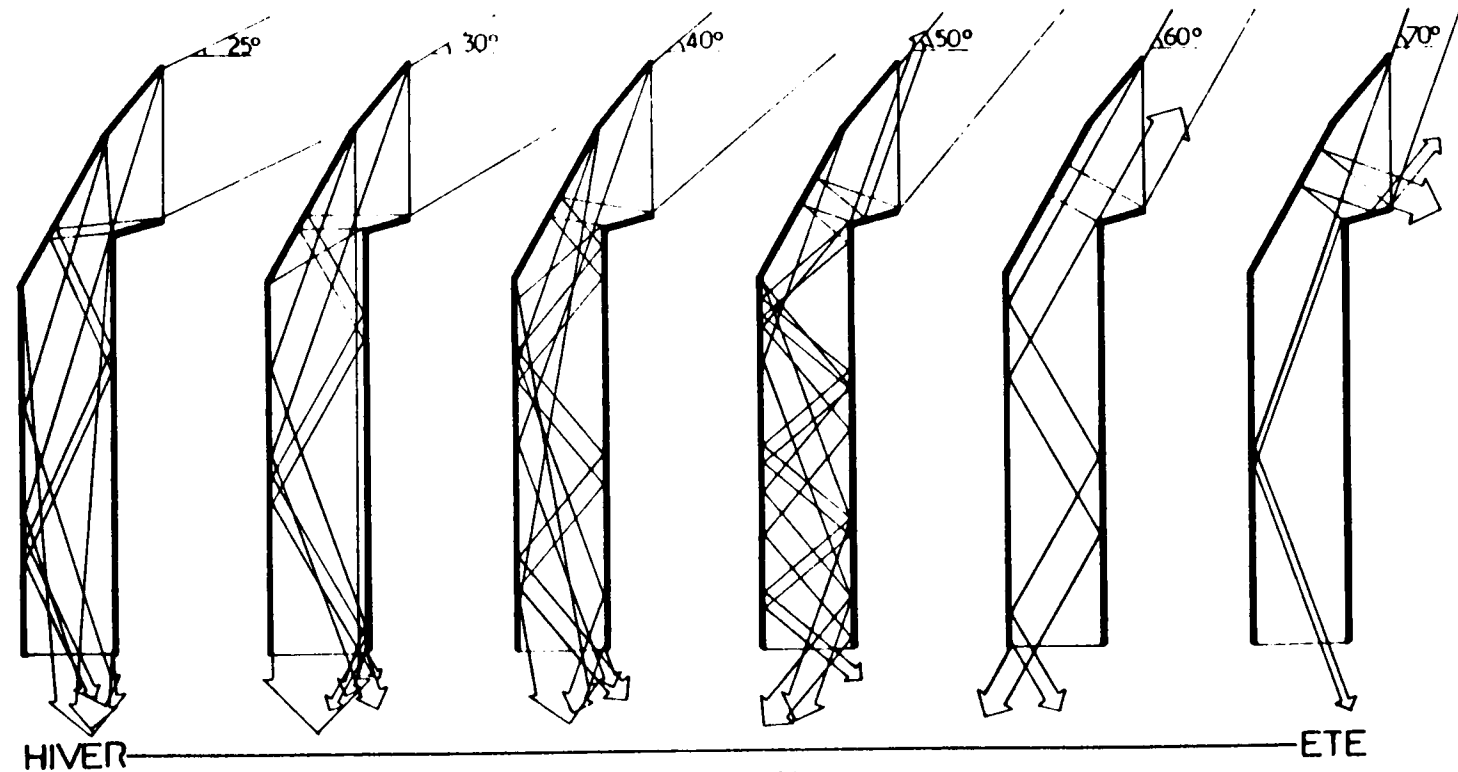


FIGURE 14  
CHEMINÉE DE LUMIÈRE: SÉLECTION DES PENETRATIONS  
SOLAIRES EN FONCTION DE LA SAISON



transporter de la lumière. Le principe est d'aller chercher la lumière naturelle là où elle est disponible (en toiture notamment), et de l'acheminer à l'endroit où l'on en a besoin.

A l'aide des outils exposés dans la première partie de ce travail, (construction de maquettes, simulation sur Héliodon, et test sur GENELUX), nous avons pu, au LASH, concrétiser cette idée, en élaborant la proposition formelle que l'on peut observer sur la figure 13.

Du point de vue du fonctionnement, ce système se décompose en deux parties distinctes.

- La partie supérieure sert à capter la lumière tout en sélectionnant les pénétrations solaires en fonction de la saison. (cf. figure 14 ).
- La partie inférieure ou conduit, est quant à elle destinée à transporter la lumière en profondeur dans le bâtiment avec le moins de pertes possible durant le trajet de descente.

Nous avons comparé l'efficacité de cette proposition formelle avec celle d'un "skydôme" classique dont l'ouverture en toiture représentait la même surface. On voit sur la figure 15 que le capteur apporte un plus considérable au niveau de la sélection des pénétrations solaires. En effet, celui-ci procure un maximum de lumière en hiver, tout en minimisant les apports solaires d'été, à l'inverse de l'ouverture de type "skydôme".

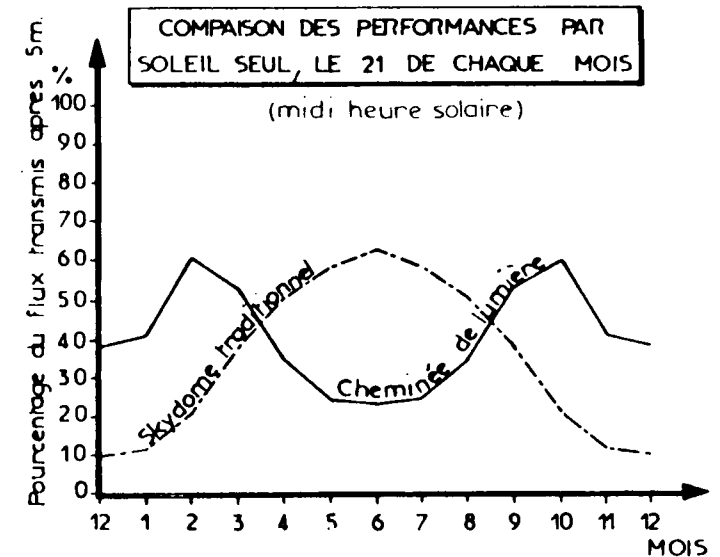


FIGURE 15

## -V- CHOIX DES MATÉRIAUX:

Quelques soient les méthodes et moyens utilisés pour maîtriser les apports lumineux naturels dans le projet architectural, il est certain que les "performances" des solutions retenues seront étroitement liées aux caractéristiques des matériaux mis en oeuvre. Ceux-ci interfèrent en effet de manière très importante dans la répartition et la distribution de la lumière tant par leur texture, leur aspect et leur couleur, que par leurs caractéristiques photométriques propres (facteurs de réflexion, absorption, transmission).

Notre propos est ici de procurer aux architectes un certain nombre d'informations, afin de leur permettre de tirer le meilleur parti des différentes propriétés photométriques des matériaux.

Nous introduirons entre autre une classification simplifiée des matériaux selon leur mode de réflexion ou de transmission de la lumière. Afin de ne pas complexifier inutilement cette partie, nous limiterons notre propos aux matériaux les plus représentatifs de ceux rencontrés dans le bâtiment, (ceci ne devant toutefois pas nous faire oublier qu'il existe des matériaux possédant une photométrie plus complexe, tels que les polycarbonates alvéolaires, les matériaux prismatiques, ...etc).

### 5.1- REFLECTIR LA LUMIERE:

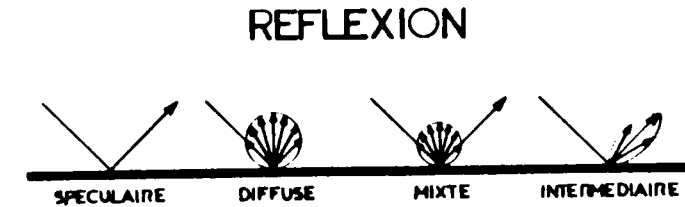
#### 5.1.1- LE FACTEUR DE REFLEXION:

Lorsque l'on dit qu'un matériau possède un facteur de réflexion égal à 0.60 cela signifie que ce matériau renvoie 60% de la lumière qu'il reçoit.

Afin de se faire une idée des facteurs de réflexion des matériaux les plus fréquemment rencontrés dans le bâtiment, on pourra se référer aux figures 17 à 20, qui nous informent sur les peintures, les essences de bois, les moquettes, ainsi que divers matériaux de revêtements couramment utilisés dans le bâtiment. (Tableaux repris des cours de Mr J.J. Damelin court, Université Paul Sabatier, Rangueil).

### 5.1.2- LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE:

On distinguera schématiquement les quatre modes de réflexion de la lumière exposés sur la figure 16. Le but est de différencier les matériaux selon leur appartenance à l'un ou l'autre de ces modes, ceci afin de pouvoir préconiser leur utilisation optimum du point de vue des performances lumineuses des espaces à concevoir.



## REFLEXION

FIGURE 16

LES DIFFERENTS MODES DE REFLEXION DE LA LUMIERE.

(Il est bien évident que cette nomenclature est très simplifiée, et qu'un certain nombre de matériaux peuvent être définis comme représentant une combinaison de ces différents modes entre eux).

#### -A- Réflexion Spéculaire:

On considère comme spéculaire tous les matériaux permettant la réflexion d'une image parfaite de la source lumineuse à laquelle ils sont exposés (miroirs verriers, inox poli, aluminium anodisé, surfaces chromées, ...etc).

#### -B- Réflexion Parfaitement Diffuse:

Ce mode de réflexion s'observe rarement, dans la mesure où il correspond à un phénomène que l'on peut qualifier de "théorique". En fait, les matériaux dont les caractéristiques photométriques sont les plus voisines de la réflexion parfaitement diffuse, sont les moquettes.

Ceci dit, par extension, on classe généralement les matériaux dit "mats" dans la catégorie des matériaux diffusants

(Exemples: peintures mates courantes, bois non traité, béton, ...etc.).

# FACTEURS DE REFLEXION DES PEINTURES SELON LEUR COULEUR

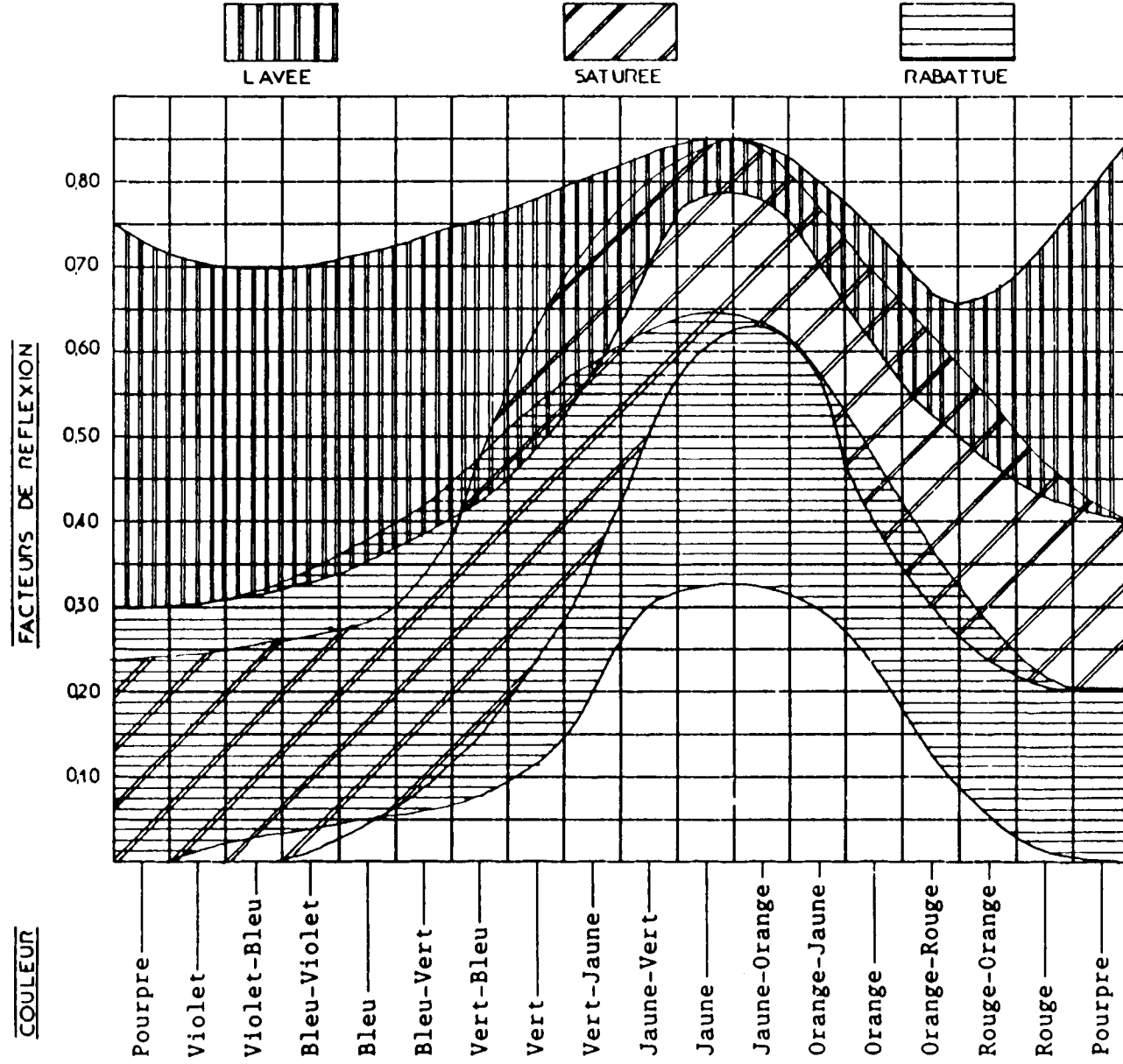
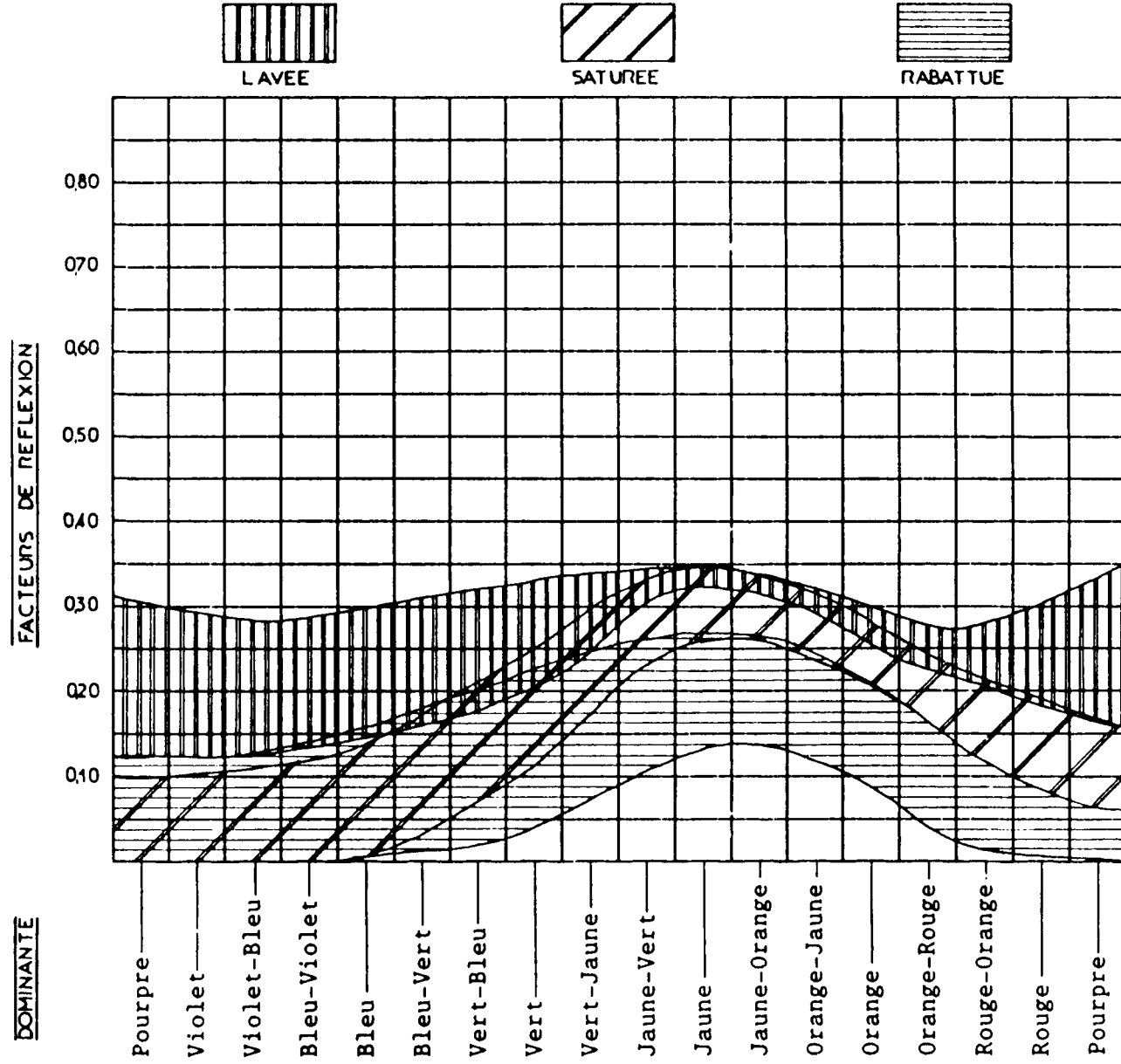


FIGURE 17  
D'APRES J.J. DAMELINCOURT  
(UNIVERSITE PAUL SABATIER, RANGUEIL)

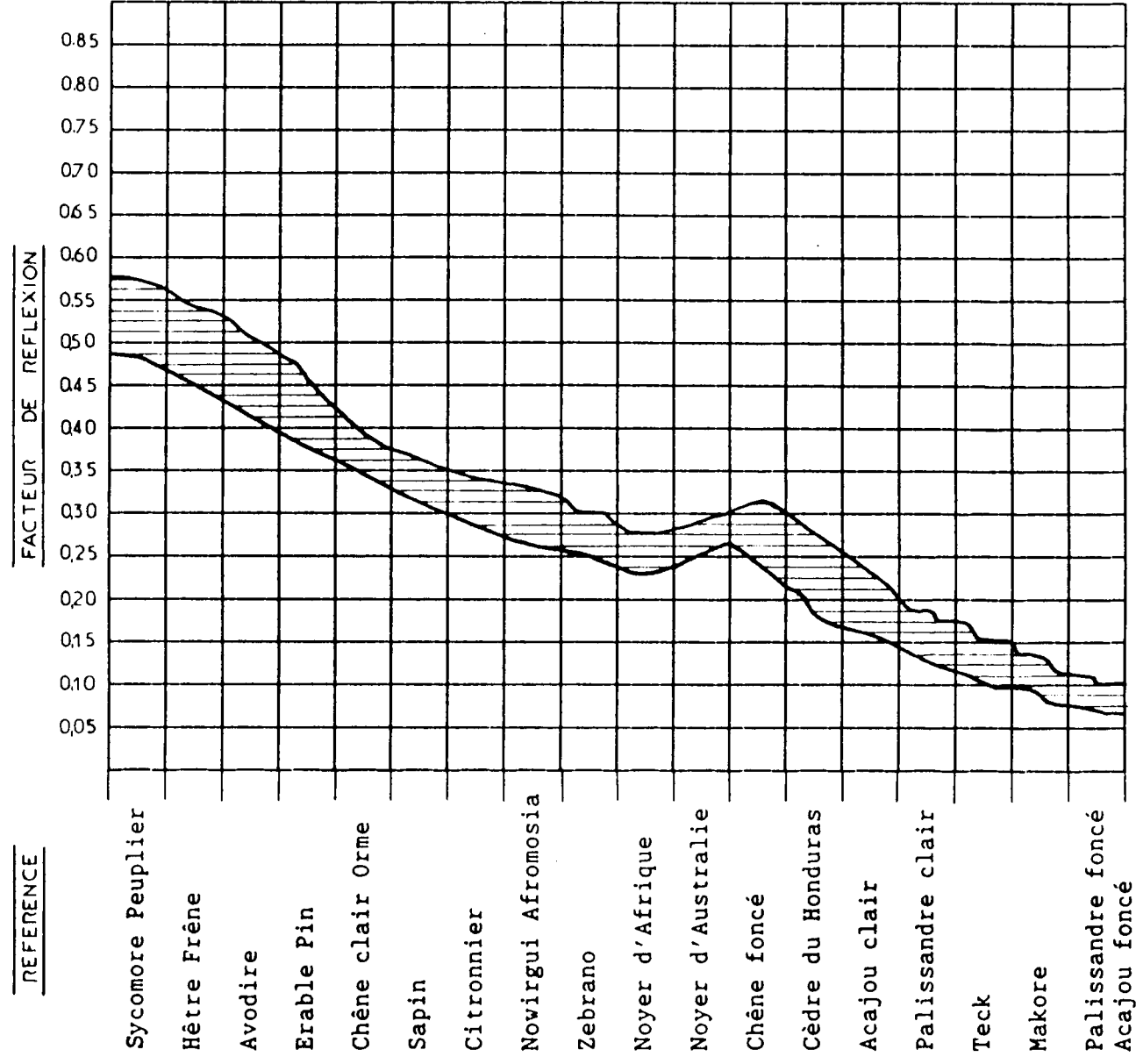
# FACTEURS DE REFLEXION DES MOQUETTES SELON LEUR COULEUR



**FIGURE 18**  
 D'APRES J.J. DAMELINCOURT  
 (UNIVERSITE PAUL SABATIER, RANGUEIL)



# FACTEURS DE REFLEXION DES PRINCIPALES ESSENCES DE BOIS



**FIGURE 19**  
 D'APRES J.J. DAHELINCOURT  
 (UNIVERSITE PAUL SABATIER, RANGUEIL)

# FACTEURS DE REFLEXION DES MATERIAUX DE REVETEMENT LES PLUS COURANTS

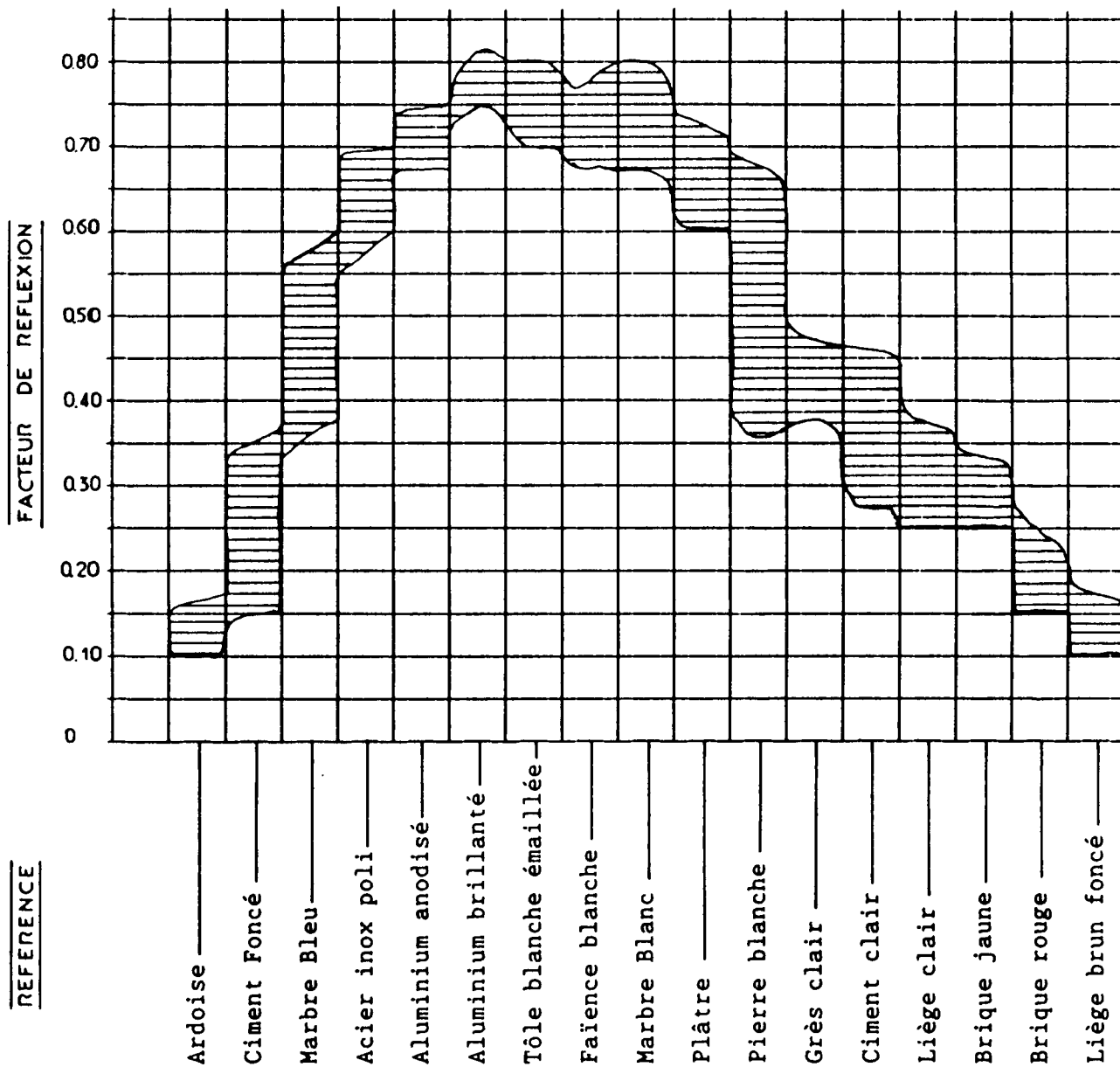


FIGURE 20  
D'APRES J.J. DAMELINCOURT  
(UNIVERSITE PAUL SABATIER, RANGUEIL)

**-C- Réflexion Mixte:**

La réflexion mixte quant à elle, est une combinaison des deux modes précédents (spéculaire et diffus). Elle sert à caractériser les matériaux qui présentent des propriétés de "brillance", et sont donc capables de réfléchir une image relativement précise de la source lumineuse.

On considère généralement que la composante spéculaire de la réflexion mixte, est liée aux caractéristiques d'état de surface du matériau (surfaces polies et lisses), tandis que la composante diffuse dépend de la couleur et de la "clarté" du matériau.

(Exemple: peintures laquées, vernis, revêtements plastiques brillants, etc...)

**-D- Réflexion "Intermédiaire":**

Enfin, il existe toute une gamme de matériaux qui réfléchissent la lumière selon un mode que nous qualifierons "d'intermédiaire". Celui-ci se caractérise par une dispersion de la lumière dans une direction privilégiée, directement liée à la direction initiale des rayons lumineux incidents.

On classe dans cette catégorie les matériaux dits "satinés".

(Exemples: peintures satinées, aluminium brossé, certains revêtements stratifiés, ...etc).

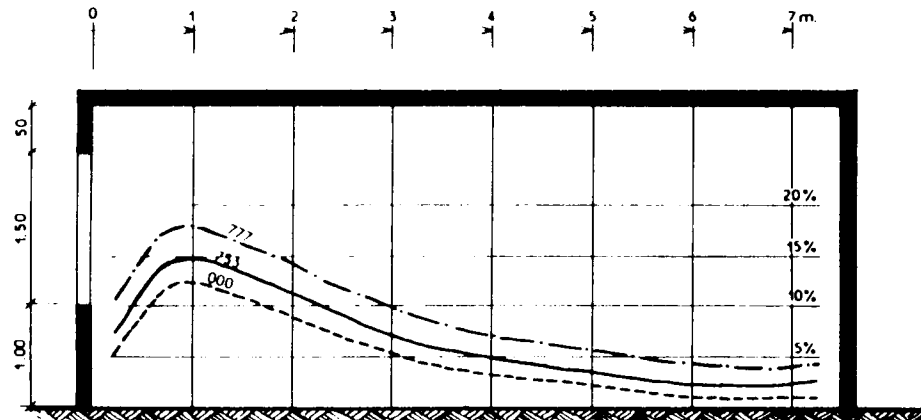
**5.1.3- INFLUENCE DE LA PHOTOMETRIE DES PAROIS D'UN LOCAL QUELCONQUE SUR LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE DANS CE LOCAL:**

Notre propos dans ce paragraphe, est de mettre en évidence les disparités de répartition de la lumière que l'on peut observer selon la "clarté" (ou le facteur de réflexion) des matériaux constitutifs des parois d'un espace quelconque.

Si le facteur de réflexion des murs d'un espace varie de 0,3 à 0,8 (c'est à dire si la part de la lumière réfléchiée par ces murs augmente de 30% à 80%), quelles conséquences cela va-t-il avoir sur l'éclairage général de ce volume?

De même pour le sol ou le plafond. Cette question est fondamentale, et l'ignorer peut entraîner de graves erreurs d'appréciation au niveau de la prévision des ambiances lumineuses.

A l'aide du logiciel GENELUX cité plus haut, nous avons pu tester l'influence que pouvait avoir la photométrie des matériaux de revêtement sur la distribution de la lumière dans un volume quelconque.



**FIGURE 21**  
FACTEURS DE LUMIERE DU JOUR OBSERVES SUR LE SOL  
EN FONCTION DES FACTEURS DE RELEXION  
DES DIFFERENTES PAROIS DU LOCAL  
(SIMULATION GENELUX: CIEL COUVERT UNIFORME)

La figure 21 nous donne pour une pièce donnée (L=7.5m. l=4.5m. h=3.5m), les courbes des facteurs de lumière du jour relevés au niveau du sol, selon que l'on fait varier les coefficients de réflexion des différentes parois (simulation par ciel couvert uniforme).

- La courbe appelée 753 représente le cas où le facteur de réflexion du plafond est égal à 0.7, celui des murs à 0.5, et celui du sol à 0.3. (On considère généralement cette configuration comme représentative de la plupart des locaux à usage tertiaire).

- La courbe 777 représente le cas d'une pièce où toutes les parois possèdent un facteur de réflexion égal à 0.7, ce qui correspondrait à une pièce totalement blanche (0.7 = Facteur de réflexion du plâtre).

- La courbe 000 représente quant à elle le cas d'une pièce entièrement noire pour laquelle aucune lumière n'est réfléchiée par les parois.

L'analyse de la figure 21 nous montre qu'entre la configuration 753 et la configuration 000, il existe un écart d'environ 20%, à proximité de l'ouverture, et que cet écart dépasse les 100% en fond de pièce.

Ceci signifie que la moitié de l'éclairage disponible en fond de pièce est dû uniquement aux inter-réflexions de la lumière sur les parois du local.

Si l'on compare maintenant les courbes 777 et 753, on s'aperçoit que les quantités de lumière disponibles en fond de pièce sont encore une fois multipliées par deux lorsque l'on passe d'une configuration dite "moyenne", à une configuration où toutes les parois sont blanches.

Ces deux exemples nous montrent de façon indiscutable, combien il est important de tenir compte de la photométrie des matériaux de revêtement mis en oeuvre dans le bâtiment.

#### -A- Influence des différentes parois d'un local

Afin de mieux cerner les priorités à accorder aux différentes parois d'un même volume, il est possible de résumer les différents tests que nous avons effectués de la façon suivante:

#### - Influence de la photométrie du plafond:

Dans le cas général, le plafond ne recevant la lumière naturelle que de façon indirecte, son influence sur la répartition des éclairagements est faible. En revanche, dans le cas où l'on cherche à dévier la lumière vers le haut (principe du bandeau lumineux par exemple), le plafond reçoit alors une grande quantité de lumière, et doit donc redistribuer celle-ci dans toute la pièce.

En conséquence, le facteur de réflexion de cette surface devra être élevé ( $0,7 < \rho < 0,8$ ). (Par chance cette valeur correspond à celle du plâtre, matériau dont est souvent constitué le revêtement des plafonds).

#### - Influence de la photométrie des murs:

Dans le cas d'une illumination due à un ciel couvert, (où la plus grande partie de la lumière provient du haut de la voûte céleste), la photométrie des murs a une influence qui peut être qualifiée de "moyenne". En revanche, dès que l'on a affaire à des rayons solaires frappant directement un mur intérieur, la photométrie de celui-ci va jouer un grand rôle dans la répartition des éclairagements. En règle générale, on peut dire que si le facteur de réflexion des murs d'un volume quelconque est inférieur à 0.5, la lumière aura de la difficulté à pénétrer en profondeur dans le volume en question.

#### - Influence de la photométrie du sol:

Avant toute chose, il convient de préciser que d'une manière générale, les surfaces de plancher sont rarement complètement libres et dégagées. En effet, le mobilier, et notamment les tables ou plans de travail, représentent souvent une surface importante, dont les caractéristiques photométriques ont une influence comparable à celles du sol proprement dit. Nous grouperons donc ces deux catégories de surface dans notre analyse.

Ainsi que nous l'avons précisé plus haut, par ciel couvert, la plus grande partie de la lumière provient du haut de la voûte céleste, ce qui explique que les surfaces horizontales reçoivent

une plus grande quantité de lumière que les surfaces verticales. Le sol et le mobilier d'un espace quelconque, constituent donc des plans et surfaces très éclairées, notamment à proximité des ouvertures. Pour cette raison, toute variation de la photométrie de ces surfaces aura des répercussions importantes sur la distribution des éclairages intérieurs.

En conséquence, si l'on désire favoriser la pénétration de la lumière en profondeur dans un local, il est préférable de préconiser un sol et des surfaces de travail relativement claires, possédant donc un facteur de réflexion élevé ( $\rho \geq 0.5$ )

A ce sujet, deux remarques s'imposent :

- On note, la plupart du temps, que les sols sont traités en couleurs relativement sombres, afin d'en faciliter l'entretien. Il faut donc envisager un compromis susceptible de satisfaire simultanément les exigences de confort et de maintenance, ce qui suppose un changement de d'attitude ou de mentalité vis à vis de ces surfaces.

- Par ailleurs, la clarté des tables de travail constitue un élément favorable au confort visuel, dans la mesure où la réduction du contraste entre le support papier et le support table, induit une diminution des efforts d'accommodation que doit effectuer l'oeil à chacun de ses déplacements.

#### **-B- Effets de "brillance":**

Lorsque les matériaux de revêtement d'un local quelconque présentent une certaine "brillance" (autrement dit lorsque qu'une partie des rayons lumineux est réfléchi de façon quasi-spéculaire), on constate que la lumière arrive plus facilement en fond de pièce. En contrepartie, les surfaces en question acquièrent une luminance élevée, et peuvent donc devenir des sources d'éblouissement pour l'utilisateur.

Ceci est particulièrement gênant dans le cas des surfaces de travail (tables, bureaux, ...etc), dans la mesure où les activités de lecture ou d'écriture sont fortement perturbées lorsque l'environnement lumineux est contrasté (reflets, taches de lumière vive, ...etc).

#### **5.1.4- LES MATERIAUX REFLECHISSANTS:**

La mise en oeuvre des techniques d'éclairage naturel dans le bâtiment, nécessite très souvent l'utilisation de matériaux capables de réfléchir le plus "parfaitement" possible la lumière.

En effet, la propriété de réflexion spéculaire est particulièrement intéressante dans la mesure où elle nous permet tout aussi bien de capter la lumière en la concentrant (collecteur de cheminée de lumière), que de rediriger celle-ci au plafond (bandeaux lumineux, lamelles brise-soleil), ou encore de la transporter aux endroits où l'on en a le plus grand besoin (conduits de lumière).

Pour toutes ces applications, et plus particulièrement en ce qui concerne le transport de la lumière d'un point à un autre, il est néanmoins indispensable de disposer de matériaux possédant un coefficient de réflexion très élevé.

A ce sujet, la **Figure 22** nous montre comment les performances de la cheminée de lumière exposée au chapitre précédent, varient selon que l'on fait diminuer le coefficient de réflexion des miroirs constituant les parois du conduit.

On s'aperçoit ici que chaque fois que l'on réduit le coefficient de 10%, (passage de 0,9 à 0,8 par exemple), le rendement de la cheminée de lumière chute de plus de 40 %.

Ceci nous montre, de façon on ne peut plus claire, que la qualité du matériau employé en tant que réflecteur est un élément déterminant quant aux performances.

Afin de fournir une information utile aux concepteurs, nous avons réuni sur le **tableau 2**, les informations relatives aux matériaux réfléchissants actuellement disponibles sur le marché. On y trouvera d'une part des renseignements concernant les caractéristiques photométriques, et d'autre part, des informations quant aux possibilités et restrictions de mise en oeuvre.



TABLEAU 2  
 ESSAI DE CLASSIFICATION DE DIFFERENTS MATERIAUX REFLECHISSANTS SELON LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

MATERIAU	COULEUR	FACTEUR REFLEXION	RESISTANCE MECANIQUE	RESISTANCE à la CORROSION	RESISTANCE à l'ABRASION	DECOUPE PERCEAGE	PLIAGE	CLASSEMENT FEU	DURABILITE des PROPRIETES OPTIQUES	COUT MATERIAU	COUT INSTALLATION	REMARQUES
MIROIR VERRIER CLASSIQUE	ARGENT	0.90	0 (1)	0 (2)	●●●	0 (3)	0 (4)	M0	000	000	0	(1) AMELIORATION DE LA RESISTANCE SI TREMPE OU FEUILLETAGE
	BRONZE	0.45	0 (1)	0 (2)	●●●	0 (3)	0 (4)	M0	000	000	0	
GLACE CLAIRE + METALLISATION SOUS VIDE AU CHROME	ARGENT	0.70	0 (1)	●●●	●●●	0 (3)	-	M0	●●●	0	00	(2) NECESSITE UNE PROTECTION PARTICULIERE DE LA METALLISATION ET DES CHAMPS DU MIROIR (VERNIS SPECIAL)
GLACE + DEPOT PYROLITHIQUE D'UNE COUCHE MINERALE STABLE	ARGENT	0.34	0 (1)	●●●	●●●	0 (3)	-	M0	●●●	00	00	(3) DECOUPE SEULEMENT (SAUF SI VERRE TREMPE)
	BRONZE	0.35	0 (1)	●●●	●●●	0 (3)	-	M0	●●●	00	00	
VERRE TREMPE + DEPOT PYROLITHIQUE D'UNE COUCHE MINERALE STABLE	ARGENT	0.37	00	●●●	●●●	-	-	M0	●●●	00	00	(4) THERMO-FORMAGE (SAUF VERRE TREMPE OU FEUILLETE)
	BRONZE	0.36	00	●●●	●●●	-	-	M0	●●●	00	00	(5) NE PAS RAYER EN NETTOYANT
	CREOLE	0.36	00	●●●	●●●	-	-	M0	●●●	00	00	(6) AMELIORE LA RESISTANCE MECANIQUE DU VERRE
	GRIS	0.36	00	●●●	●●●	-	-	M0	●●●	00	00	(7) APPLICATION EN INTERIEUR EXCLUSIVEMENT
	VERT	0.37	00	●●●	●●●	-	-	M0	●●●	00	00	
	CORAIL	0.37	00	●●●	●●●	-	-	M0	●●●	00	00	
ACRYLIQUE + METALLISATION ALUMINIUM	ARGENT	0.85	000	0 (2)	0 (5)	●●●	●●●	?	000	0	00	(8) APPARITION D'UNE "PATINE" AVEC LE TEMPS, MAIS CE PHENOMENE EST REVERSIBLE (LAVER AVEC EAU + SAVON)
FILM REFLECHISSANT POLYESTER	ARGENT	0.45	00(6)	000	0 (5)	●●●	-	?	00	00	0	
ALUMINIUM ANODISE	ARGENT	0.92	0	00(7)	0 (5)	●●●	●●●	M0	000	●●●	●●●	
ACIER INOXIDABLE POLI-MIROIR	ARGENT	0.55	0	000 (8)	0 (5)	●●●	●●●	M0	000	000	●●●	

CARACTERISTIQUES: ●●●: EXCELLENTEES 000: BONNES 00: MOYENNES 0: INSUFFISANTES - : INEXISTANTES ? : NON SUES.

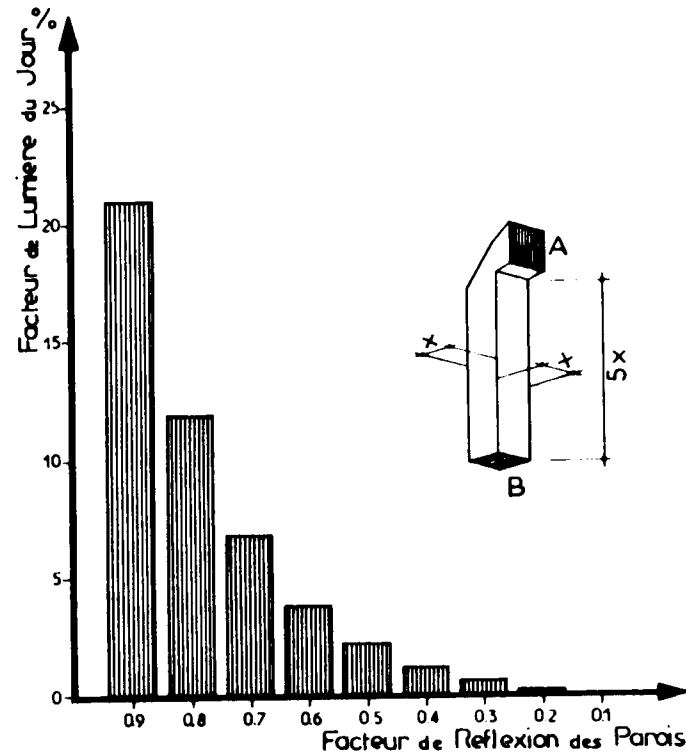


FIGURE 22  
**CHEMINÉE DE LUMIÈRE: PERFORMANCES EN FONCTION DU**  
**FACTEUR DE REFLEXION DES PAROIS INTERNES (x).**  
 (RAPPORT DU FLUX DISPONIBLE EN B, AU FLUX INCIDENT EN A)

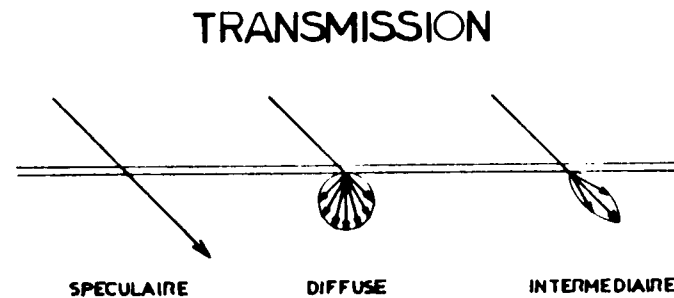


FIGURE 23  
 LES DIFFERENTS MODES DE TRANSMISSION DE LA LUMIÈRE.

## 5.2- TRANSMETTRE LA LUMIÈRE:

### 5.2.1- LE FACTEUR DE TRANSMISSION:

Lorsque l'on dit qu'un matériau possède un facteur de transmission égal à 0.50, cela signifie que ce matériau laisse passer 50% de la lumière qu'il reçoit. Cet indice nous donne donc une information intéressante pour qualifier un matériau. Cependant, pour être vraiment utilisable, cette information doit être accompagnée d'un certain nombre d'indications sur la façon dont la lumière est distribuée (répartition dans l'espace, direction privilégiée, intensité, ...)

### 5.2.2- LA DISTRIBUTION DE LA LUMIÈRE TRANSMISE:

On distingue schématiquement les matériaux selon qu'ils appartiennent à l'un ou l'autre des trois modes de transmission de la lumière exposés sur la figure 23.

#### -A- Transmission Spéculaire:

Le mode spéculaire est caractéristique des matériaux permettant la transmission d'une image parfaite de la source lumineuse, et correspond donc au phénomène de la transparence (Exemples: glaces claires, glaces teintées, ou semi-réfléchissantes).

#### -B- Transmission Parfaitement Diffuse:

On dit que la lumière est transmise de façon parfaitement diffuse, lorsqu'il est impossible d'avoir une quelconque idée des caractéristiques d'origine de la source de lumière. L'oeil humain est alors absolument incapable de distinguer les contours et les couleurs d'un objet, à travers un matériau parfaitement diffusant. (Exemples: verres opalescents, certains verres imprimés, polycarbonates alvéolaires opalescents, ...etc).

#### -C- Transmission "Intermédiaire":

Enfin, il existe toute une gamme de matériaux qui laissent passer les rayons lumineux avec un certain degré de "dispersion", tout en conservant une indication sur la direction et les caractéristiques originelles de la source de lumière. Plus le niveau de dispersion est faible,

plus on se rapproche du mode de transmission spéculaire, c'est à dire qu'il devient de plus en plus facile de distinguer une image précise de la source de lumière au travers du matériau.

### 5.2.3- INFLUENCE DE LA PHOTOMETRIE DU VITRAGE SUR LA REPARTITION ET LA DISTRIBUTION DE LA LUMIERE DANS UN VOLUME QUELCONQUE:

Notre propos dans ce paragraphe, est de mettre en évidence les disparités de répartition de la lumière que l'on peut observer à l'intérieur d'un espace quelconque, selon la nature du matériau faisant office de vitrage.

#### - Influence du facteur de transmission du vitrage:

Les quantités de lumière qui pénètrent dans un volume intérieur quelconque, sont directement liées à la surface du vitrage, et au facteur de transmission de celui-ci.

Ceci signifie que lorsque le facteur de transmission diminue, il faut "surdimensionner" les ouvertures, si l'on tient à obtenir des niveaux d'éclairement intérieurs équivalents.

Ceci s'applique directement aux vitrages teintés, souvent utilisés pour réduire la luminance des ouvertures, et régler ainsi une partie des problèmes d'éblouissement associés.

On peut voir sur la figure 24 que les écarts de facteur de lumière du jour relevés dans un local donné, sont très significatifs, selon que l'on se trouve en présence d'un vitrage clair ou d'un vitrage teinté, (cette différence provenant directement du rapport entre les facteurs de transmission associés à ces deux types de vitrage). (Simulation GENELUX, ciel couvert uniforme).

On remarque ici, par exemple, que les quantités de lumière sont divisées par deux en fond de pièce entre les deux configurations.

Cette baisse des niveaux d'éclairement intérieurs est du même ordre lorsque l'on se trouve en présence d'un vitrage semi-réfléchissant.

Ce phénomène ne doit pas être ignoré lorsque l'on se préoccupe de pourvoir à l'éclairage naturel des "zônes" les plus éloignées des ouvertures, et ceci tout particulièrement en cette période où l'on assiste à une très forte croissance de l'utilisation de vitrages semi-réfléchissants ou teintés.

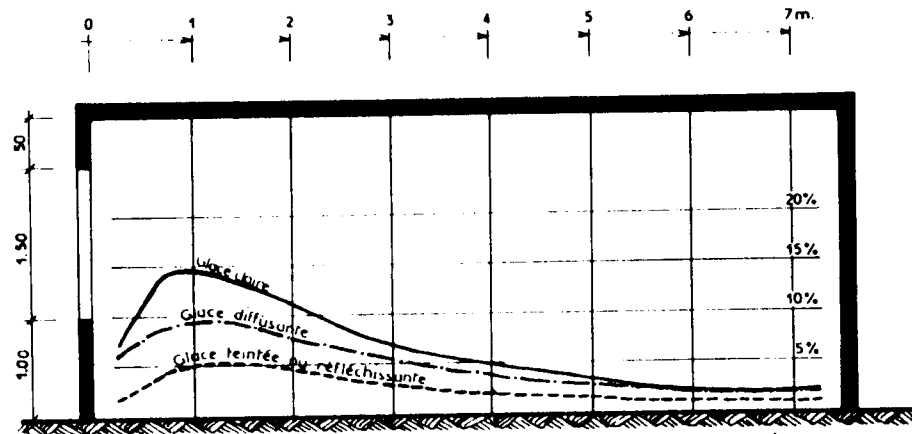


FIGURE 24  
FACTEURS DE LUMIERE DU JOUR OBSERVES  
SUR LE SOL EN FONCTION DU TYPE DE VITRAGE UTILISE  
(SIMULATION GENELUX: CIEL COUVERT UNIFORME)

- Influence de la présence d'un vitrage diffusant:

Toujours à l'aide du logiciel GENELUX, nous avons pu tester l'influence d'un vitrage parfaitement diffusant sur la répartition des éclairagements dans un volume quelconque.

La comparaison avec un vitrage "normal", nous montre qu'à facteur de transmission équivalent, le vitrage parfaitement diffusant tend à distribuer différemment la lumière dans le local (cf. figure 24).

On constate en effet une baisse des éclairagements sur le sol, dans la zone proche de l'ouverture, alors que la quantité de lumière arrivant sur les murs et le plafond est augmentée, (ce qui tend à homogénéiser les niveaux d'éclairément des différentes parois).

La lumière n'est donc pas "perdue", mais seulement répartie de façon différente. Ceci est d'ailleurs confirmé par le fait qu'en fond de pièce, les quantités de lumière sont sensiblement les mêmes dans les deux cas.

De ceci, nous pouvons tirer l'enseignement suivant: dans le cas général, un vitrage diffusant tend à se comporter comme une source de lumière à part entière. Il redistribue donc la lumière selon un mode qui lui est propre, et qui est, dans une certaine mesure, indépendant des conditions climatiques extérieures (position du soleil, présence de masques dus à l'environnement, ...etc).

Ce phénomène implique que dans un certain nombre de cas, un vitrage diffusant peut devenir plus éblouissant que la portion de l'environnement extérieur visible par l'intermédiaire d'une glace claire.

Ceci dit, il faut souligner le fait que la plupart des matériaux diffusants disponibles sur le marché, présentent un facteur de transmission inférieur à celui des vitrages clairs, ce qui tend alors à réduire les quantités de lumière effectivement transmises.

Néanmoins, il est indéniable que les niveaux de lumière sont plus homogènes dans un local équipé de vitrages diffusants, et que les taches de soleil directes sont éliminées, ce qui peut parfois constituer un des éléments de réponse approprié à une bonne gestion de la lumière naturelle.

5.3- LES "NOUVEAUX MATERIAUX":

En complément de cette étude sur les matériaux réfléchissants, il paraît indispensable de conclure ce chapitre en évoquant ici ce que nous appellerons les "nouveaux matériaux". Il existe en effet un certain nombre de produits de l'industrie dont les applications dans le domaine de l'éclairage naturel paraissent extrêmement prometteuses. Parmi ceux-ci, nous citerons principalement les trois produits suivants, qui nous semblent être les plus significatifs des possibilités à venir:

- Les "Concentrateurs Fluorescents".
- Les Matériaux Prismatiques.
- Les Films Holographiques.

5.3.1- Les "Concentrateurs Fluorescents":

Ce terme désigne des plaques de résine acrylique transparente, d'épaisseur variable, qui ont la particularité d'être teintées dans la masse au moyen d'un pigment fluorescent.

De ce fait, ces "plaques" possèdent la propriété de "piéger" la lumière qu'elle reçoivent sur leurs faces principales, et d'en redistribuer la plus grande partie sur les "tranches". (cf. figure 25)

Le principal intérêt de cette propriété est de permettre la captation de lumière diffuse, et sa transformation en une lumière possédant une direction (ce qui permet alors de faciliter son transfert). D'autre part, cette lumière peut se substituer à l'éclairage électrique, et constituer par exemple un éclairage de secours "sans risque".

Ce type de matériau devrait donc notamment trouver des applications pratiques très intéressantes dans le domaine de la "signalisation", tant en ce qui concerne les espaces extérieurs que les volumes de circulations intérieurs (mise en valeur de formes ou de directions privilégiées, "jeux" de lumière, renforcement de la symbolique du projet, sécurité, ...etc).



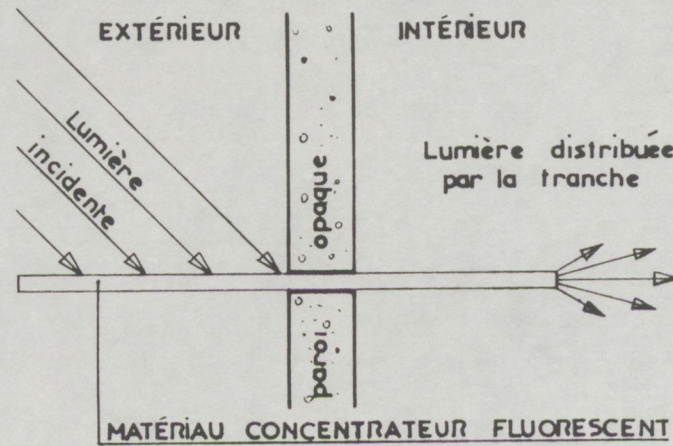


FIGURE 25  
 CONCENTRATEUR FLUORESCENT: PRINCIPE.  
 (D'APRES LA FICHE TECHNIQUE FOURNIE PAR B.A.S.F.)

### 5.3.2- Les Matériaux "Prismatiques":

On désigne par ces termes des plaques de matière plastique (acrylique) ou de verre, dont l'une des faces est composée de "sillons" de forme prismatique, tandis que l'autre face est lisse. La différence d'indice de réfraction entre l'acrylique et l'air, fait que ce genre de matériau est capable de dévier la lumière suivant le principe que l'on peut observer sur la figure 26. L'intérêt principal de ce phénomène consiste à diriger la lumière au plafond afin de lui faire perdre son caractère éblouissant, sans pour autant la rejeter à l'extérieur. On retrouve donc ici le principe du bandeau lumineux, mais cette fois ci, il est possible d'intégrer cette fonction de déviation de la lumière, dans l'élément faisant office de vitrage. A ce sujet, l'observation de la figure 27 est très éloquente.

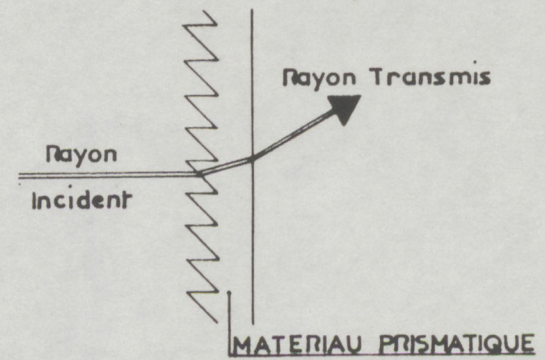


FIGURE 26

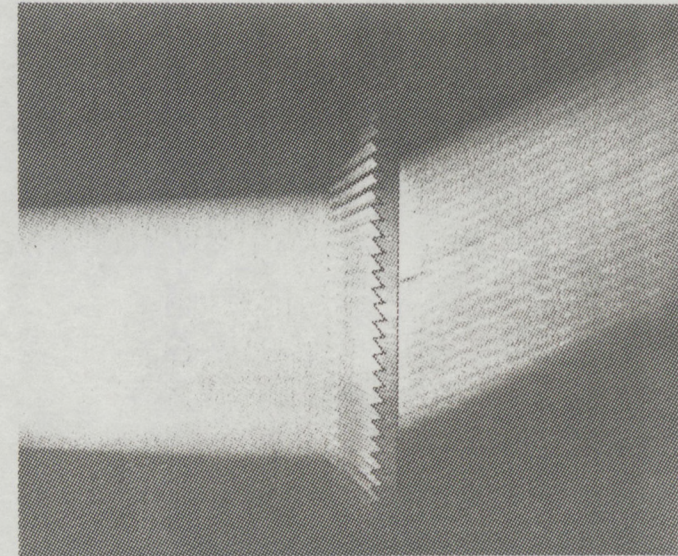


FIGURE 27  
 MATÉRIAU PRISMATIQUE: PRINCIPE DE DEVIATION DES  
 RAYONS LUMINEUX (PHOTO SIEMENS).



### 5.3.3- Les Films Holographiques:

Les films holographiques (produits destinés à être appliqués sur les vitrages au même titre que des films de protection solaire classiques), paraissent compter parmi les matériaux dont les propriétés sont les plus remarquables dans le domaine de la sélection et de la déviation de la lumière. Le principe technique utilisé par ces produits est, comme leur nom l'indique, directement tiré de l'holographie. Une "information" en trois dimensions est stockée sur une émulsion, elle même fixée sur un support film plastique. Cependant, au lieu de concerner une image classique, "l'information" stockée ici, permet au film de dévier la lumière qu'il reçoit selon une ou plusieurs directions programmées à l'avance (cf figure 28).

A ce jour, les applications de ce genre de produits sont réservées à des domaines très spécifiques tels que l'aéronautique, ou l'armement (viseurs "tête haute" notamment), mais on imagine aisément toutes les potentialités directement applicables au domaine du contrôle des pénétrations solaires et de la maîtrise des ambiances lumineuses naturelles en général.

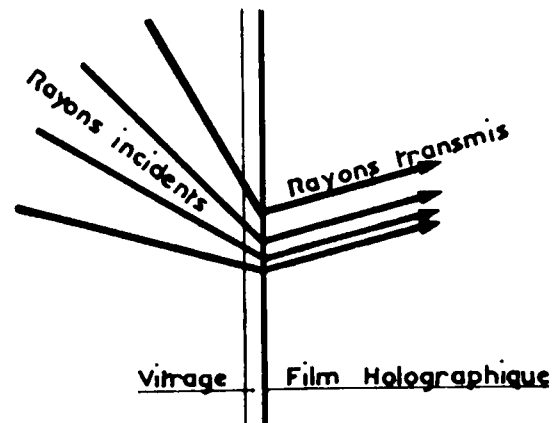


FIGURE 28  
FILMS HOLOGRAPHIQUES: PRINCIPE DE DEVIATION DES  
RAYONS LUMINEUX QUELQUE SOIT LEUR ANGLE D'INCIDENCE



## -VI- CONCLUSION

La compréhension des phénomènes associés à la pénétration de la lumière naturelle se trouve au centre d'une problématique dont la complexité se trouve à des niveaux très divers:

- complexité lumineuse: la source de lumière, d'origine climatique, est extrêmement variable,
- complexité géométrique: la forme du bâtiment agit sur la lumière, et génère un grand nombre de réflexions multiples,
- complexité photométrique: chaque matériau a une action sur la lumière qui lui est propre et qu'il est souvent difficile d'identifier,
- complexité humaine: la perception des ambiances lumineuses n'est pas constante et elle diffère pour chaque individu (physiologie, psychologie et références culturelles).

Les trois premiers points nécessitent de poursuivre les travaux de recherche dans le sens de l'expérimentation (caractérisation des matériaux, mesures sur le site, identification lumineuse des climats) et dans le sens de la simulation (simulation des ambiances, répartition des flux lumineux).

Le dernier point dépasse largement notre cadre. Il appartient à l'architecte de mettre en oeuvre toute sa sensibilité et de prendre la responsabilité consciente de ses choix sur le plan de la lumière.

Quels peuvent être les efforts à mener dès aujourd'hui ?

La complexité d'un problème, malgré son aspect rédhibitoire, doit au contraire nous pousser à travailler avec méthode, en gardant à l'esprit qu'au delà du désir légitime de vouloir comprendre les phénomènes naturels, c'est la science du bâtiment qu'il s'agit d'adapter. Il s'agit donc pour nous de faire les choix les plus judicieux en mettant à notre disposition le plus d'éléments tangibles.

Une tâche qui nous paraît aujourd'hui de toute première utilité consisterait à offrir au concepteur des références de solutions par le biais d'exemples traités. Ces exemples, dont les performances pourraient être caractérisées soit expérimentalement soit numériquement, devraient couvrir aussi large que possible. Grâce à cela, le concepteur serait à même de déduire rapidement le type de pénétration lumineuse à attendre de son projet.

## BIBLIOGRAPHIE

### Ouvrages de référence du LASH:

Marc FONTOYNOT, Prise en compte du rayonnement solaire dans l'éclairage naturel de locaux: méthode et perspectives, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1987.

Marc FONTOYNOT, Pour une intégration de l'éclairage naturel au solaire passif dans les bâtiments tertiaires, Cahiers de la COFEDES, 1986.

Bernard PAULE, Lumière naturelle et architecture, (pour une nouvelle intégration de la lumière naturelle à l'architecture), T.P.F.E., Ecole d'Architecture de Lyon, 1987.

Marc Fontoynot et Bernard PAULE, Progress report on materials, European Concerted Action on Daylighting, CCE, DG XII, Glasgow, 1988.

Marc FONTOYNOT, Genelux, la CAO appliquée à la simulation de la lumière naturelle en architecture, Colloque IMAGICA, Lyon, Novembre 1986.

### Ouvrages de référence de L'A.F.E.: (Association Française de l'Eclairage)

Recommandations relatives à l'éclairage intérieur, Publication de l'Association Française de l'Eclairage, 10ème édition, 1977.

La lumière du jour dans les espaces intérieurs, Association Française de l'Eclairage, Lux Editions, novembre 1983.

## REFERENCES MATERIAUX:

SATMA-PECHINEY (aluminium anodisé brillant), 38570 GONCELIN.

USINOR CHATILLON (inox poli), Immeuble Ile de France, 92070, PARIS LA DEFENSE.

OLTMANN S.A. (bardages translucides), ZI de la Martinerie, Rue Lafayette 36130 DEOLS CHATEAUROUX.

EVERLITE FRANCE (bardages translucides autoporteurs), 27 bis rue de Melun, 77930 PERTHES EN GATINAIS.

ST GOBAIN VITRAGE (produits verriers), 18 Av. d'Alsace 92400, COURBEVOIE.

SOCIETA ITALIANA VETRO (miroirs flexibles, produits verriers), Via G. DE GRASSI 8 I 20123 MILANO.

BASF, (poudres fluorescentes) D 6700 LUDWIGSHAFEN.

ALTULOR (PMMA concentrateur fluorescent) 176, route de Pontoise 95100, ARGENTEUIL.

SIEMENS (Matériaux prismatiques), 39-47 Bd Ornano, 93200 SAINT DENIS.

R. IAN, (films holographiques), Advanced Environmental Research Group, U.S. Department of Energy, CAMBRIDGE MASSACHUSSETS, U.S.A.

**REFERENCES COMPLEMENTAIRES**

(EXIGENCES VISUELLES, FACADES, TOITURES, ATRIA)

## EXIGENCES VISUELLES

- IES Lighting Handbook, Reference Volume, p. 3-3, Waverly Press, 1981.
- O. Mortenson-Blackwell, Effect of age on the visual performance, IERI Report, Project 30 B 77, 1978.
- P.R. Boyce, Age, Illuminance, visual performance, Electricity Council Research Center, Report 498, Capenhurst, UK, 1972.
- Recommandations relatives à l'éclairage intérieur, Publication de l'Agence Française de l'éclairage, 10ème édition, 1977.
- IES Lighting Handbook, Application Volume, Waverly Press, 1981.
- La lumière et la protection des objets et spécimens exposés dans les musées et les galeries d'art, Lux N° 63, 1971.
- Recommandations relatives à l'éclairage des installations sportives, Publication de l'Agence Française de l'Eclairage, 2ème édition, 1978.
- P. J. Bouma, Physical Aspects of Colour, Philips Technical Library, 1947.
- IES Handbook, Fundamentals, p. 3-9, Waverly Press, 1981.
- V. S. Styles, The effect of glare on brightness difference threshold, DSIR Illumination Research Technical Paper, N°8, London, Her Majesty S. Office, 1929.
- P.O. Fanger, Thermal Comfort, Mc Graw Hill, R.E. Krieger Editor, Malabar, Florida, 1982.
- R.G. Hopkinson et al, Daylighting, London, Heinemann, 1966.
- M. Luckiesh and F.K. Moss, The Science of Seeing, Mac Millan and Co, London, 1937.
- M. Luckiesh and F. K. Moss, Reading as a visual task, Chapman and Hall, London, 1942.
- H.C. Hottel, Radiant Heat Transmission, Mechanical Engineering, Vol 52, 1930.
- P. Chauvel, J. B. Collins, R. Dogniaux and J. Longmore, Glare from windows: current views of the problem, Lighting Research & Technology, Vol 14, N° 1, 1982.
- A. Aubrée et P. Chauvel, Etude de la gêne produite par la vue directe du ciel à travers les baies, Rapport C.S.T.B. 1976.
- P. Chauvel et A. Aubrée, Eclairage électrique de espaces intérieurs pendant le jour et utilisation rationnelle de l'énergie, Conférence Proceedings, D307/1-4, 20th Session, Commission Internationale de l'Eclairage, Amsterdam 1983.

## FACADES

- J. Farbstein et al, The importance of Daylight in the workplace: the United Postal Service, Second International Daylighting Conference, ASHRAE Proceedings, Long Beach, Californie, Novembre 1986.
- Narashimhan and Shree Kumar, Enhancement of internal daylight availability with louvered windows, Symposium, Windows and their functions in architectural design, Istanbul, 1973.
- A.H. Rosenfeld and S. Selkowitz, Beam daylighting, direct use of solar energy for interior illumination, Proceedings of the 1976 International Solar Energy Society Conference, 1976.
- N. C. Ruck, Beaming daylight into deep rooms, Batiment International. Conseil International du Batiment, Mai-juin, 1985.
- N. C. Rodgers, The potential of beam sunlighting, Lighting Design and Application, 9 (11), pp. 33-35, 1980.
- N.C. Rodgers and R. Phillips, Beam sunlighting as an energy conservation technique, IES Lighting Review, 43 (1), pp. 24-26, 1981.
- V. M.C. Lam, Light and vision as formgivers for architecture, Christopher Hugh Ripman Editor, Mc Grav Hill, 1977.
- M. Learn, A new economics for solar energy: core daylighting with heliostats, Proceedings of the Daylighting Application Conference, pp. 119-123, Raleigh, N.C., ASES Ed., 1985.
- L. Whitehead, A demonstration of illumination with sunlight distributed in light pipes, Conference Proceedings, Intersol85, p. 172, ISES, 1985.
- C. Robbins and K. Hunter, The core daylighting of commercial buildings using daylighting heliostats, Proceedings of the Daylighting Applications Conference, pp. 124-128, Raleigh, ASES, 1985.
- C. und P. Bartenbach, Architektur und Tageslicht, Haus Vaucher, Amman Verlag.
- D. Eijadi and D. Bennett, Emerging architecture: Thresher building renovation/adaptive re-use, Conference Proceedings, Daylighting Applications Conference, p. 588-589, Raleigh, ASES, 1985.
- D. Felts, Case study for new construction: "The Window Rock elementary school addition, Window Rock, Az", Conference Proceedings, International Daylighting Conference, pp. 185-187, Phoenix, T. Vonier Ed, 1983.
- B. Köster, Passive Kühlmassnahmen in der Solar Architektur, Glasswelt 5, 1985.



P.J. Arsenault, Design and Demonstration of innovative daylighting strategies in Nottingham public High School, Syracuse, New York, Proceedings of the Daylighting Application Conference, Raleigh, ASES, 1985.

Gunnar Birkerts, Buildings Projects and Thoughts 1960-1985, Internal Report, Gunnar Birkerts and Associates, 1985.

R. Serra Florensa, Dep de Acondicionamiento y Servicios, Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Avenida Diagonal, 649 Barcelona 08028, Espagne.

M. Fontoynt, Pour une intégration de l'éclairage naturel au solaire passif dans les batiments tertiaires, Cahiers de la COFEDES N°1, Paris.

S. Selkowitz, M. Navvab and S. Mathevs, Design and performances of light-shelves, Conference Proceedings, International Daylighting Conference, pp. 267-271, 1983.

L.S. Windheim and L.A. Daly, Lockheed Building 157, Deep Daylighting / Innovative lighting concepts, for a large office building, Conference Proceedings, International Daylighting Conference, pp. 143-147, Thomas Vonier Ed, Phoenix, 1983.

Gunnar Birkerts and Associates, IBM Office Building, Southfield Michigan, "Windows for Energy Efficient Buildings", p. 5, Lawrence Berkeley Laboratory, January 1979.

J. Knisley, Daylighting with reflectors saves office energy, EC & M, November 1981.

T. Hursley, Reflections on a glass museum, Architectural Record, February 1981.

V. Marlin, Two Energy Sources, Architectural Record, pp. 87-96, October 1979.

By reflected Light - Office Building, Detroit, Progressive Architecture, September 1975.

H. Fontanel, P. Rigo et E. Szabo, Travail de fin d'études, E.N.T.P.E., Juin 1984.

T.C. Howard et al, Preliminary assessment of variable-area, light-reflecting assemblies, Report # LBL-18331, Lawrence Berkeley Laboratory, 1985.

J.C. Lee et al, Thermochromic materials research for optical switching, Proceedings of the SPIE 30th Annual Symposium, San Diego, [692-01], 1986.

S.A.M. Babulanam, Thermochromic VO<sub>2</sub> films for energy-efficient windows, Proceedings of the SPIE 30th Annual Symposium, San Diego, [692-45], 1986.

S.K. Keb, Some perspectives on electrochromic device research, Proceedings of the SPIE 30th Annual Symposium, San Diego, [692-02], 1986.

S.F. Cogan, Optical switching in complementary electrochromic devices, Proceedings of the SPIE 30th Annual Symposium, San Diego, [692-03], 1986.

N.R. Lynan, Plurality of electrochromic layers formed through a novel process, Proceedings of the SPIE 30th Annual Symposium, San Diego, [692-44], 1986.

D.K. Benton et al, Amorphous tungsten and molybdenum oxide electrochromic coatings, Proceedings of the SPIE 30th Annual Symposium, San Diego, [692-04], 1986.

#### TOITURES

R. Cadiergues, Les fonctions d'échange, Application à l'éclairage naturel, Cahiers du C.S.T.B., N°9, 1950.

S. Selkowitz, Window and Daylighting Group, Annual Report, Lawrence Berkeley Laboratory, 1983.

S. Thienot, L'éclairage naturel dans les batiments industriels, Mémoire de T.F.E., ENPC, Septembre 1979.

Daylight, Publication C.I.E. N°16, 1970

R. McCluney, Importance of economics in sizing skylight systems, Conference Proceedings, International Daylighting Conference, pp. 331-335, Phoenix, AZ, 1983.

M. Fontoynt and B. Fleury, Daylighting of Large Volumes, Proceedings of the Second International Daylighting Conference, Long Beach, California, 1986.

V. Place, M. Fontoynt et al, Daylight Strategies, Proceedings, Passive and Hybrid Solar Energy Update, 15-17 Septembre 1982, Vashington D.C., 1982.

V. Place, Marc Fontoynt et al, The predicted impact of roof aperture design on the energy performance of office buildings, Report LBL 18838, Lawrence Berkeley Laboratory, 1984.

M. Fontoynt, V. Place and F. Baumann, Impact of Advanced Electric Lighting Design on the Energy Saving of roof Monitors, Energy and Buildings, Volume 6, pp.375-386, 1984.

A. Delamare, B. Burgunter, M. Fontoynt, Etude de sheds à orientation Sud-est et sud-ouest destinés à l'école primaire de la Chamberlière, Rapport d'étude LASH-860902, ENTPE, Septembre 1986.

M. Fontoynt et P. McFadden, Design of sheds with reflectors: from the drawing board to the monitoring, Paper submitted at the ASES Conference, Portland, Juillet 1987.

D. Felts, Daylighting with Skylights and Reflectors, Conference Proceedings, Daylighting Applications Conference, Raleigh, NC, 1985.

D. Felts, Case Study for New Construction: the Window Rock Elementary School Addition, Window Rock, Az, Proceedings of the International Daylighting Conference, Phoenix, AZ, 1983.

C. Robbins and K. Hunter, The core daylighting of commercial buildings using daylighting heliostats, Proceedings of the Daylighting Application Conference, Raleigh, NC 1985.

L. Whitehead, A demonstration of illumination with sunlight distributed in light pipes, Conference Proceedings, Intersol85, p. 172, ISES, 1985.

M. Learn, A new economics for solar energy: core daylighting with heliostats, Proceedings of the Daylighting Application Conference, pp. 119-123, Raleigh, N.C., ASES Ed., 1985.

L. Whitehead, New efficient Light Guide for Interior Illumination, Applied Optics, Vol 21, N°15, pp. 2755-2757, 1982.

#### ATRIA

V. Kroner and S. Loukos, Form giving spatial envelopes for office buildings, Conference Proceedings, Daylighting Application Conference, ASES, Raleigh, 1985.

M. J. Bednar, An analysis of daylighting design factors in atria, Conference Proceedings, Daylighting Applications Conference, ASES, Raleigh, 1985.

M. J. Bednar, "The New Atrium", Mc Gray Hill, New York, 4275-6., 1985.

V. Cartwright, The use of lightwells as a daylight strategy, conference proceedings, daylighting applications conference, ASES, Raleigh, 1985.

V. M. C. Lam, Perception and Lighting as foragers for architecture, Proceedings of the International Daylighting Conference, p. 77, Phoenix, AZ, 1983.

V. M. C. Lam, Eclairage et Architecture: 55 Exemples Américains, Editions du Moniteur, 1982.

A. Liebard, Etats du développement de l'hélio-architecture et de l'hélio-électricité aux Etats-Unis, Rapport AFHE, 1984.

M. Burt, E. Kent, E. Ne'eman, and D. Schrifteilig, Single and multilayer large span membrane structures for daylight, energy control, and savings, Conference proceedings, International Daylighting Conference, Thomas Vonier Editor, Phoenix, 1985.

G. H. Hart, R. S. Blancett and K.F. Charter, The use of DOE-2 to determine the relative energy performance of daylighted retail stores covered with tension supported fabric roofs, International Daylighting Conference, Proceedings, pp. 317-330, 1983.