ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

98-24

LESO-PB

Protection solaire anidolique tridimensionnelle

Courret G.
Scartezzini J.-L.

10. Schweizerisches Status Seminar ETH Zurich

1998 - Septembre

G. Courret, J.-L. Scartezzini, *Protection solaire anidolique tridimensionnelle*, 10. Schweizerisches Status-Seminar Energieforschung im Hochbau EMPA-KWH Bericht, pp. 101-108, ETH-Zürich, Suisse, 1998.

Protection solaire anidolique tridimensionnelle

Courret Gilles, Scartezzini Jean-Louis
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1015 Lausanne, Suisse
Tél.: ++.41/ 21.693.55.53, Fax: ++.41/ 21.693.55.50
E-mail : Gilles.Courret@epfl.ch

Zusammenfassung

Das hier vorgestellte anidolische (nicht-bildliche) System erlaubt eine Richtungskontrolle des in das Gebäude eindringenden Tageslichtes. Es besteht aus einem steifen Raster mit wabenähnlichen, hohlen Zellen aus metallisiertem Kunstoff und kann als fixer Lichtleiter mit Winkelselektivität für jahreszeitliche Regulation angewendet werden, wo eine Öffnung vorallem der Sonnenenergienutzung dient (nicht transparent), oder, auf einem beweglichen Rahmen, als Lichtstromdeflektor über einem Oberlicht.

Ray Tracer-Berechungen haben gezeigt, dass die dreidimensionale anidolische Optik einen asymmetrischen Winkelsektor und damit eine Anpassung des Systems an die Fassadenorientierung erlaubt. Die Komplexität der entsprechenden Reflektorform zieht allerdings Fabrikationsschwierigkeiten mit sich. Eine Prototypserie hat dennoch erlaubt, die Machbarkeit und Lichtausbeute eines solchen Systems zu untersuchen. Messungen in einem Raum mit Testfassade haben positive Resultate im Vergleich zu einer Lamellenstore gezeigt.

Résumé

Le concept présenté ici est un dispositif anidolique (optique non imageante), qui permet un contrôle directionnel de la pénétration de la lumière dans le bâtiment. Il s'agit d'un réseau rigide de cellules creuses faites en plastique métallisé. Ce système peut être appliqué en tant que claustra fixe pour couvrir une ouverture destinée au captage de l'énergie solaire, le contact visuel avec l'extérieur s'en trouvant perturbé. Il peut également être utilisé comme déflecteur lumineux placé en imposte supérieure, le système devant dans ce cas être monté préférablement de manière mobile.

Des calculs de lancer de rayons ont montré que l'optique anidolique tridimensionnelle permet d'adapter le système à n'importe quelle orientation de façade, ce qui constitue le caractère innovant du dispositif. Ceci introduit en contrepartie une complexité de forme qui engendre des difficultés de fabrication. La réalisation d'une série prototype a permis néanmoins d'étudier la faisabilité et l'efficacité d'un tel dispositif. Des mesures réalisées dans un local de grandeur nature, muni d'une façade expérimentale, ont conduit à des résultats positifs en comparaison avec un store vénitien de standard supérieur.

L'aspect innovant de ce système réside dans l'emploi d'optique 3D ; celle-ci permet premièrement de mieux diffuser le rayonnement direct, et deuxièmement, utilisant un CPC asymétrique, d'obtenir un secteur d'admission adapté à l'orientation de la façade et à la variation diurne de la température extérieure (plus de flux admis le matin que l'après-midi). Un CPC 2D idéal (système linéaire) produit une fonction de sélectivité angulaire parfaitement rectangulaire ; ce n'est pas le cas du dispositif 3D du fait de certains des rayons non médians [Wel89]. L'avantage déterminant de cette innovation réside dans le fait que, contrairement aux optiques 3D, les systèmes linéaires ne sont pas appropriés aux façades non orientées au sud ou au nord : l'axe de translation de l'élément d'admission doit en effet être incliné dans le plan équatorial, comme proposé par Kuhnke [Kuh94], ce qui induit d'une part une contrainte architecturale forte (impact esthétique sur la façade), et complique considérablement d'autre part la réalisation du dispositif à cause du décalage des éléments d'admission et d'émission.

3. Prototype expérimental

L'objet de la présente étude est limitée à un essai de faisabilité ; le prototype est destiné à l'implantation sur une façade orientée au sud et située sous une latitude de 47°. Le secteur d'admission désiré est délimité par l'embrasure et par la hauteur de coupure (σ) en fonction de l'azimut (λ) : $\sigma = ½ \cdot \delta_{max} \cdot \cos(\lambda+30°)$ exprimée dans un repère équatorial, δ_{max} étant la déclinaison géocentrique maximale (cf. Fig. 2).

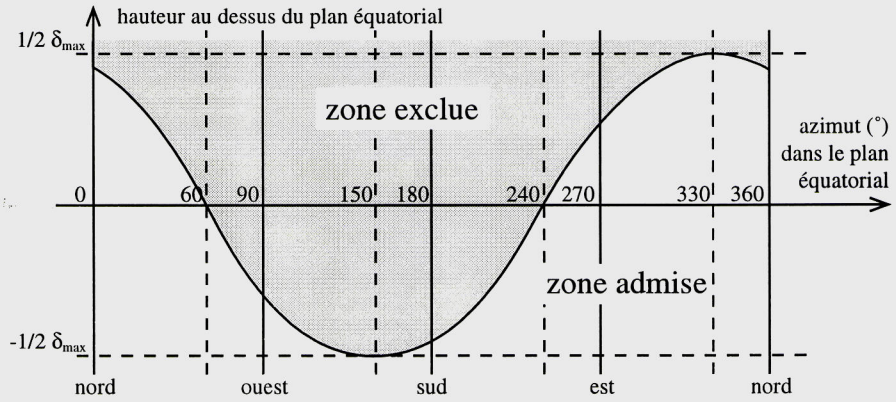

Figure 2. Hauteur de coupure – Le déphasage tient compte de la variation diurne de température.

Le secteur d'émission visé est défini par une ellipse interceptant les plans vertical et horizontal aux angles respectifs suivants : [0°, 45°] et [-25°, +25°]. La forme résultante est d'abord testée par calcul de lancer de rayons (cf. Fig. 3).

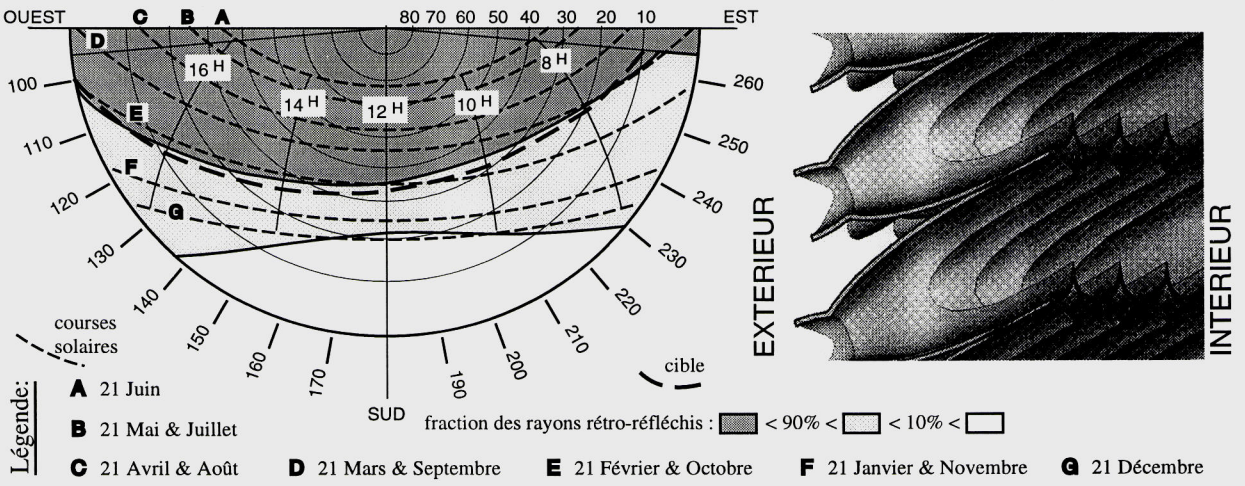

Figure 3. Comparaison de la sélectivité angulaire visée et celle obtenue par simulation numérique (à gauche), section du modèle informatique (à droite)

Une série de 20 pièces (31 x 35 x 10 cm) percées de 48 trous chacune a été fabriquée en plastique par moulage à froid. Le moule, en silicone, est issu d'une pièce mère obtenue par stéréolithographie à partir d'un modèle informatique. Les pièces sont métallisées par dépôt sous vide d'une couche de quelques microns d'aluminium. Bien que la pièce mère ait été polie, la surface des pièces présente une certaine rugosité du fait de difficultés de démoulage. Plusieurs couches de vernis, appliquées avant et après métallisation, ne surfirent pas pour corriger complètement cette dernière. La simple observation de l'effet de la lumière direct au travers montre que le prototype est cependant suffisamment sélectif pour assurer au moins sa fonction de protection contre les risques d'éblouissement (cf. Fig. 4).

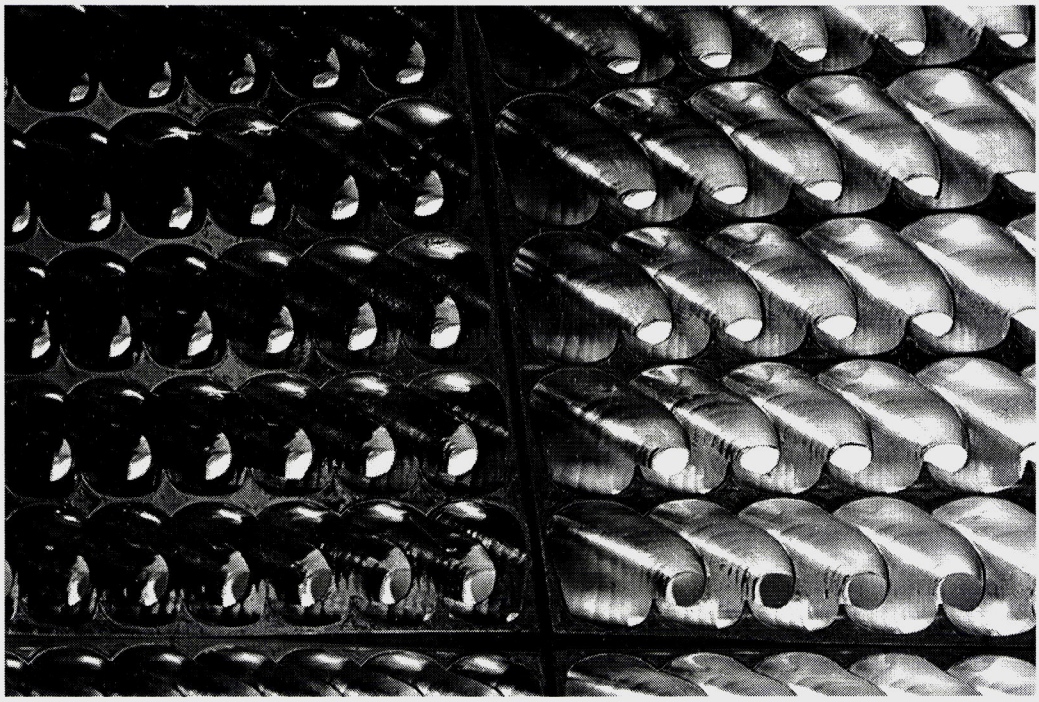

Figure 4. Photographie prise à la sortie du système anidolique : les cellules n'apparaissent brillantes que si la direction de vision se trouve dans le secteur d'émission.

4. Mesure de transmission

L'une des pièces a été sélectionnée pour sa qualité de surface, afin de mesurer son facteur de transmission en fonction de l'incidence du rayonnement. Cette mesure, réalisée à l'aide d'une sphère intégratrice de 1,5 m de diamètre, montre que (cf. Fig. 5) :

1. Le facteur de transmission atteint 26 % dans la partie centrale de la zone d'admission. Cette valeur est plus faible que la fraction de rayons rétro-réfléchis (cf. Fig. 3, gauche) ; elle correspond environ, en effet, à la fraction de section efficace des orifices sous l'incidence la plus favorable.
2. La différence entre mesure expérimentale et angles théoriques d'admission est comprise entre -15° et +3° (cf. Fig. 5). Les problèmes de démoulage affectèrent le moule plus particulièrement au niveau des CPC d'admission ; ils seraient donc responsable d'une part importante de l'écart mesuré, comme le corroborent les simulations numériques par lancer de rayons de la propagation de la lumière dans ces éléments (différence obtenue : ±3°). Il est néanmoins difficile de généraliser ce type de résultat dans la mesure où, comme le confirment les simulations numériques, plus une variation azimutale de l'angle d'ouverture est abrupte, plus l'écart avec la zone d'admission effective est localement prononcé. Cet effet de lissage, qui est du à certains des rayons non médians, peut être anticipé lors de la conception grâce aux essais effectués par simulation numérique : une itération a été menée dans le cas présent.

3. La forme de la zone d'admission effective possède globalement le profil recherché : sa dissymétrie est clairement observable (cf. Fig. 5). Dans le plan médian d'azimut 90° par exemple, le seuil de 10% est franchi à une inclinaison de 34° côté occidental et de 50° côté oriental.

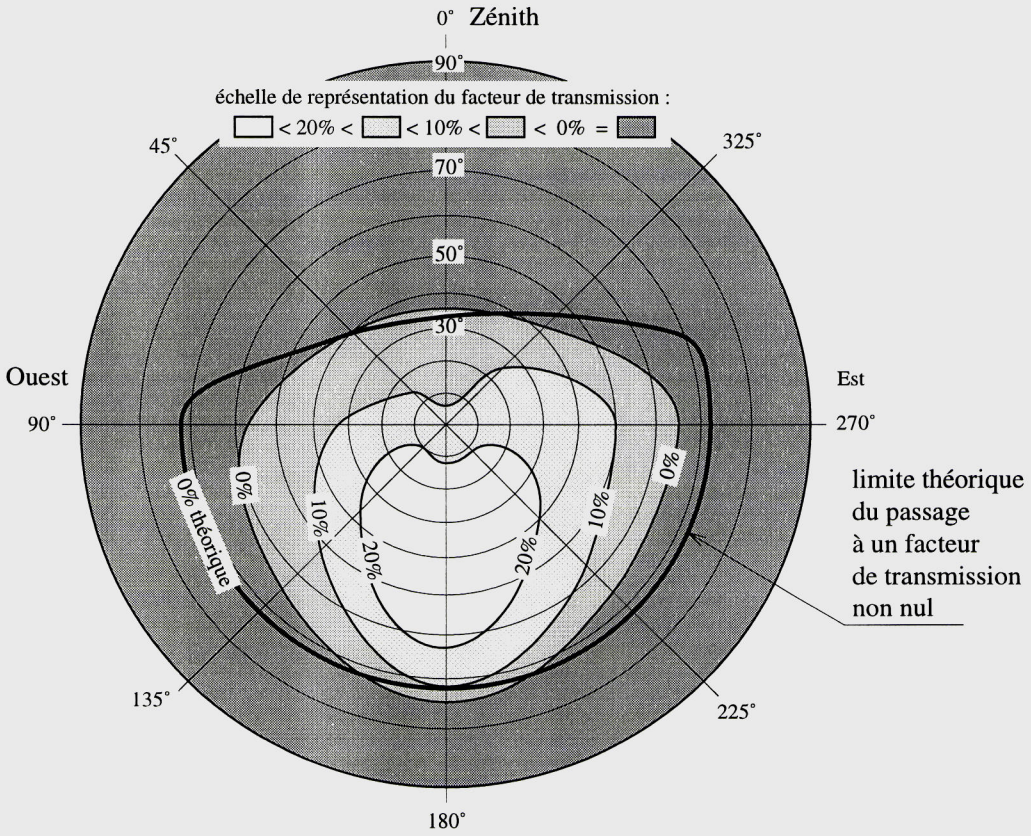

Figure 5. Comparaison des caractéristiques angulaires mesurée et théorique de l'admission de l'élément anidolique 3D (direction du rayonnement incident repérée par rapport à la normale au prototype et par son azimut par rapport à l'axe vertical du prototype)

La transmission des rayons solaires en période hivernale (hauteur solaire à midi de 20 à 40°) étant trop faible, il a été décidé d'incliner les éléments vers le haut d'un angle de 18° (cf. Fig. 6).

5. Mesures expérimentales

Un module d'expérimentation en lumière naturelle (dimensions intérieures : 6,5 x 3 x 2,65 m) a été équipé du prototype, couvrant l'imposte de l'une de ces deux façades (tiers supérieur de l'ouverture totale ; cf. Fig. 6, gauche). A l'intérieur, ce module possède des caractéristiques photométriques suivantes :

- superficie vitrée = 26% de la surface du sol ; facteur de transmission = 0,8 (double-vitrage).
- facteurs de réflexion des murs et du plafond = 0,8
  du sol = 0,15

Le module pouvant être orienté dans toutes les directions, la face opposée est utilisée comme référence, un rideau opaque occultant le côté non utilisé. L'évaluation est réalisée par comparaison avec un store vénitien blanc de standard élevé (lames à inclinaison croissante de haut en bas).

La pénétration de la lumière est mesurée par 7 luxmètres posés horizontalement sur une rampe placée à hauteur de table (75 cm) dans l'axe longitudinal du module. Par ciel serein, tous stores complètement fermés, on observe ce qui suit :

1. A proximité du vitrage, une protection visuelle élevée est obtenue grâce au store à rouleau qui couvre la fenêtre, c'est à dire les deux tiers inférieurs de l'ouverture totale (cf. Fig. 6, gauche) ; il s'agit en effet d'un store en tissus opaque brun dont le facteur de transmission est inférieur à 4%. Malgré l'importance de cette obstruction, un poste de travail situé en arrière bénéficie d'un éclairage naturel substantiel, le profile de l'éclairement étant pratiquement uniforme. L'élément anidolique accroît en effet l'éclairement en fond de pièce en déviant la lumière du soleil vers le haut, mettant ainsi à profit ses réflexions sur le plafond et le mur du fond. L'éclairement mesuré à cet endroit atteint en période hivernale un niveau comparable à celui mesuré à proximité de la fenêtre malgré que l'aménagement de la pièce ne soit pas favorable (cf. Fig. 7). Les luminaires sont en effet suspendus, ils constituent donc un obstacle au passage de la lumière. Le plafond n'est muni, d'autre part, d'aucun réflecteur particulier : il est constitué de plaques en métal laqué dont le facteur de réflexion spéculaire est de 0,03. Avec la façade de référence, aucune remonté du profil ne se produit.

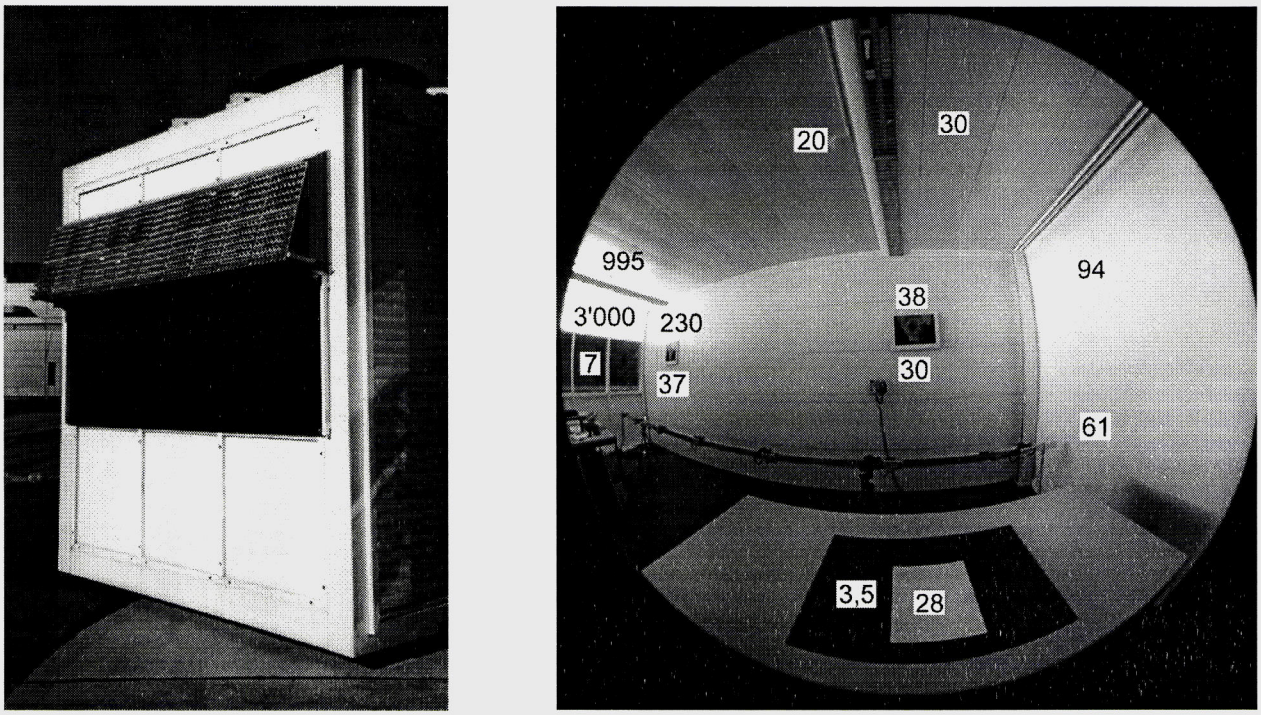

Figure 6. Vue de la façade expérimentale (à gauche), champ de vision au bureau situé en fond de pièce – luminance en Cd/m^2 (à droite)

2. La comparaison des éclairements obtenus pour deux mêmes hauteurs solaires, mais deux azimuts symétriques, fait apparaître une différence sensible, l'éclairement plus élevé étant celui du matin. Dans le cas d'une hauteur de 34° et d'un azimut de ±30°, la moyenne de l'éclairement sur toute la profondeur de la pièce diffère de 8% (facteur de transmission de 2% et 6%). En comparaison, aucun ajustement diurne de la transmission du flux solaire direct n'est bien entendu observable dans le cas de référence.
3. Le niveau d'éclairement intérieur est nettement plus faible en été qu'en hiver, la remonté du profil en fond de pièce est alors pratiquement absente. Considérons les éclairements obtenus pour deux positions solaires de même azimut (0°) et de hauteur différente (29° et 65°, cf. Fig. 7). Dans le cas du module de test, on constate que la moyenne de l'éclairement calculée sur tout le profil est divisée par un facteur 3,2 alors que l'éclairement sur la façade n'est divisé que par 2,1. L'effet de protection solaire saisonnière est ainsi vérifié. Par comparaison avec le cas

de référence, la moyenne des éclairements mesurés aux trois capteurs les plus en arrière est augmentée de 37 % dans le cas de la position solaire basse et réduit de 47% dans l'autre cas : ceci est conforme à l'objectif fixé initialement puisque la fonction de protection contre les risques de surchauffe a été placée en première priorité, devant les besoins en éclairage. L'éclairement en période estival s'avère cependant insuffisant. Pour un bâtiment d'inertie thermique conventionnelle, il serait probablement possible de rehausser sensiblement la hauteur de coupure sans pour autant générer de risque thermique.

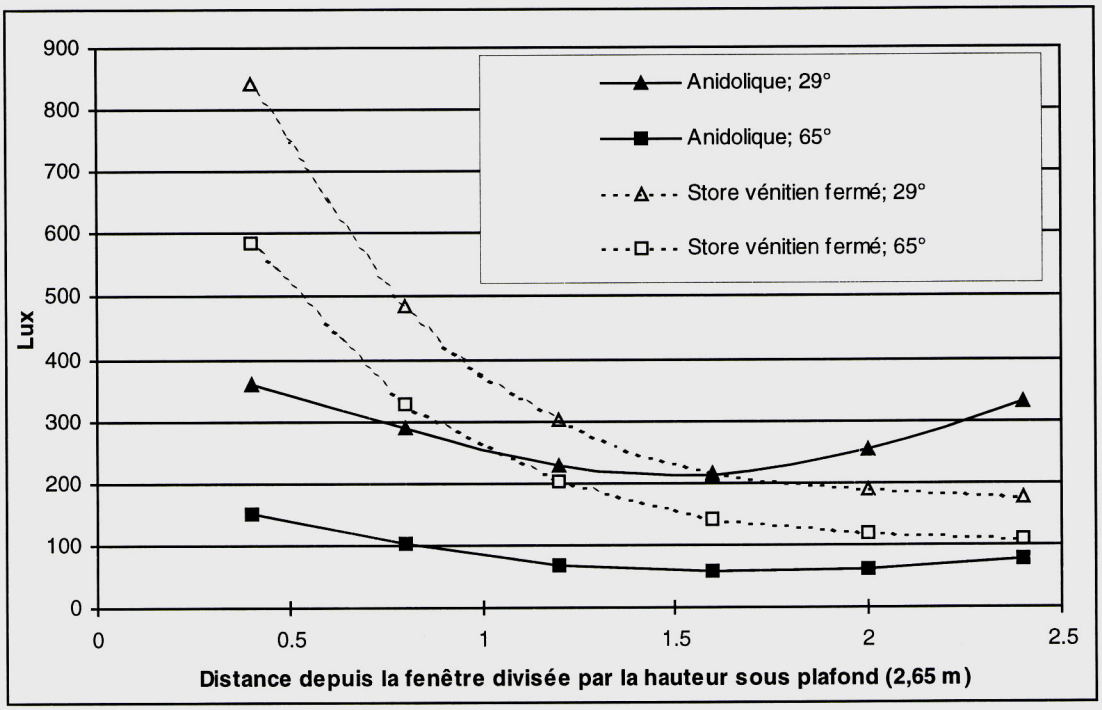

Figure 7. Pénétration de la lumière naturelle lorsque la façade est ensoleillée et les stores baissés – pour deux hauteurs du soleil : 29 et 65° (l'éclairement sur la façade étant respectivement de 85 et 41 Klux)

Par ciel couvert, le store central est relevé, la Protection Solaire Anidolique restant en place devant l'imposte. Côté référence, le store vénitien n'est remonté que jusqu'au deux tiers de la hauteur vitrée de façon à ne plus couvrir qu'une surface identique à celle du système anidolique. On mesure alors que la moyenne des éclairements mesurés aux trois capteurs les plus en arrière est augmentée de 10%. Cette amélioration n'est toute fois pas suffisante pour apporter un effet significatif sur l'autonomie en éclairage naturel de ce local.

La qualité de l'environnement lumineux a été évaluée par ciel serein, les façades étant ensoleillées et tous les stores fermés. Deux postes de travail sont considérés, l'un à 1 m de la fenêtre, l'autre 5 m plus loin. On observe ce qui suit :

1. Les deux façades procurent un bon niveau de protection contre l'éblouissement à proximité de la fenêtre.
2. Vue du fond de la pièce, toutefois, la luminance de la partie haute de la prise de jour est très élevée devant celle de la tâche visuelle. C'est le cas aussi du store vénitien, ajouré dans sa partie supérieure du fait de l'inclinaison progressive des lames. Tant que ces sources sont situées dans le bord du champ visuel, le risque d'éblouissement qu'elles génèrent est suffisamment faible par rapport à l'éclairement qu'elles apportent en contrepartie sur du plan de travail en fond de pièce. Dévier entièrement leur flux vers un plafond muni d'aucun réflecteur particulier aurait en effet un impact négatif important sur cet éclairement. Le système anidolique améliore ce compromis en canalisant le flux transmis (cf. Fig. 4) : premièrement, la

luminance moyenne de l'imposte est réduite d'environ 20%, deuxièmement, l'éclairement du plafond à proximité de cette dernière est plus important, réduisant ainsi le contraste avec l'ouverture (cf. Fig. 6, droite).

3. Le système anidolique permet d'augmenter de manière significative la luminance du mur du fond dans sa partie haute : pour une personne assise au poste arrière, cette luminance est plus que doublée (cf. Fig. 6, droite) ; le rapport de luminance entre les moitiés supérieure et inférieure du champ visuel s'en trouve amélioré, apportant ainsi un effet psychologique positif sur l'impression visuelle dégagée par l'éclairage du local.

6. Conclusion

La Protection Solaire Anidolique tridimensionnelle est un élément rigide, monté en façade, qui réalise le contrôle saisonnier de la pénétration du rayonnement solaire grâce à une sélectivité angulaire prédéterminée. Cette propriété est également utilisée pour diriger le flux sortant de manière à éviter les risques d'éblouissement tout en augmentant la profondeur de pénétration de la lumière.

La réalisation d'un prototype expérimental a permis de tester la faisabilité d'un tel dispositif. Malgré des difficultés de fabrication (démoulage), la mesure du facteur de transmission montre que la zone d'admission obtenue concorde globalement avec celle qui était définie par la théorie.

L'évaluation du prototype, réalisée sur des modules en grandeur nature, a permis de confirmer ces performances. Installé en imposte, la protection solaire de la façade expérimentale est complétée par un store en tissus opaque. En comparaison avec une protection solaire standard (store vénitien), le dispositif anidolique permet d'accroître le niveau d'éclairement naturel en fond de pièce dans les conditions hivernales (courses solaires basses). Un effet de sélectivité angulaire, correspondant aux différentes conditions de température extérieures (matin/soir) a, par ailleurs, aussi été vérifié.

Ce dispositif présente une alternative avantageuse aux protections solaires conventionnelles à lames fixe. Contrairement aux dispositifs à optique existants (2D), son principe de conception peut être appliqué quelle que soit l'orientation de la façade considérée. Monté sur glissière, il procure d'autre part une mobilité d'automatisation simple tout en offrant un contrôle directionnel de la lumière bien supérieur à celui d'un store conventionnel. D'autres techniques de fabrication doivent, toutefois, être considérée afin de contourner les difficultés techniques rencontrées lors de la réalisation de ce premier prototype expérimentale.

7. REFERENCE

[Kuh94] K. Kuhnke and G. Hammer, Directional selective transmission with cylindrical lenses, Solar Energy, Vol. 52, N° 1, pp. 127-36, 1994.

[Wel89] W. T. Welford and R Winston, Nonimaging Optics, Academic Press, USA (1989).