

TRACÉS

01/02

LUMIÈRE URBAINE

131^e année 19 Janvier 2005
Bulletin technique de la Suisse romande



Un outil numérique au service de l'éclairage naturel

La protection de l'environnement fait aujourd'hui partie des préoccupations majeures de notre société; dans ce contexte, la nécessité de réduire la consommation énergétique dans le bâtiment se place comme une priorité. Dans le domaine de l'éclairage, et plus spécialement de la lumière naturelle, des recherches poussées cherchent à optimiser l'utilisation de la lumière du jour pour économiser de l'énergie [1]¹ et mettre à profit ses qualités dans le domaine du confort et du bien-être.²

L'éclairage artificiel des bâtiments représente entre 15% et 40% de leur consommation énergétique totale. Les possibilités d'économie d'énergie à travers une utilisation plus intense et plus appropriée de l'éclairage naturel [2] sont donc considérables, d'autant plus si l'on contrôle également les gains solaires, réduisant ainsi de manière significative les besoins en chauffage et air conditionné. Par ailleurs, la lumière naturelle possède des qualités remarquables en ce qui concerne le rendu fidèle des couleurs et le confort visuel. De même, bénéficier d'une vue vers l'extérieur est un élément fondamental pour le bien-être, au même titre que l'expérience du « temps qui passe » : apercevoir la variation des conditions lumineuses au cours d'une journée fait partie de nos besoins biologiques. Enfin, la productivité des occupants d'un bâtiment peut être améliorée s'ils bénéficient de places de travail éclairées à la lumière du jour [3].

Pour optimiser l'utilisation et la distribution de la lumière naturelle dans un bâtiment, il faut connaître les propriétés de transmission des éléments qui composent les fenêtres, ou plus généralement les ouvertures vers la lumière extérieure. Lorsque ces éléments ne sont pas de simples vitrages mais

des vitrages avancés, des prismes par exemple ou encore des stores pare-soleil ou des dispositifs de réorientation de l'éclairage naturel, il est indispensable de disposer de données photométriques directionnelles détaillées. Ces caractéristiques de transmission sont décrites par ce qu'on appelle la « fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de transmission » ou BTDF. Cette fonction existe également en réflexion et permet alors de caractériser des matériaux de revêtement, des surfaces réfléchissantes, peintures etc. ; elle est alors appelée « fonction bidirectionnelle de distribution du facteur de réflexion » ou BRDF. Ces fonctions complexes sont mesurées par un équipement photométrique idoine, le goniophotomètre bidirectionnel.

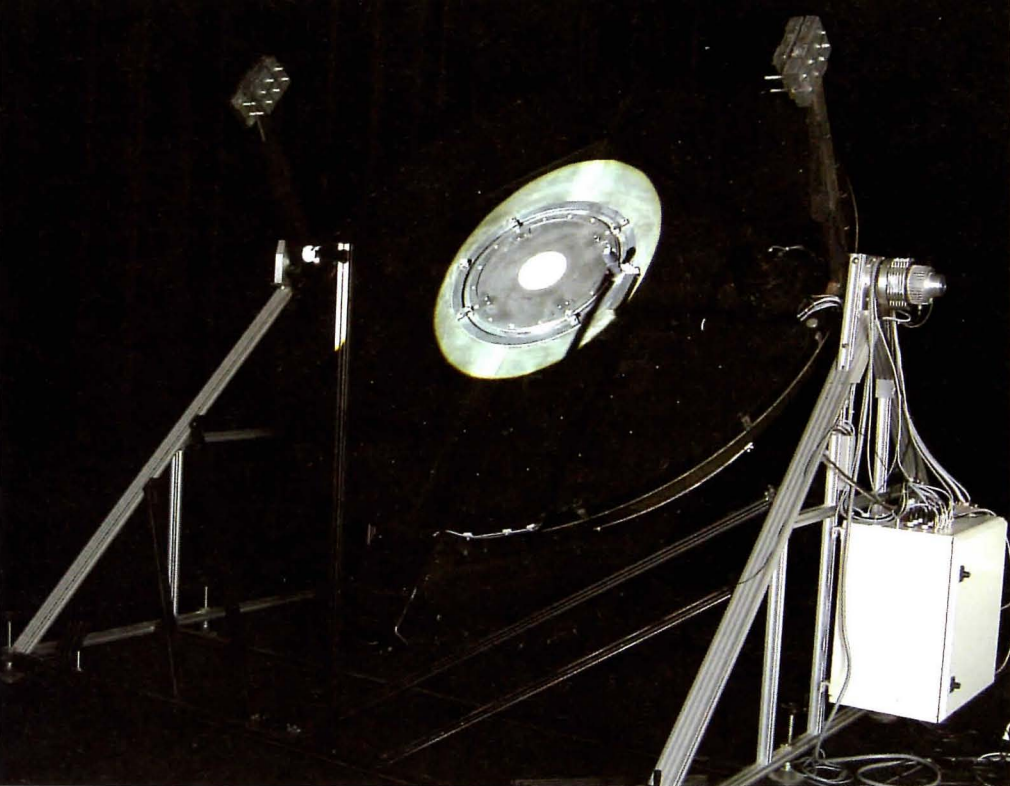
Un tel dispositif permet de mesurer la lumière selon des grandeurs angulaires, en fonction à la fois de la direction d'incidence ou d'entrée de la lumière (par exemple la direction du soleil sur le vitrage) et de la direction de sortie, c'est-à-dire la direction d'émergence après avoir traversé le matériau (ou après y avoir été réfléchi). Notons qu'un très grand nombre de directions de sortie doit être associé à une seule direction d'entrée, l'objectif étant de déterminer la distribution dans l'espace de toute la lumière transmise (ou réfléchi) pour chaque direction d'incidence donnée.

On a développé dans ce but un nouveau type de goniophotomètre bidirectionnel, basé sur des techniques d'imagerie numérique (fig. 1). Au lieu de faire fonctionner un détecteur mobile qui se déplace d'une position de mesure à l'autre (goniophotomètre classique, voir [4] et [5]), ce nouvel instrument utilise une caméra vidéo digitale calibrée (dite caméra CCD pour « Charge Coupled Device »), pointée sur un écran diffusant rotatif et de forme triangulaire.

Le principe est le suivant : plutôt que de déplacer la source lumineuse, on détermine la direction du rayonnement incident en inclinant le dispositif - et par conséquent l'élément analysé - d'une part autour d'un axe horizontal, et d'autre part en faisant tourner l'élément sur lui-même (fig. 2a). Une partie du rayonnement transmis ou réfléchi par l'élément analysé est émise vers l'écran triangulaire - le reste est absorbé par le cache noir qui englobe tout l'espace de mesure -

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

² Le présent article est rédigé d'après la thèse de doctorat réalisée par l'auteur au Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB) de l'EPFL : « Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems » (avril 2004). La thèse ainsi qu'une version raccourcie peuvent être téléchargées sur <http://lesomail.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_edu.html>.



afin d'être détectée par la caméra CCD (fig. 2b). Ainsi, après six rotations de 60° de l'écran et de la caméra, toute la distribution de lumière aura été détectée et sera donc connue, moyennant une série de calibrages et traitements de données appropriés.

En réflexion apparaissent plusieurs contraintes supplémentaires qui sont dues au conflit des faisceaux de lumière incidente et émergente, qui se retrouvent cette fois du même côté. Il faut par conséquent non seulement contrôler la pénétration du faisceau incident dans l'espace de mesure de manière à ce qu'il éclaire tout juste la surface de l'élément analysé (elle-même dépendante de l'inclinaison de ce dernier), mais aussi assurer le passage du faisceau à travers l'écran triangulaire, qui se trouve sur son chemin dans au moins une des six positions (dans toutes les six quand l'incidence est perpendiculaire à l'élément). Le goniophotomètre a été conçu de manière à répondre avec succès à ces contraintes (fig. 3) [6].

Ce principe de mesure, adopté par aucun autre goniophotomètre bidirectionnel à ce jour, présente plusieurs avantages,

notamment de réduire de manière importante le temps de mesure (par un facteur 100 ou plus) et de surmonter les problèmes dus aux forts gradients en lumière. Il permet de déterminer une fonction BTDF ou BRDF quasi continue, contrairement à une exploration conventionnelle point par point, où une interpolation entre les positions de mesure est nécessaire.

La caméra CCD noir et blanc utilisée ici remplace le détecteur de lumière conventionnel (photomètre); il faut donc la convertir en luminance-mètre³ à points multiples [7]. Pour cela, il s'agit tout d'abord de corriger sa sensibilité aux couleurs de manière à la rendre proche de celle de l'œil humain et à déterminer la relation entre les niveaux de gris apparaissant sur l'image digitale de la caméra et les valeurs de luminance auxquelles ils sont associés, cette conversion dépendant du temps d'exposition considéré. Ensuite, il faut associer les directions angulaires de transmission ou réflexion aux coordonnées des pixels sur les images, conversion qui dépend

³ La luminance est la quantité de lumière transmise (ou réfléchi) par unité de surface et par unité d'angle solide (angle « dans l'espace », qu'on peut associer à un cône, et qui définit la direction d'émission).

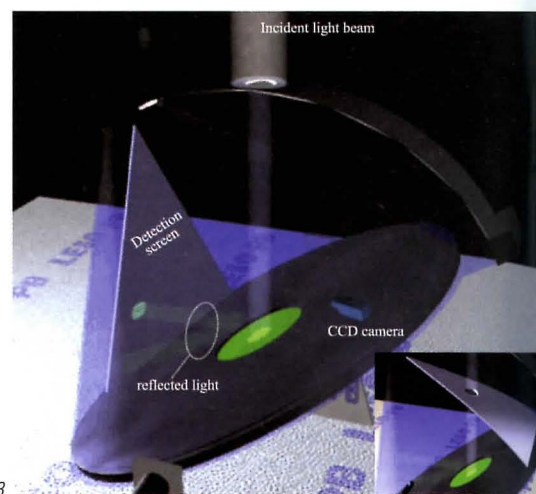
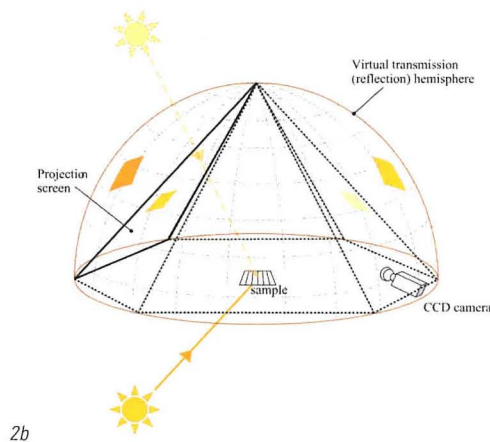
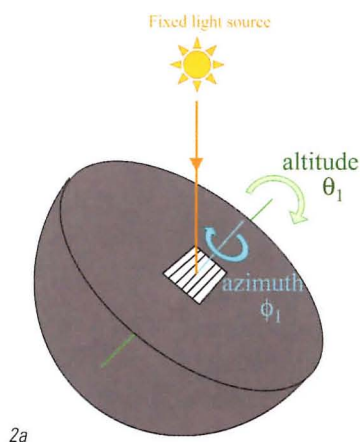
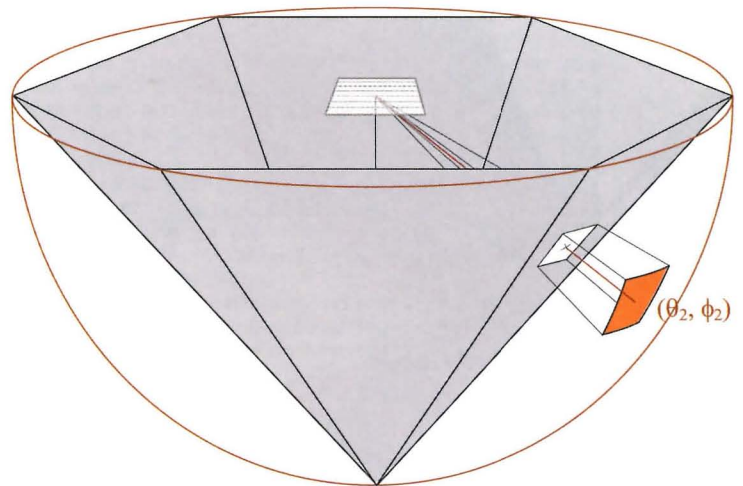


Fig. 1 : Goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique développé au LESO-PB de l'EPFL, dispositif expérimental

Fig. 2 : Principe de mesure (a : ajustement de la direction d'incidence ; b : système de détection de lumière)

Fig. 3 : Penetration du faisceau incident en mode réflexion

Fig. 4 : Séparation de l'espace de détection (a) et donc de l'écran (b) en secteurs



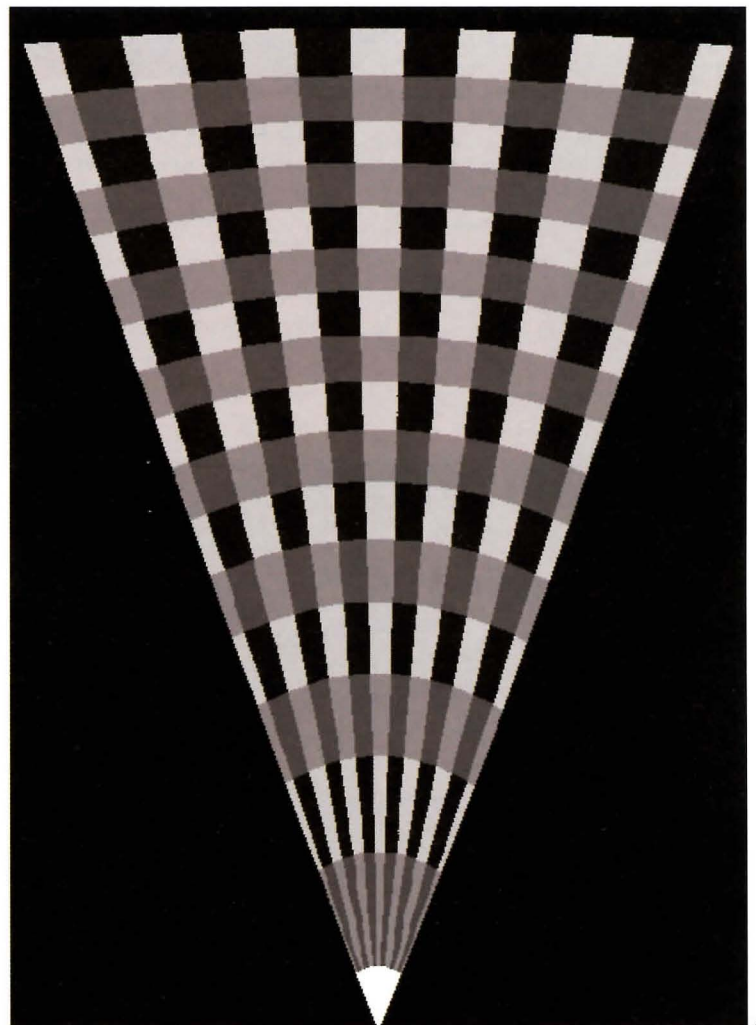
4a

de différents paramètres dont l'épaisseur de l'élément analysé et l'angle azimutal d'entrée de la lumière [8]. Par ailleurs, un certain nombre de corrections additionnelles s'avèrent nécessaires, comme par exemple la compensation du léger assombrissement observé sur les bords de l'image ou la faible - mais non nulle - divergence des rayons incidents, supposés parfaitement parallèles.

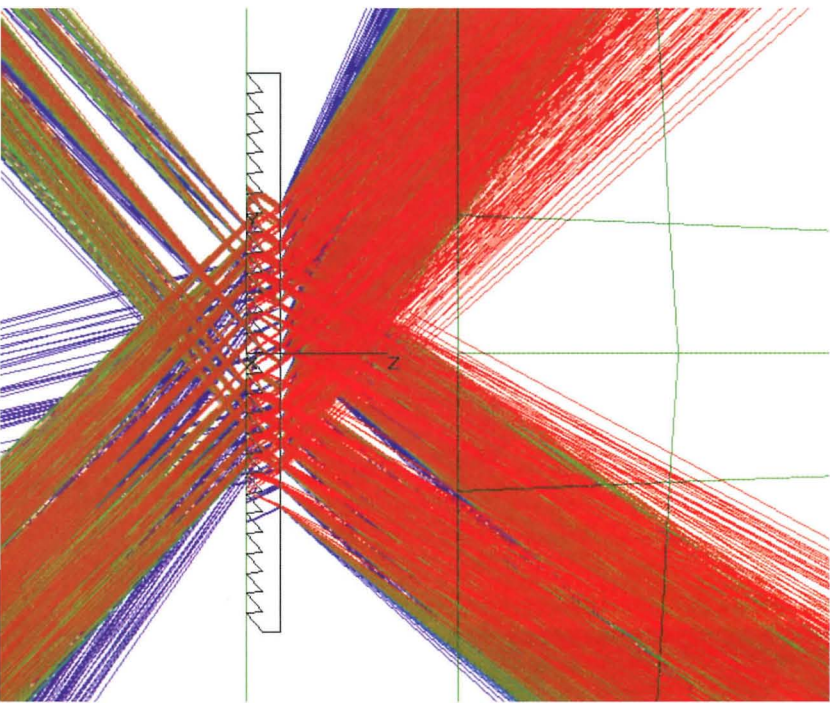
Des clichés sont pris à différents temps d'exposition à chacune des six positions de l'écran de projection. Pour chacun d'eux, on sélectionne les pixels de l'image qui ne sont ni sur-, ni sous-exposés, et on convertit leurs niveaux de gris en valeurs de luminance associées. Ces dernières sont à leur tour transformées en données BTDF ou BRDF, en compensant les effets de distance, de réflexion diffuse sur l'écran et d'inclinaison des rayons, et en divisant les résultats par la quantité de lumière reçue au même moment par l'élément analysé depuis la source. Ensuite, pour passer de cette information quasi-continue à un set de données fini donnant les valeurs BTDF ou BRDF selon un certain nombre de directions, on sépare l'espace de sortie en « secteurs » contigus (fig. 4a), centrés autour des directions qu'on cherche à caractériser et à l'intérieur desquelles on calcule la moyenne des valeurs BTDF ou BRDF, en séparant l'écran selon une grille angulaire (fig. 4b).

Ainsi, après avoir traité de manière similaire les six configurations du système « caméra + écran », l'ensemble de la distribution de lumière en transmission ou réflexion est connue ; ce processus est réalisé en quelques minutes pour une direction d'incidence, qu'il faut comparer à plusieurs heures pour une mesure conventionnelle point par point.

La validation exhaustive qui a été réalisée pour ces mesures conclut à un niveau de précision plus que satisfaisant de ces dernières ; ce niveau est atteint grâce au soin apporté aux différentes étapes de calibrage et de traitement des données, ce qui permet de démontrer les potentialités de l'imagerie numérique comme outil de mesure de la lumière naturelle.



4b



5

Entre autres approches adoptées pour cette validation, une méthode innovante et originale a permis d'élever le niveau de précision atteint dans la vérification des valeurs BTDF et BRDF : une copie virtuelle du dispositif, illustrée à la figure 5, a été réalisée à l'aide d'un logiciel commercial de tracé de rayons (un outil de calcul puissant permettant de suivre l'évolution de chaque rayon à travers les différents obstacles et altérations qu'il subit) ; plusieurs systèmes (prismes, stores vénitiens) ont ensuite été modélisés afin de comparer les résultats de simulation aux données bidirectionnelles obtenues de manière expérimentale (voir [9] et [10]). Les faibles différences observées ont permis de souligner la fiabilité du système de mesure décrit ci-dessus.

Comme exemple d'un système de fenêtre complexe, on peut citer celui d'un vitrage présentant des découpes horizontales parallèles (« Laser Cut Panel », développé en Australie) n'empêchant pas la visibilité horizontale vers l'extérieur mais permettant de réfléchir la lumière reçue du soleil vers le plafond, utilisé comme deuxième source de lumière naturelle (fig. 6) : les places de travail proches de la fenêtre ne souffrent alors plus des éblouissements et contrastes gênants inévitables avec un vitrage classique, l'atmosphère lumineuse à l'intérieur de la pièce est nettement meilleure et l'utilisation de l'éclairage artificiel (lampes, luminaires) peut être revue à la baisse.

Un autre exemple, peut-être plus conventionnel, est celui du store à lamelles, dont il est souvent très difficile de deviner les propriétés de transmission si on ne les mesure pas, vu le nombre important d'inter-réflexions possibles entre les lamelles. La figure 7 montre des photos de prototypes un peu



6

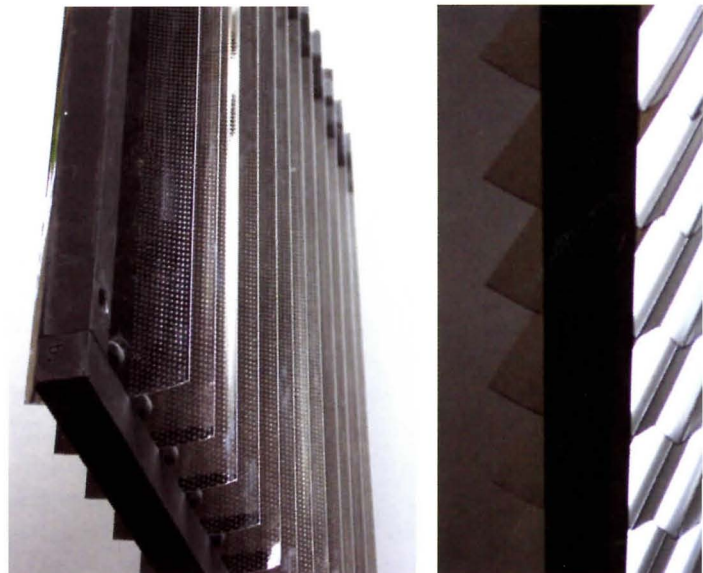


Fig. 5 : Goniophotomètre modélisé, affichage des rayons tracés à travers un prisme

Fig. 6 : Un « Laser Cut Panel » installé dans une salle de classe à Brisbane, Australie (Photo [1])

Fig. 7 : Exemples de stores à lamelles optimisés (prototypes Baumann-Hüppe AG) : lamelles miroir avec perforations (a), lamelles à profil optimisé (b), lamelles miroir avec dentelures (c) et visualisation graphique d'une BTDF (d)

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)

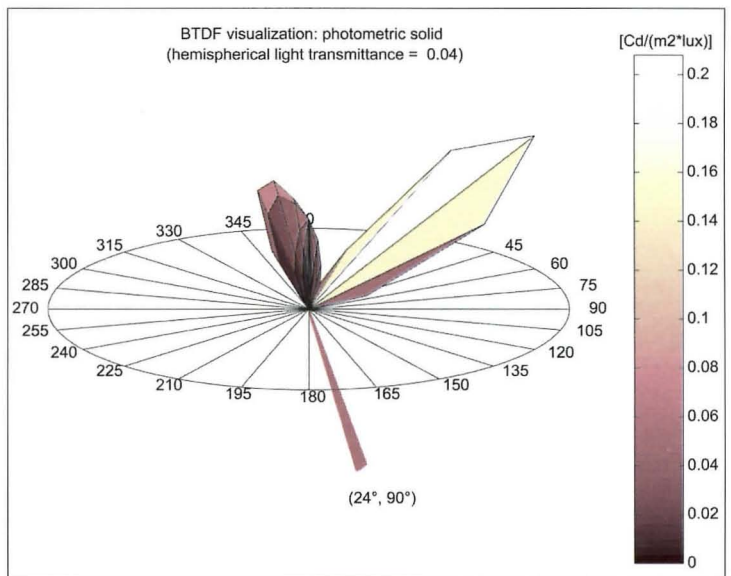
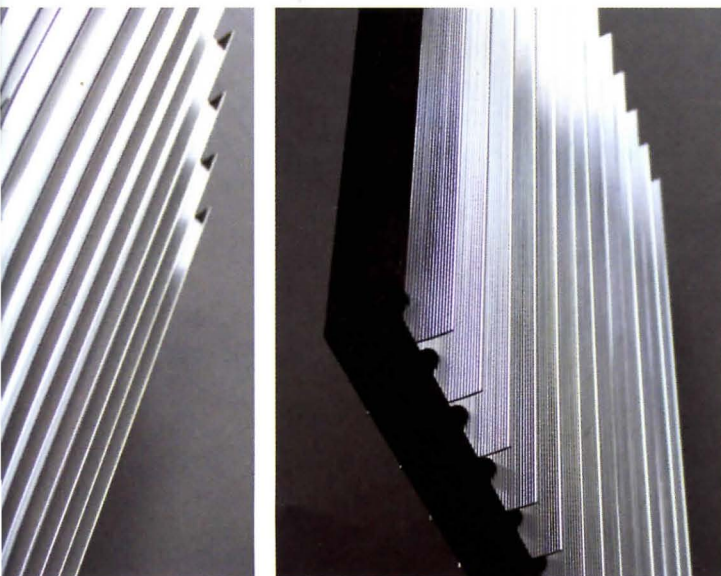
plus perfectionnés qu'un store à lamelles standard, puisqu'ils présentent des lamelles miroir perforées (7a), dentelées (7b) ou de profil particulier (7c).

A partir des BTDF ou BRDF de tels systèmes, il est possible d'établir des conclusions spécifiques sur des améliorations possibles au niveau de la forme ou des revêtements, pour aider les industriels à optimiser leurs produits. De plus, en établissant un catalogue précis des performances lumineuses de ces différents matériaux, l'architecte pourra choisir celui qui lui convient en se basant sur des critères objectifs et précis, et ceci déjà au stade de projet. Par ailleurs, l'intégration des données BTDF et BRDF dans des programmes de simulation informatique pour la lumière naturelle dans le bâtiment devient essentielle à un calcul correct de la propagation de la lumière dans une pièce.

Marilyne Andersen, professeure assistante
Massachusetts Institute of Technology (MIT)
Building Technology Program, Department of Architecture
MIT, Room 5-418, 77 Massachusetts Avenue
USA - Cambridge MA 02139-4307

Bibliographie

- [1] International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Daylight in Buildings - A source Book on daylighting systems and components, Report of IEA SHC Task 21 / ECBCS Annex 29, 2000
- [2] M. BODART, A. DE HERDE : « Global energy savings in office buildings by the use of daylighting », *Energy and Buildings*, vol 34, pp. 421-429, 2002
- [3] L. HESCHONG : « Daylighting and human performance », *ASHRAE Journal*, vol. 44 (6), pp. 65-67, June 2002
- [4] P. APIAN-BENNEWITZ, J. VON DER HARDT : « Enhancing and calibrating a goniophotometer », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 54 (1-4), pp. 309-322, 1998.
- [5] J. BREITENBACH J., J.L.J. ROSENFELD : « Design of a Photogoniometer to Measure Angular Dependent Optical Properties », in *Proceedings of International Conference on Renewable Energy Technologies in Cold Climates*, Solar Energy Society of Canada Inc. (Ed), pp. 386-391, Ottawa, Canada, 1998
- [6] M. ANDERSEN, C. ROECKER, J.-L. SCARTEZZINI : « Design of a time-efficient video-goniophotometer combining bidirectional functions assessment in transmission and reflection », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005 (In Press)
- [7] M. ANDERSEN, L. MICHEL, C. ROECKER, J.-L. SCARTEZZINI : « Experimental assessment of bi-directional transmission distribution functions using digital imaging techniques », *Energy and Buildings*, vol 33 (5), pp. 417-431, 2001
- [8] M. ANDERSEN : « Matrix-based analysis of digital images : application to goniophotometric measurements with variable referential », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 43 (3-5), pp. 419-435, 2005
- [9] M. ANDERSEN, M. RUBIN, J.-L. SCARTEZZINI : « Comparison between ray-tracing simulations and bi-directional transmission measurements on prismatic glazing », *Solar Energy*, vol 74 (2), pp. 157-173, 2003
- [10] M. ANDERSEN, M. RUBIN, R. POWLES, J.-L. SCARTEZZINI : « Bi-directional transmission properties of venetian blinds : experimental assessment compared to ray-tracing calculations », *Solar Energy*, 2005 (In Press)



7a, b, c, d