

# Photogoniomètre bidirectionnel pour l'évaluation des performances lumineuses de systèmes de fenêtres

Marilyne Andersen, Laurent Michel, Christian Roecker, Jean-Louis Scartezzini  
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH – 1015 Lausanne  
e-mail: Marilyne.Andersen@epfl.ch

## Résumé

Les applications en lumière naturelle exigent une connaissance objective et systématique des propriétés de transmission lumineuse des systèmes de fenêtres. Ces caractéristiques photométriques sont décrites par une fonction de distribution bidirectionnelle de transmission (BTDF), dont l'évaluation expérimentale nécessite un équipement approprié.

Un nouveau type de photogoniomètre bidirectionnel, basé sur des techniques d'imagerie numérique, a été développé dans ce but. Ses principaux avantages résident dans la réduction significative du temps de mesure et dans la possibilité de déterminer une fonction BTDF quasi continue. Ces résultats ne peuvent être atteints que grâce à des procédures de calibrage spécifiques et précises du photogoniomètre bidirectionnel, présentées dans cet article, avec un traitement approprié des images et des données.

## Zusammenfassung

Viele Tagesbeleuchtung Anwendungen benötigen ein exaktes Wissen der Richtungsübertragung Eigenschaften der hochentwickelten Fensterungsmaterialien. Diese photometrischen Eigenschaften werden durch eine Umkehrübertragung Verteilungsfunktion (BTDF) beschrieben, deren experimentelle Auswertung eine geeignete Ausrüstung benötigt.

Ein neues bidirektionales Photogoniometer, basiert auf digitalen Bildverarbeitung Techniken, ist zu diesem Zweck bestimmt und entwickelt worden. Die Hauptvorteile dieser Einheit sind die bedeutende Verkleinerung der Zeit, die für Datenmessen angefordert wird, und die Fähigkeit, um eine fast ununterbrochene BTDF-Funktion festzusetzen. Diese Eigenschaften können nur durch ausführlichen und genauen Kalibrierung Prozeduren des Photogoniometer erzielt werden, die in diesem Papier beschrieben sind, zusammen mit der entwickelte Bild und Datenverarbeitung.

## Summary

Many daylighting applications require a precise knowledge of the directional transmission features of advanced fenestration materials. These photometric properties are described by a bi-directional transmission distribution function (BTDF), whose experimental assessment requires an appropriate equipment.

A novel bi-directional photogoniometer, based on digital imaging techniques, has been designed and developed for that purpose. The main advantages of this device are the significant reduction of the time required for data measurement and its capability to assess an almost continuous BTDF function. These features can be achieved only through detailed and accurate calibration procedures of the bi-directional photogoniometer, which are described in this paper, together with digital image and data processing.

## 1. Introduction

La distribution de lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments doit être optimisée afin de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le confort visuel. Les systèmes de fenêtre, comme les dispositifs de déviation de lumière, les protections solaires, les vitrages complexes (verres prismatiques, holographiques, etc.), peuvent jouer un rôle prépondérant dans ce domaine.

Cependant, une connaissance approfondie des propriétés photométriques bidirectionnelles de ces systèmes est requise pour permettre de choisir judicieusement la combinaison de matériaux offrant un meilleur confort visuel et des potentialités d'économie d'énergie, et ceci déjà au stade de projet. En outre, les outils de simulation informatique en lumière naturelle nécessitent également une base de données photométrique détaillée pour proposer une modélisation fiable de la propagation de la lumière dans des locaux à systèmes de fenêtres complexes.

Ces propriétés photométriques sont caractérisées par la fonction de distribution bidirectionnelle de transmission (BTDF), également appelée  $q$  dans la nomenclature CIE [1], définie par l'équation (1) et dont les grandeurs photométriques associées sont illustrées dans la Fig. 1 :

$$BTDF(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2) = \frac{L_2(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)}{L_1(\theta_1, \phi_1) \cos \theta_1 d\omega_1} = \frac{L_2(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)}{E_1(\theta_1)} \left[ \frac{cd}{m^2 lx} \right] \quad (1)$$

où

$(\theta_1, \phi_1)$ : Coordonnées polaires du flux incident [°]

$(\theta_2, \phi_2)$ : Coordonnées polaires du flux transmis [°]

$L_1(\theta_1, \phi_1)$ : Luminance d'un élément de flux incident [ $cd \cdot m^{-2}$ ]

$L_2(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)$ : Luminance d'un élément de flux transmis [ $cd \cdot m^{-2}$ ]

$d\omega_1$ : Angle solide de l'élément de flux incident [sr]

$E_1(\theta_1)$ : Eclairement de l'échantillon, dû au flux incident [lx]

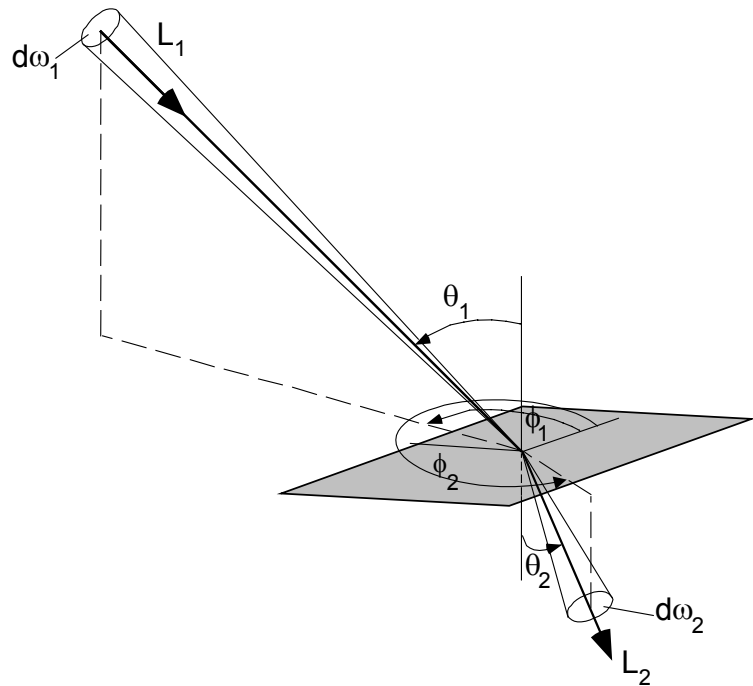


Fig. 1. Grandeurs intervenant dans la définition de la fonction BTDF.

Plusieurs photogoniomètres bidirectionnels ont été développés récemment pour la mesure de BTDFs [2, 3, 4, 5, 6]. Leur principe de mesure conventionnel consiste en un capteur photométrique mobile mesurant les éclairements dans différentes directions  $(\theta_2, \phi_2)$ , dont sont déduites les valeurs associées de luminances transmises  $L_2(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)$ . Malgré de bonnes performances en précision et fiabilité, cette méthode implique deux désavantages importants:

- le temps de mesure est considérable, le capteur mobile devant se déplacer d'une position de mesure à l'autre
- la résolution en transmission  $(\theta_2, \phi_2)$  doit être affinée pour des matériaux présentant de forts pics de luminance

Pour parer à ces inconvénients, un nouveau type de photogoniomètre a été développé, faisant appel aux techniques d'imagerie numérique [7]. Sa conception mécanique, les différentes procédures de calibrage, ainsi que les premiers résultats sont présentés ici.

## 2. Description de l'appareil

Les principes généraux de fonctionnement du photogoniomètre bidirectionnel, illustré à la Fig. 2A, sont les suivants :

- l'équipement est placé sous une source lumineuse calibrée (lampe à décharge 2.5 KW HMI), positionnée 6 mètres au-dessus du plateau principal
- les rotations du plateau principal ( $\theta_1$  de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ ) et du porte-échantillon ( $\phi_1$  de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ ) déterminent la direction incidente (voir Fig. 2B)

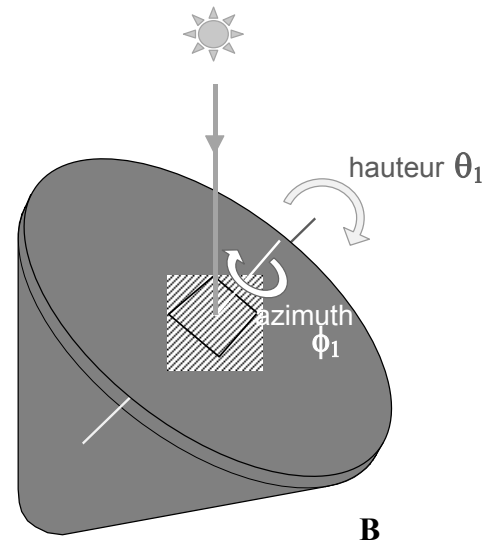


Fig. 2. Photogoniomètre bidirectionnel développé au LESO-PB / EPFL. **A** Illustration de l'appareil. La caméra CCD (absente sur la photo) est indiquée par une croix. **B** Rotation du plateau principal et du porte-échantillon.

- une caméra vidéo CCD noir/blanc (Kappa CF 8/1 DXCair, images de  $752 \times 582$  pixels) et un écran de projection triangulaire (couvrant  $60^\circ$  en azimuth), vers lequel elle est pointée, sont fixés sur un anneau situé sous le plateau principal (voir Fig. 2A), qui réalise une rotation complète de manière à offrir une visualisation de la totalité de l'hémisphère de transmission, sans inter-réflexions (Fig. 3).

La caméra est pilotée par ordinateur via le logiciel d'acquisition et de traitement d'images IMAGE-PRO PLUS<sup>1</sup> ; les temps d'intégration utilisés varient de 40ms (afin d'éviter les effets de battement de la source lumineuse) à 2.56 sec (luminance minimale observable de  $0.15 \text{ [cd/m}^2\text{]}$ , qui est une limite acceptable).

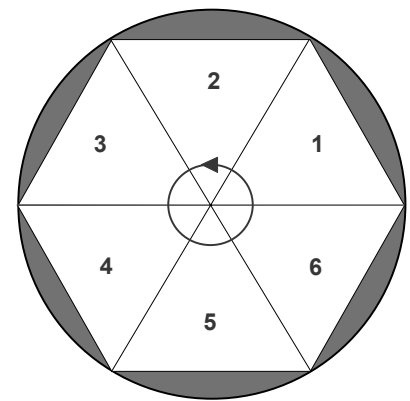


Fig. 3. Rotation de l'écran diffusant.

L'ouverture du diaphragme est fixée manuellement ; la caméra est calibrée sur une échelle de niveaux de gris (0 à 255), de manière à en faire un luminance-mètre à points multiples. L'écran de projection est recouvert d'une peinture blanche diffusante et spectralement neutre (peinture LMT<sup>2</sup>).

Les éléments internes sont hautement absorbants ; un cône de protection est fixé autour de l'espace de mesure (cf. Fig. 2) ; l'ensemble du dispositif est placé dans une chambre noire de  $5\text{m} \times 5\text{m} \times 8\text{m}$ . Le porte-échantillon permet une liberté dans la taille des échantillons, avec dimensions maximales de  $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ . Un ensemble de diaphragmes permet de limiter la zone illuminée à des surfaces de 10, 17, 24, ou  $30\text{cm}$  de diamètre ; on peut noter que la surface considérée et la résolution angulaire choisie en transmission doivent être inversement proportionnelles, la direction de sortie étant bien sûr moins bien définie pour des échantillons de grande taille.

<sup>1</sup> Image-Pro PlusTM, v. 3.0.01.00, Media Cybernetics, L.P.

<sup>2</sup> LMT LichtMeßTechnik GMBH Berlin

### 3. Procédures de calibrage

Les principales procédures de calibrage concernent la caméra CCD, utilisée comme un luminance-mètre à points multiples, combinant rapidité et précision. Différents calibrages sont à réaliser :

- Calibrage spectral : la sensibilité spectrale de la caméra CCD doit être aussi proche  $V(\lambda)$  que possible (courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain). Dans ce but, on la détermine expérimentalement et on applique une méthode de moindres carrés pour trouver quelle combinaison des filtres optiques permettrait de la corriger de manière à obtenir une réponse similaire à  $V(\lambda)$  [8]. Une fois leur type et leurs épaisseurs respectives déterminées [9], les filtres sont positionnés devant l'objectif. Les courbes obtenues sont données à la Fig. 4A.
- Calibrage photométrique : il s'agit de déterminer la relation entre les niveaux de gris et les valeurs de luminance associées, ceci pour chaque temps d'intégration utilisé. On réalise pour cela des mesures simultanées avec la caméra CCD et un luminance-mètre calibré d'un écran illuminé par une source halogène placée à différentes distances de ce dernier. Ces conversions sont données à la Fig. 4B ; on choisit une réponse non-linéaire ( $\gamma = 0.45$ ) de manière à garder une bonne résolution pour des luminances faibles.

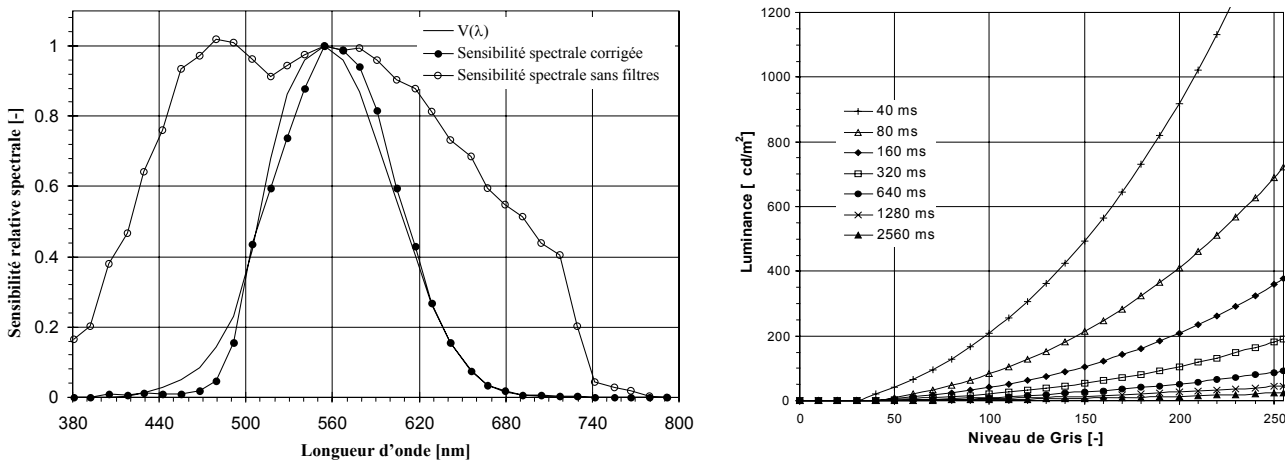


Fig. 4. **A** Calibrage spectral de la caméra. **B** Calibrage photométrique pour les temps d'intégration utilisés.

- Calibrage géométrique : les coordonnées polaires ( $\theta_2, \phi_2$ ) doivent être converties en coordonnées planes déterminant un point sur l'écran triangulaire par une transformation purement géométrique basée sur des considérations trigonométriques dans l'espace [10]. Les distorsions de l'image, dues à des imperfections éventuelles des lentilles par exemple, peuvent être prises en compte sans recours à une correction supplémentaire : on dessine un repère de coordonnées (résolution angulaire de  $2.5^\circ$  en hauteur et azimuth) sur un écran triangulaire similaire à l'écran diffusant et positionné à sa place (voir Fig. 5A). Le repérage des points permet ainsi de déterminer une carte de coordonnées angulaires sur l'image ; une telle carte offre alors de nombreuses possibilités de discrétisation en transmission : un exemple est donné à la Fig. 5B pour une résolution en sortie de  $(\Delta\theta_2, \Delta\phi_2) = (10^\circ, 15^\circ)$ .

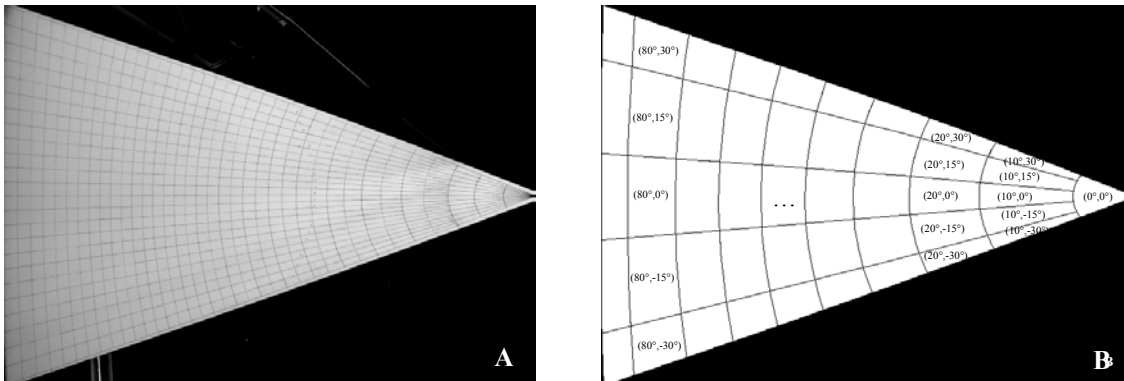


Fig. 5. **A** Grille de repérage pour le calibrage géométrique. **B** Grille de discrétisation  $(\Delta\theta_2, \Delta\phi_2) = (10^\circ, 15^\circ)$ .

- Corrections supplémentaires : L'uniformité de l'image est vérifiée de manière à assurer que des mesures de luminance en divers points de l'image sont indépendantes de leur position sur cette dernière : les différences restent en général inférieures à 3% en termes relatifs. La qualité de diffusion de l'écran est contrôlée (il doit en effet pouvoir être considéré comme lambertien) : les mesures montrent que les écarts au modèle théorique restent bien en-dessous de 10%. L'uniformité du rayonnement incident sur toute la surface de l'échantillon doit être suffisante : on mesure des fluctuations relatives inférieures à 2%, ce qui est tout à fait acceptable. Enfin, le parallélisme des rayons incidents est vérifié : une divergence de 0.35° est observée, valeur à comparer à celle du rayonnement solaire réel (0.25°), qui lui est par conséquent très proche. Les sources d'erreur mentionnées sont faibles ; toutefois, elles sont corrigées par un traitement informatique pour éviter une répercussion sur les résultats finaux (détails dans [10]).

#### 4. Traitement des images et des données

Le logiciel de pilotage du photogoniomètre est écrit en VISUAL BASIC® afin de réaliser une caractérisation d'échantillon entièrement automatisée. Le set de directions incidentes par défaut comprend 145 directions angulaires, déterminées selon la subdivision de la voûte céleste par Tregenza (International Daylighting Measurement Program [11]) ; toute autre distribution angulaire peut être choisie librement. L'interface de commande est illustré à la Fig. 6.

Il faut souligner qu'un set complet de données BTDF ne demande que 2 à 4 minutes par direction incidente, alors que les photogoniomètres classiques nécessitent jusqu'à plusieurs heures.

L'objectif du traitement d'image est d'améliorer la précision des mesures de luminance et d'éviter des effets de sur ou sous-exposition de certains pixels de l'image, en particulier lorsque des dynamiques de luminance importantes sont observées.

Une sélection automatique des temps d'exposition appropriés est réalisée de manière à contrôler la dynamique de luminances [12]. Pour chacune des 6 positions d'écran, des clichés sont pris à différents temps d'intégration, le plus long étant suffisamment court pour éviter toute surexposition, le plus court étant suffisamment long pour éviter une sous-exposition. Toutes ces images formées de niveaux de gris sont transformées en valeurs de luminance via la relation appropriée, puis converties en images 32 bits (à virgule flottante), et enfin divisées par l'éclairement  $E_1(\theta_1)$ , simultanément mesuré dans le plan de l'échantillon.

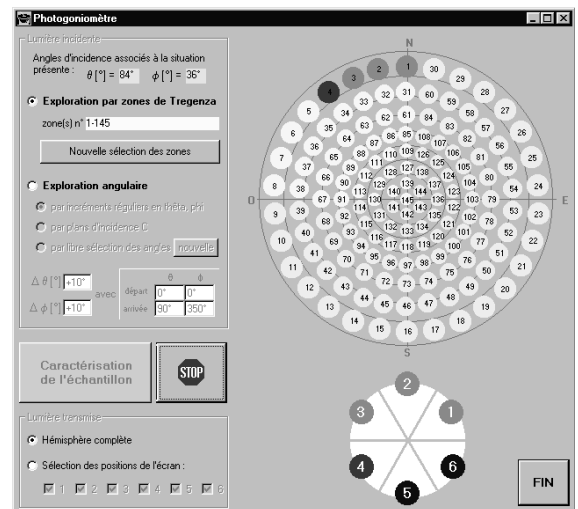


Fig. 6. Interface de pilotage pour la caractérisation d'échantillons.

Les valeurs de chaque pixel sont donc, à ce stade, égales au rapport des « luminances écran »  $L_{\text{écran}}$ , mesurées par la caméra, et de l'éclairement  $E_1(\theta_1)$ . Les images, placées dans l'ordre de la plus claire à la plus sombre, sont ensuite superposées de manière à former une image 32 bits entièrement calibrée ; avant chaque superposition, tous les pixels surexposés ou déjà traités par un temps d'intégration supérieur sont mis à zéro.

On applique alors la grille de discrétisation concernée en calculant la moyenne des valeurs des pixels contenus dans chaque zone de la grille (cf. Fig. 5B). Les valeurs calculées sont ensuite converties en valeurs BTDF (émises depuis le centre de l'échantillon), en utilisant la relation analytique (2), où  $\rho$  est le coefficient de réflexion de l'écran [-],  $d$  est la distance échantillon-écran le long de  $(\theta_2, \phi_2)$  [m],  $A$  est l'aire illuminée de l'échantillon [m<sup>2</sup>] et  $\alpha$  est l'angle entre la normale à l'écran et  $(\theta_2, \phi_2)$  [°]. Cette équation corrige les effets de distance et d'inclinaison des rayons transmis ; elle est obtenue en considérant l'écran triangulaire comme parfaitement lambertien.

$$BTDF(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2) \left[ \frac{cd}{m^2 lx} \right] = \frac{\pi}{\rho} \cdot \frac{d^2(\theta_2, \phi_2)}{A \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{L_{\text{écran}}(\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)}{E_1(\theta_1)} \quad (2)$$

## 5. Résultats expérimentaux

Les données BTDF sont sauveées dans un fichier ASCII, qui contient la description de l'échantillon (nom, fabricant, épaisseur, etc.), le type de mesure (direction incidente, résolution angulaire en sortie, etc.) et la transmission globale  $\tau(\theta_1, \phi_1)$ , calculée par intégration des valeurs BTDF selon l'approximation donnée par l'équation (3). Les valeurs BTDF sont ensuite indiquées avec les directions angulaires associées.

$$\tau(\theta_1, \phi_1) \approx \Delta\theta_2 \cdot \Delta\phi_2 \cdot \sum_{n=1}^{N_{out}} BTDF_n(\theta_1, \phi_1, \theta_{2i}, \phi_{2i}) \cdot \cos\theta_{2n} \cdot \sin\theta_{2n} \quad (3)$$

où  $N_{out}$  est le nombre de directions angulaires discrétisant l'hémisphère de transmission.

On peut noter que le calcul de  $\tau$  peut devenir très lourd et compliqué dans le cas de résolutions en sortie irrégulières, fréquemment utilisées pour des mesures photogoniométriques conventionnelles (photomètre mobile) [4]. Grâce aux techniques d'imagerie numérique, ce problème disparaît, la continuité de l'information permettant d'exclure tout risque de manquer une propriété en transmission importante.

### a) Traitement graphique des données

Les six images calibrées créées pour les six positions d'écran sont superposées pour construire une visualisation complète de l'hémisphère de transmission (Fig. 7A et 8A).

Le set de données BTDF est très important et ne peut en lui-même donner de vision synthétique du comportement en transmission de l'échantillon ; une approche graphique apparaît donc nécessaire. Les données sont par conséquent traitées via un programme développé dans MATLAB<sup>3</sup>, de manière à créer des représentations tridimensionnelles des valeurs BTDF.

Différentes possibilités de visualisation sont données aux Fig. 7 et 8, respectivement sous incidence (40°, 0°) pour un film prismatique 3M et sous incidence normale pour un store textile plissé produit par la société Baumann-Hüppe AG.

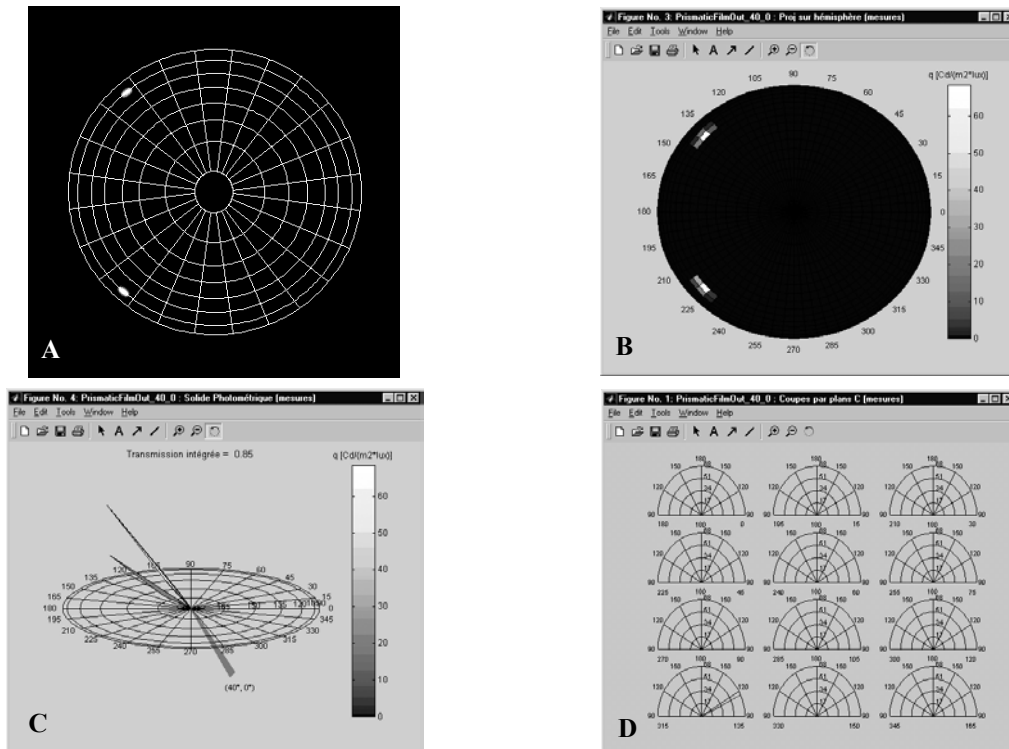


Fig. 7. Film prismatique 3M:  $(\theta_1, \phi_1) = (40^\circ, 0^\circ)$ . **A** Image calibrée recomposée à partir des sixièmes. **B** Projection hémisphérique. **C** Solide photométrique. **D** Coupes selon plans C.

<sup>3</sup> MATLAB®, v. 5.3.0.10183, The MathWorks, Inc.

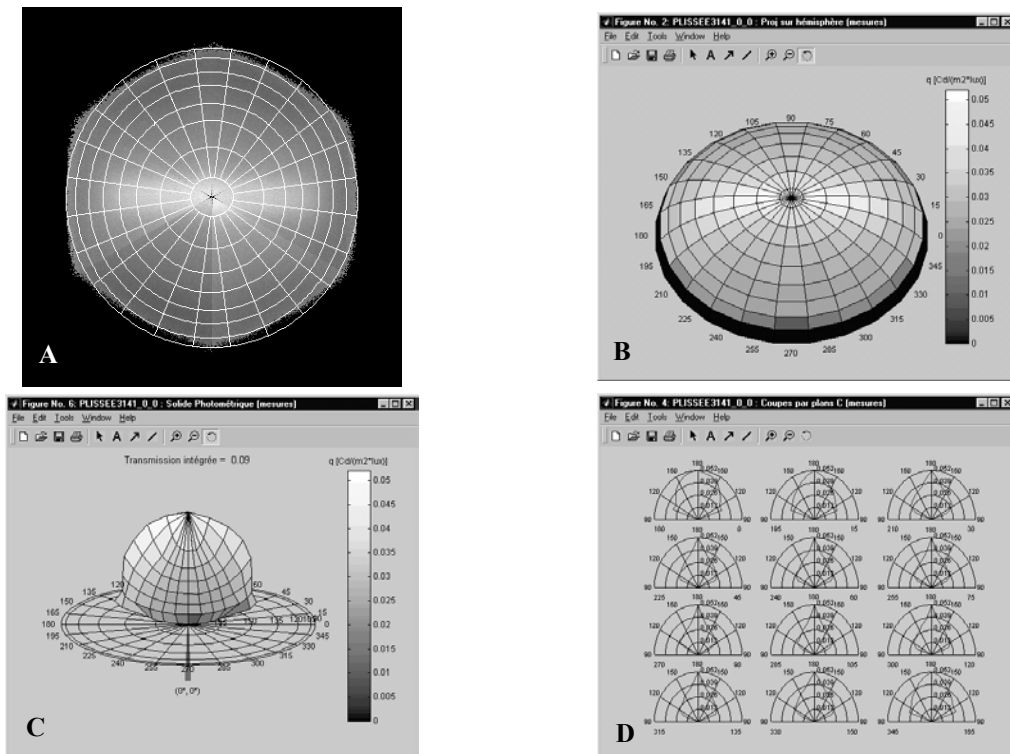


Fig. 8. Store textile plissé (Baumann-Hüppe AG) :  $(\theta_1, \phi_1) = (0^\circ, 0^\circ)$ . **A** Image calibrée recomposée à partir des sixièmes. **B** Projection hémisphérique. **C** Solide photométrique. **D** Coupes selon plans C.

Les Fig. 7B et 8B représentent les valeurs BTDF en projection sur un hémisphère virtuel (l'échelle de couleurs est proportionnelle aux valeurs BTDF) ; les Fig. 7C et 8C donnent une visualisation très intuitive des propriétés en transmission, par un solide photométrique construit en coordonnées sphériques (même échelle de couleurs). Pour ces deux représentations, le point de vue est choisi librement par mouvements de souris. Les Fig. 7D et 8D présentent des coupes des solides photométriques le long de plans C (perpendiculaires au plan de l'échantillon), permettant une analyse quantitative claire du comportement en transmission.

### b) Validation des résultats

Comme la plupart des photogoniomètres bidirectionnels sont en période de test, il n'existe pas encore de set de données BTDF suffisamment précis pour pouvoir être pris comme référence pour une validation des mesures. Les possibilités sont par conséquent de différentes natures :

- 1) comparaison avec BTDF analytiquement déterminées (situations triviales : trou, matériau lambertien)
- 2) comparaison de valeurs BTDF intégrées ( $\tau$ ) avec des mesures par sphère intégratrice d'Ulbricht [2],
- 3) comparaison de mesures BTDF par différents photogoniomètres pour un même échantillon [3] [4] [5].

Les deux premières solutions ont été appliqués à nos résultats, comme illustré à la Fig. 9 ; les écarts relatifs obtenus sont inférieurs à 10%. Une comparaison de BTDFs pourra être réalisée aussitôt qu'un set de données conséquent sera disponible.

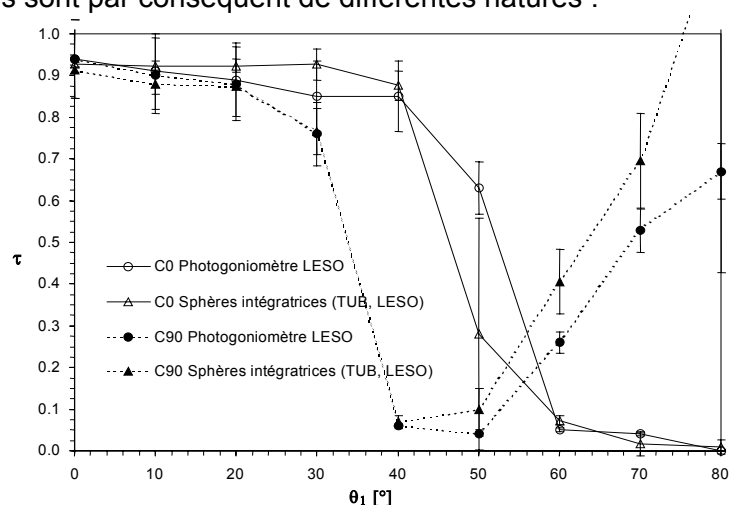


Fig. 9. Transmissions intégrées (film 3M). Les courbes « Sphères intégratrices » donnent les moyennes des mesures pour différents laboratoires (écart-type donné par les barres d'erreur).

## 6. Conclusion

Ce nouveau photogoniomètre bidirectionnel a été testé avec succès and les techniques avancées d'imagerie numérique ont prouvé leur utilité à accélérer le processus d'acquisition des données et à améliorer la résolution en luminance. La difficulté réside dans la haute qualité de calibrage requise pour la caméra CCD, pour convertir en un luminance-mètre à points multiples fiable.

Le traitement des images permet d'éviter tout problème de sur ou sous-exposition, avec une garantie de résolution précise et équivalente pour toute la dynamique de luminance. La possibilité de couvrir l'hémisphère de sortie de manière continue offre non seulement des représentations globales appropriées, mais aussi l'assurance de tenir compte de chaque pic – ou creux – en transmission, aussi faible soit-il. De plus, le temps nécessaire à une mesure complète, considérablement réduit grâce à l'imagerie numérique (2 à 4 minutes par direction incidente) ne dépend aucunement de la résolution angulaire en sortie désirée, contrairement à une analyse point par point par un photomètre mobile. En outre, les représentations graphiques des valeurs BTDF en coordonnées sphériques offrent une approche intuitive et synthétique de la distribution lumineuse en transmission, nécessaire à une sélection judicieuse de matériaux de fenêtre par les architectes et à l'optimisation de leur conception par l'industrie.

## 7. Remerciements

Le photogoniomètre bidirectionnel a été construit et développé grâce au soutien humain et financier de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI). Les auteurs remercient P. Loesch et D. Glauser pour la mécanique et la robotique du dispositif. Ils remercient également H.-P. Baumann, ex-directeur des stores Baumann AG, pour son utilisation des mesures photogoniométriques.

## 8. Références

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage, Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement, 2nd Edition, CIE 38 (TC-2.3), Paris, 1977.
- [2] S. Aydinli (ed.), Report on physical quantities to be measured in laboratory facilities, IEASHC Task21, Berlin, TUB, 1999.
- [3] K. Papamichael, J. Klems, S. Selkowitz, Determination and Application of Bidirectional Solar-Optical Properties of Fenestration Systems, LBL-25124, CA, Lawrence Berkeley Laboratory.
- [4] P. Apian-Bennewitz, Designing an apparatus for measuring bidirectional reflection/transmission, SPIE 0-8194-1564-2 (2255), Freiburg, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 1994.
- [5] L. Bakker, D. van Dijck, Measuring and processing optical transmission distribution functions of TI-materials, Private Communication, Delft, TNO, 1995.
- [6] J.L.J. Rosenfeld, The new Cardiff goniometer to measure the detailed optical properties of advanced glazing units, Private Communication, Cardiff, University of Wales, 1997.
- [7] J.-L. Scartezzini, R. Compagnon, C. Roecker, L. Michel, Bidirectional photogoniometer for advanced glazing materials based on digital imaging techniques, Lighting Research and Technology (29), London, CIBSE, 1997.
- [8] M. Andersen, Dispositif de mesure de la luminance du ciel basé sur des techniques d'imagerie numérique: développement et validation expérimentale, Diploma Report, Lausanne, EPFL, 1998.
- [9] V. Berrutto, Métrologie de la qualité visuelle des ambiances lumineuses. Application à l'éclairage des bureaux, PhD Report, Université de Savoie, Chambéry, 1996.
- [10] J.L. Scartezzini, M. Andersen, L. Michel, C. Roecker, Bi-directional Photogoniometer for the Assessment of the Luminous Properties of Fenestration Systems, CTI Project, Scientific Report, Lausanne, EPFL, 2000.
- [11] P.R. Tregenza, Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements, Lighting Research and Technology (19), London, CIBSE, 1987.
- [12] L. Michel, Méthode expérimentale d'évaluation des performances lumineuses de bâtiments, PhD Report, Lausanne, EPFL, 1999.