

LESO-PB

**Plafond anidolique : un nouveau système
pour l'éclairage naturel latéral des
bâtiments. Partie I : Conception et
performance énergétique**

Courret G.
Francioli D.
Scartezzini J.-L.

CISBAT'97 - Lausanne

Plafond Anidolique : un nouveau système pour l'éclairage naturel latéral des bâtiments.

Partie I : Conception et performance énergétique.

G. Courret, D. Francioli*, J.L. Scartezzini
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1015 Lausanne / Suisse

* Institut Universitaire Romand de Santé au Travail (IST)
1005 Lausanne / Suisse

RESUME

Le système présenté ici a été conçu et réalisé afin de démontrer la viabilité de l'utilisation intensive de l'éclairage naturel par ciel couvert dans le secteur tertiaire, en offrant de plus une qualité d'éclairage supérieure à celle obtenue par un vitrage de façade. A partir d'un conduit de lumière intégré en faux plafond et débouchant à mi-profondeur, deux éléments de type anidolique (optique non-imageante) sont placés à ses extrémités, du côté extérieur pour collecter le rayonnement céleste, et du côté intérieur pour contrôler les directions d'émission.

La présente communication (partie I) décrit les principes de conception et de réalisation d'un tel système, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus en matière d'éclairage et d'économie d'électricité, par comparaison d'un prototype avec une façade conventionnelle en grandeur nature. Une deuxième communication (partie II) fait état des résultats concernant les aspects humains : mesure du confort visuel, test d'acuité et questionnaire d'évaluation de la perception de l'environnement lumineux.

SUMMARY

The system presented here was developed to show the viability of intensive use of daylight by overcast outdoor conditions, in buildings of the tertiary sector. It has been found that, as an added advantage, it supplies lighting of superior quality to that obtained with facade glazing.

The system consists of a light duct that is integrated in a suspended ceiling and leads midway into the office. Anidolic (non-imaging) devices are placed on either end of the duct, on the outside to collect light rays from the sky and on the inside to control the direction of the emitted light.

The present paper (part I) describes the design and construction principles of the system as well as experimental results obtained with regard to illuminance and electricity savings in a comparison of a prototype and a full-size conventional facade.

Another paper (part II) discusses the results with regard to the user: measurements of visual comfort, tests of visual acuity as well as a questionnaire that evaluated the perception of the lighting environment.

1. Introduction

Cette recherche s'inscrit dans un programme international qui vise à promouvoir les économies d'énergie dans le bâtiment par l'utilisation intensive de la lumière naturelle. En Suisse, l'éclairage représente 30 à 50% de la consommation d'électricité dans le secteur tertiaire [1] ; il s'agit donc d'un gisement important.

Cette étude présente un système qui permet d'augmenter la pénétration de la lumière depuis la façade. A la base, il s'agit d'un conduit tapissé de réflecteurs, placé en faux plafond et débouchant en milieu de pièce, cette disposition procurant une tolérance vis-à-vis des risques d'éblouissement bien supérieure à celle d'un éclairage latéral. S'agissant de réduire le recours à l'électricité, ce système doit être efficace par ciel couvert, et non pas uniquement lorsque le soleil est visible comme, par exemple, dans le cas des systèmes à héliostat. A cette fin, deux ensembles de réflecteurs profilés sont placés aux extrémités du conduit, à l'extérieur pour collecter les rayons lumineux issus du ciel, à l'intérieur pour contrôler les directions d'émission (cf. Fig.1). Ces deux éléments ont été conçus sur des bases fournies par la théorie de l'optique anidolique (non-imageante). L'efficacité de cette approche a déjà été démontrée expérimentalement [2, 3], et pour marquer clairement cette origine, ce type de système est baptisé "Plafond Anidolique".

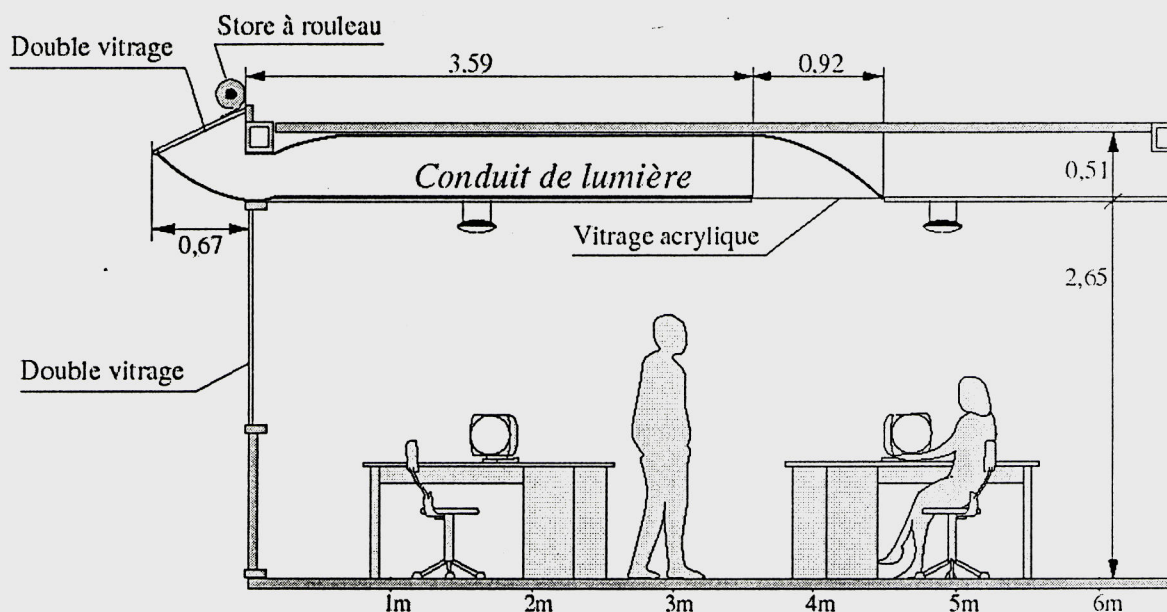


Fig. 1 — Coupe longitudinale du Plafond Anidolique, installé dans le bureau de test.

2. Conception

Le problème majeur de l'utilisation de conduits lumineux suffisamment efficace pour apporter un flux significatif par ciel couvert réside dans leur encombrement, de par le surcoût lié au volume pris sur l'espace intérieur. Concentrer la lumière apparaît dès lors comme le critère essentiel. Cependant, la lumière du jour est de caractère diffus, ce qui limite considérablement les possibilités de concentration. La loi de conservation de l'étendue en optique géométrique indique en effet, que si un système optique réduit la section d'un faisceau, il augmente nécessairement son ouverture angulaire, qui pour la lumière incidente en façade est déjà au maximum (2π stéradians) [4, 5]. Cette loi s'appliquant à longueur d'onde fixée, il est théoriquement possible de dépasser cette limite en faisant appel à des matériaux fluorescents, cette technologie n'est cependant pas au

point [6]. En pratique, on remarque que, par temps couvert, la luminance du ciel est en moyenne environ 5 fois plus élevée que celle du sol, sélectionner cette partie du flux incident apporte donc un gain intéressant.

Le collecteur est un "Concentrateur Composé Parabolique" [4] ; ce choix est basé sur les deux points suivants :

- Sa sélectivité angulaire définit un secteur d'admission : tout rayon lumineux qui arrive sous une direction comprise dans ce secteur est transmis, les autres sont rétro-réfléchis. En plaçant ce type d'élément à l'entrée du conduit, il est possible de faire en sorte que le faisceau transmis ne soit composé que de rayons issus du ciel.
- Les rayons transmis ne subissent au plus qu'une seule réflexion dans le concentrateur ; les pertes par absorption dans les réflecteurs du collecteur sont donc très faibles.

Le même type d'élément est placé à la sortie du conduit, en inversant toutefois son orientation et en ajustant le secteur d'émission, l'équivalent du secteur d'admission, sur la zone à éclairer [7].

3. Prototype et dispositif expérimental

Après une première étude par simulation informatique [8], des mesures comparatives ont pu être menées dans deux bureaux de test, de mêmes dimensions (3 x 3 x 6.6 m), et peints et tapissés de façon identique (facteur de réflexion = 0.15 pour le sol, et 0.80 pour les murs et le plafond). Ces modules sont montés sur des roulettes de manière à pouvoir les orienter dans n'importe quelle direction. Ils sont posés côte à côte sur une plate-forme en béton (cf. Fig. 2.a) dont la situation a été choisie pour son dégagement, l'obstruction de l'horizon n'excédant pas 10°.

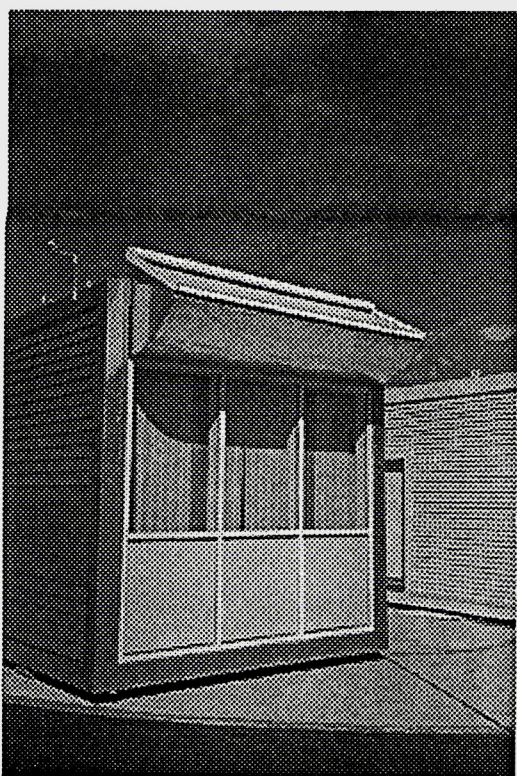
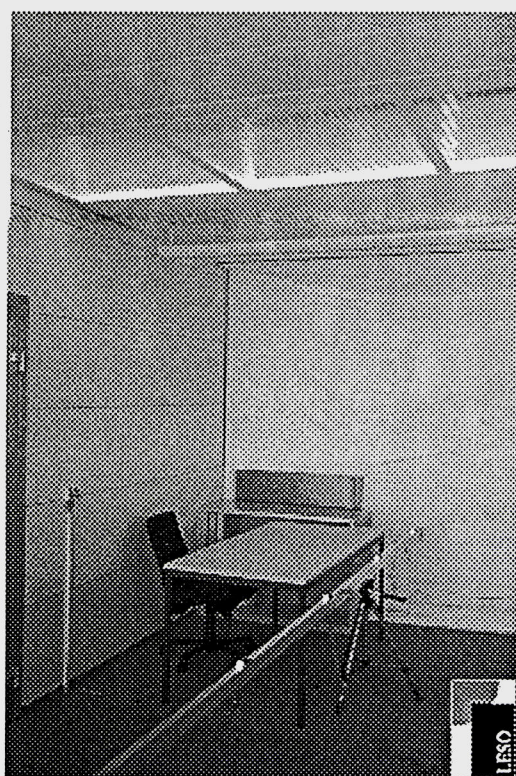


Fig. 2.a — Vue du collecteur en façade



2.b — A l'intérieur, par ciel couvert

Le module servant de référence est équipé d'une façade en double-vitrage ; dans l'autre est construit un prototype de Plafond Anidolique. Son montage a nécessité deux opérations : d'une part la réalisation d'une façade métallique préfabriquée qui inclue le collecteur (cf. Fig. 2.a), et d'autre part, l'installation du faux plafond et des contre-pièces profilées qui soutiennent le conduit tapissé de feuilles d'aluminium anodisé, matériau dont le facteur de réflexion spéculaire s'élève à 0,9. Ce choix peut paraître toutefois en contradiction avec le but du projet, dans la mesure où l'élaboration de ce matériau nécessite de grande quantité d'énergie ($200 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$, 0,5 mm d'épaisseur). En fait, dans le cas d'une série, d'autres procédés pourraient être mis en œuvre, comme par exemple, le dépôt de couches minces (quelques microns) par voie chimique sur support moulé.

Afin de protéger les réflecteurs, il est indispensable de fermer le système à ses deux orifices. Côté extérieur, un double-vitrage assure une isolation standard ; côté intérieur, le vitrage est en acrylique pour une raison de sécurité. De plus, ce dernier est constitué d'une plaque double dans laquelle sont insérées des lamelles transparentes qui, placées dans la longueur du bureau, permettent de réduire les risques d'éblouissement dus aux reflets du soleil sur les flans du conduit.

La pénétration de la lumière est mesurée dans chacun de ces modules par une série de 7 capteurs d'éclairage placés horizontalement sur une rampe longitudinale (cf. Fig. 2.b), à la hauteur du plan de travail (0,75 m). Les conditions extérieures sont mesurées grâce à une tête de mesures placée sur le toit de l'un des modules. Cette dernière est composée de cinq capteurs, un horizontal et quatre verticaux parallèles aux côtés du module, et repose sur un socle fait d'une tôle noire alvéolée pour annuler l'effet des réflexions sur le toit. L'ensemble des capteurs est lu simultanément par une chaîne d'acquisition électronique. L'incertitude totale de mesure est inférieure à $\pm 3.5 \%$ pour tous les capteurs à l'exception de celui de l'éclairage horizontal extérieur pour lequel on a $\pm 2.5 \%$.

4. Mesure des performances

4.1 Facteur de lumière du jour

S'agissant d'augmenter la pénétration de la lumière naturelle par ciel couvert, la performance est caractérisée par le facteur de lumière du jour (rapport entre les éclairages horizontaux, à l'intérieur en un point donné, et à l'extérieur sur le toit). Les façades sont tournées vers le nord afin que la distribution de luminance du ciel qu'elles reçoivent soit la plus uniforme et stable possible. Une première série de 43 mesures est effectuée à des fréquences variables pendant une période de 40 minutes pendant laquelle l'observation visuelle indique que le ciel est nuageux. Un contrôle plus reproductible est obtenu par une sélection basée sur un indicateur de symétrie du ciel (v) : le rapport de l'écart-type des quatre éclairages verticaux sur leur moyenne. Ce paramètre a été choisi pour sa grande sensibilité vis-à-vis de la distribution de luminance du ciel lorsque le soleil est occulté. L'analyse des variations de v pour diverses conditions extérieures nous a conduit à adopter le critère suivant : le ciel est considéré comme complètement couvert si v est inférieur à 10 % [7]. La Figure 3 présente la variation du facteur de lumière du jour en fonction de la distance à la fenêtre dans chacun des modules, obtenues en moyennant toutes les séries de mesures sélectionnées.

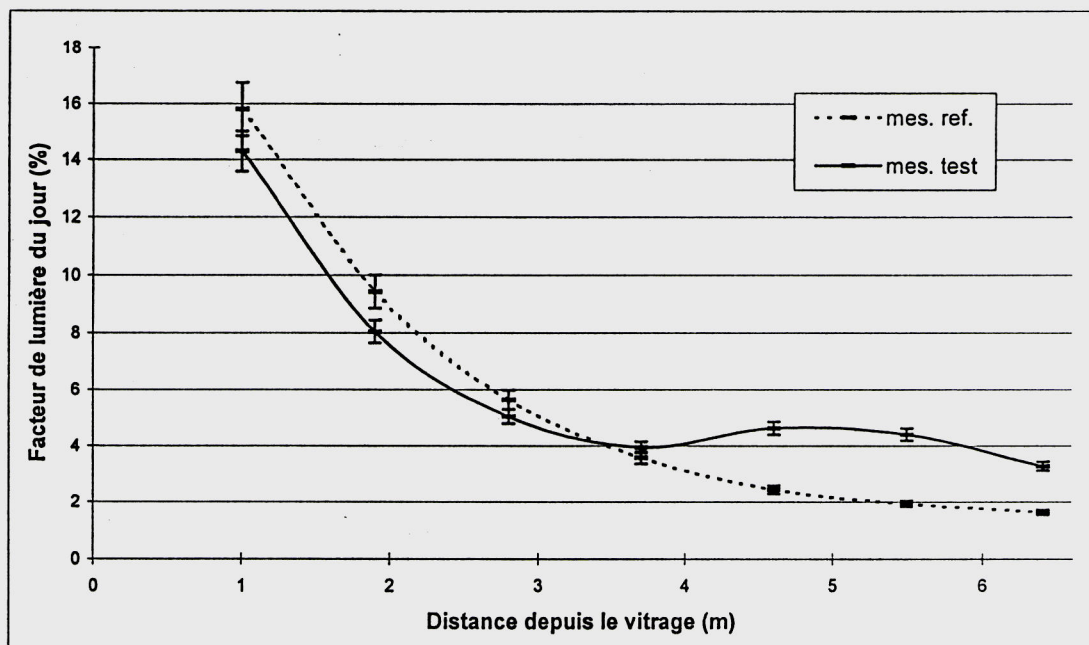


Fig. 3 — Mesure des profils du facteur de lumière du jour.

On constate une nette augmentation du facteur de lumière du jour au fond du local muni du Plafond Anidolique. Caractérisant ce niveau par la moyenne des valeurs mesurées sur les quatre capteurs les plus profonds, de 3,7 à 6,4 m, on obtient 2,40 % dans le module référence et 4,05 % dans celui de test, soit un niveau 1,7 fois plus élevé. Ce qui veut dire que, bien que le Plafond Anidolique occupe un peu moins d'un cinquième de la hauteur du "vide lumière" de la façade, il apporte en fond de pièce pratiquement autant de lumière que la fenêtre elle-même. On observe, de plus, que l'ombrage fait par l'avancée du collecteur a un effet bénéfique puisqu'il adoucit l'éclairage généralement trop important de la zone située derrière la fenêtre.

4.2 Economie d'énergie en éclairage

Des économies d'énergie sont prévisibles à trois niveaux : en thermique grâce aux gains solaires supplémentaires dus au collecteur, en climatisation grâce à son effet d'ombrage, et enfin, en éclairage ; la présente étude se borne à l'évaluation de ce dernier. Dans le domaine tertiaire, la majeure partie de cette consommation a lieu pendant la journée lorsque le ciel est couvert.

Afin d'éviter l'influence de l'utilisation des stores, les modules sont orientés vers le nord. Les mêmes dispositifs d'éclairage électrique équipent les deux modules : deux luminaires rectilignes suspendus, disposés au premier et troisième quart de la profondeur du local (cf. Fig. 1), délivrant uniquement un flux direct. Chacune de ces rampes est munie de deux tubes fluorescents de 36 W et d'un ballast électronique. Les bureaux restant inoccupés, le contrôle des luminaires est obtenu grâce à un système d'asservissement qui module la puissance d'alimentation en fonction de la lumière du jour. Chaque luminaire est équipé d'un régulateur indépendant, qui fonctionne en boucle fermée avec une sonde photosensible fixée au plafond légèrement en retrait du luminaire et tournée vers le fond du local. Ces sondes sont réglées de telle manière que, sans lumière du jour, l'éclairage sur le plan de travail se trouve à 300 Lux, plus ou moins 15 %. L'éclairage est automatiquement enclenché à 8:00 et déclenché à 18:30, heures légales. De plus, les régulateurs ayant une fonction de déclenchement automatique après 15 minutes de lumière du jour suffisante, l'éclairage doit être enclenché à nouveau l'après-midi.

La précision de la mesure de l'énergie est de 1 Wattheure ; l'ensemble des données, énergie et éclairage, est collecté toutes les 10 minutes. Ces mesures ont été conduites pendant 12 jours, étalés sur une période de 14 semaines de fin février à début juin ; l'économie atteinte représente 33 % de l'énergie consommée dans la pièce de référence. Cette valeur est en accord avec la prédiction faite en utilisant les mesures du facteur de lumière du jour (cf. § 4.1) à partir de l'abaque de la recommandation de l'Association Suisse des Electriciens (SEV 8911.1989), qui décrit la disponibilité moyenne de lumière par temps couvert en Suisse, l'essentiel de la consommation ayant en effet lieu par ciel couvert [7]. Il faut d'autre part relativiser ce résultat, puisque l'économie serait en pratique dépendante du comportement des usagés, tant à cause de la manipulation des stores que de l'importance des effets psychologiques de l'éclairage (cf. partie II de cette étude).

5. Remerciements

Les auteurs remercient M. A. Müller, architecte en charge de la réalisation du prototype, ainsi que Ms U. Meierhoffer et P. Loech pour leurs contributions à la mise en œuvre des installations. Cette recherche a été financée par l'Office Fédérale pour l'Education et la Science.

6. Conclusions

La construction d'un prototype de Plafond Anidolique a permis de démontrer la viabilité de l'utilisation intensive de la lumière naturelle pour l'éclairage d'intérieur dans une région à climat tempéré (prédominance du ciel couvert). Les mesures montrent que, pour une pièce de 6,6 m de profondeur, le niveau du facteur de lumière du jour moyen sur la moitié intérieure est multiplié par 1,7. Il a été mesuré que ce gain peut réduire d'un tiers la consommation d'électricité pour l'éclairage. De plus, l'impact de ce système sur les performances visuelles de l'occupant est clairement positif, comme le montrent les tests rapportés en partie II de cette communication.

7. Bibliographie

- [1] : Manuels RAVEL 329.1 à 4, Resp. Proj. Scartezzini J.-L., BfK, Berne, 1993 et 1994.
- [2] : R. Compagnon, J.L. Scartezzini, B. Paule, *Application of Nonimaging Optics to the Development of new Daylighting Systems*, ISES Solar World Congress, 1993, Budapest, Hungary.
- [3] : J.L. Scartezzini, B. Paule, R. Compagnon, G. Courret, *Espace modulaire de démonstration en éclairage naturel*. SLG'96, Rapport de la journée de l'Association Suisse de l'Eclairage, pp 87-101, Berne, Suisse, Octobre 1996.
- [4] : W. T. Welford and R. Winston *Nonimaging Optics*, Academic Press, USA, 1989.
- [5] : N. Ruck and S.C.J. Smith, *The Passive Daylighting of Building Interiors*, Architectural Science Review, Vol. 31, pp.87-98, 1988.
- [6] : Armin Zastrow, *The Physics and Applications of Fluorescent Concentrators : a Review*, SPIE Proceedings, Vol. 2255, 18-22, Freiburg, Germany, April 1994.
- [7] : G. Courret, J.L. Scartezzini, D. Francioli, J.J. Meyer, *Side-lighting of buildings — design and experimental assessment of a new type of light-duct : the Anidolic Ceiling*, publ. à venir.
- [8] : G. Courret, R. Compagnon, J.L. Scartezzini, *Anidolische Decke*. LICHT'96 : Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz, Tagungsberichte, pp 466-71, Leipzig, Germany, October 1996.