



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final / 15 Novembre 2011

Computer Design and Visualization Tool for Daylighting Systems

Outil informatique de conception
et de visualisation de systèmes d'éclairage
naturel

Mandant:

Office Fédéral de l'Energie (OFEN)
Programme de recherche Energie dans les Bâtiments
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Cofinancement:

Relux Informatik AG
Dornacherstrasse 377
CH-4018 Basel
www.relux.ch

Mandataire:

Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18
CH-1015 Lausanne
leso.epfl.ch

Auteurs:

Prof. Dr Jean-Louis Scartezzini, LESO-PB/EPFL
jean-louis.scartezzini@epfl.ch
Dr Jérôme Kaempf, LESO-PB/EPFL
jerome.kaempf@epfl.ch
Chantal Basurto, LESO-PB/EPFL
chantal.basurto@epfl.ch

En collaboration avec:

Markus Hegi et Carsten Bauer, Relux Informatik AG

Responsable de domaine de l'OFEN: M. Andreas Eckmanns

Chef de programme de l'OFEN: Dr Charles Filleux

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 154393 / 103331

Les auteurs de ce rapport portent seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Table des matières

- 0. Résumé/Zusammenfassung/Abstract
- 1. Introduction
- 2. Systèmes complexes de fenêtres
- 3. Propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse
- 4. Mesures des propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse de systèmes complexes de fenêtres
- 5. Outil informatique simplifié de visualisation de systèmes complexes de fenêtres
- 6. Algorithme informatique détaillé de dimensionnement de systèmes complexes de fenêtres
- 7. Mise en œuvre de l'outil informatique
- 8. Conclusion
- 9. Références bibliographiques
- 10. Annexes

Résumé

Les systèmes complexes de fenêtres, composés principalement de **dispositifs de protection solaire et de déviateurs de lumière naturelle**, contribuent de manière significative à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments (diminution des charges thermiques et des besoins en éclairage électrique). Des équipements (goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique) ont été récemment mis sur pied afin de caractériser les **propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse (Bidirectional Transmission Density Function)** de ces systèmes.

L'utilisation par les praticiens de données empiriques de transmission lumineuse (BTDF Data), obtenues à l'aide de goniophotomètres, est malheureusement encore insuffisante, en particulier en ce qui concerne les architectes et les éclairagistes. Un outil informatique, permettant de **concevoir et visualiser des systèmes complexes de fenêtres** en cours de fonctionnement (transmission des composantes directe et diffuse de la lumière naturelle), a été mis sur pied en vue de faciliter leur mise en œuvre dans la pratique.

Ce projet a ainsi tiré profit d'un goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique, conçu et réalisé par le Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment de l'EPFL. Il s'appuie sur une étroite collaboration avec des institutions académiques (Lawrence Berkeley National Laboratory/USA, National University of Singapore/Singapour, Fraunhofer Gesellschaft/Allemagne) et des partenaires industriels (Relux Informatik AG/Suisse, 3M Advanced Lighting/USA, Solartran/Australia, Saint-Gobain/France), offrant ainsi l'opportunité de :

- Mesurer les **propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse** de dispositifs de protection solaire (stores à lamelles, etc.) et de déviateurs de lumière naturelle (3M SOLFTM Film, Laser Cut Panel, SSG LumitopTM, etc.);
- Elaborer un outil informatique simplifié de **visualisation de systèmes complexes de fenêtres intégrés en façade**;
- Elaborer un algorithme informatique détaillé de **dimensionnement de systèmes complexes de fenêtres intégrés en façade**.

L'outil informatique est pourvu d'une interface graphique adaptable aux connaissances et compétences des utilisateurs en matière d'éclairage naturel (architectes, éclairagistes et chercheurs). Il a été mis en œuvre, de manière concluante, sur un certain nombre de systèmes complexes de fenêtres. L'outil fait l'objet d'une intégration au logiciel de calcul d'éclairage Relux VisionTM en collaboration avec la société Relux Informatik AG, bénéficiant ainsi d'une très large diffusion sur le plan national et international.

Zusammenfassung

Komplexe Verglasungssysteme mit **Sonnenschutz- und Lichtlenkvorrichtungen** können den Energieverbrauch von Gebäuden durch Verminderung der Wärmelast und des elektrischen Lichtbedarfs beträchtlich senken. Das **bidirektionale Transmissionsverhalten (Bidirectional Transmission Density Function)** von solchen Anlagen kann mittels eines zu diesem Zweck entwickelten bidirektionalen Goniophotometers mit CCD Kamera gemessen werden.

Leider werden die von Goniophotometern ermittelten empirischen Lichtübertragungsdaten (BTDF Data) jedoch von Architekten und Lichtfachleuten immer noch sehr wenig benutzt. Eine Software zur **Planung und Verbildlichung von in Betrieb stehenden komplexen Verglasungssystemen** wurde entwickelt, um die Nutzung dieser Werte (Übertragung von direktem und diffusem Tageslicht) in der Praxis zu erleichtern.

Dank Zugriff auf einen am Sonnenenergie- und Bauphysiklabor der EPFL entwickelten bidirektionalen numerischen Goniophotometer und mittels einer engen Zusammenarbeit mit

Partnern aus Akademie (Lawrence Berkeley National Laboratory/USA, National University of Singapore, Fraunhofer Gesellschaft, Deutschland) und Industrie (Relux Informatik AG/Switzerland, 3M Advanced Lighting /USA, Solartran/Australia, Saint-Gobain/France) wurden im vorliegenden Projekt die folgenden Resultate erzielt:

- **Messung der bidirektionalen Lichtübertragungseigenschaften** von Lichtschutzanlagen (Lamellenstoren usw) und Lichtlenkungssystemen (3M SOLF™ Film, Laser Cut Panel, SSG Lumitop™, usw.)
- Entwicklung eines vereinfachten Computerwerkzeugs zur Verbildlichung komplexer fassadenintegrierter Verglasungssysteme
- Entwicklung eines Algorithmus zur informatischen Dimensionierung komplexer fassadenintegrierter Verglasungssysteme.

Die Software enthält eine Benutzeroberfläche, die dem Fachwissen der Benutzer (Architekten, Lichtplaner und Forscher) im Bereich der Tageslichtbeleuchtung angepasst werden kann. Sie wurde erfolgreich auf mehrere komplexe Verglasungssysteme angewandt. Eine Integration im Lichtsimulationsprogramm Relux Vision™ in Zusammenarbeit mit der Firma Relux Informatik AG ist vorgesehen, um eine breite Nutzung der Software auf nationaler und internationaler Ebene sicher zu stellen.

Abstract

Complex fenestration systems, composed principally of **solar shadings and daylight redirection devices**, contribute significantly to mitigating the energy consumption of buildings through reduction of thermal load and electric lighting consumption. To characterise the **bidirectional light transmission properties (Bidirectional Transmission Density Function BTDF)** of such systems, a Bidirectional Goniophotometer based on digital imaging techniques was developed.

The empirical light transmission data (BTDF Data) obtained through goniophotometers are unfortunately still insufficiently taken into account by architects and lighting engineers. To facilitate and promote their use in practice, a software tool for the **design and visualisation of complex fenestration systems** during operation (transmission of direct and diffuse components of daylight) has been developed.

The present project took advantage of a bidirectional digital imaging goniophotometer developed by the EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory. It relied on direct collaboration with academic institutions (Lawrence Berkeley National Laboratory/USA, National University of Singapore, Fraunhofer Gesellschaft/Germany) and industrial partners (Relux Informatik AG/Switzerland, 3M Advanced Lighting /USA, Solartran/Australia, Saint-Gobain/France), which opened the opportunity to:

- **Measure the bidirectional light transmission properties** of solar protection devices (venetian blinds etc) and daylight redirection devices (3M SOLF™ Film, Laser Cut Panel, SSG Lumitop™ etc.);
- Develop a simplified software tool for the visualisation of complex facade integrated fenestration systems;
- Develop a detailed IT algorithm for the dimensioning of complex facade integrated fenestration systems.

The software tool features an interface that adapts to the daylighting knowledge and competence of its users (architects, lighting designers and researchers). It has been used successfully to study several complex fenestration systems and is due to be integrated in the lighting calculation software Relux Vision™ in collaboration with Relux Informatik AG, which will ensure widespread distribution on a national and international level.

Computer Design and Visualization Tool for Daylighting Systems

Outil informatique de conception et de visualisation de systèmes d'éclairage naturel

1. Introduction

Les systèmes complexes de fenêtres, principalement constitués de **dispositifs de protection solaire et de déviateurs de lumière naturelle**, contribuent de manière significative à réduire la consommation d'énergie dans les secteurs administratifs et tertiaires. Une modération de la charge thermique des bâtiments peut ainsi être obtenue en période estivale, réduisant d'autant les besoins en rafraîchissement et en conditionnement d'air; certains de ces dispositifs permettent d'accroître la pénétration de la lumière naturelle dans les locaux, réduisant ainsi leurs besoins en éclairage électrique (Sca93a) (Sca93b).

La mise en œuvre de ces systèmes, au niveau de la conception et de la réalisation des bâtiments, par les acteurs du domaine de la construction (architectes, ingénieurs-conseils, éclairagistes, etc.) n'est toutefois pas sans difficultés. Ces derniers sont appelés à satisfaire des exigences toujours plus contraignantes, dans la mesure où ils doivent :

- Offrir des conditions de confort thermique optimales, en présence d'importantes surfaces vitrées propres à la tendance architecturale actuelle et à l'approche bioclimatique (augmentation des risques de surchauffe thermique) (SIA90) ;
- Se conformer aux contraintes ergonomiques en matière d'éclairage naturel et de confort visuel, tenant compte de la présence d'écrans de visualisation aux postes de travail (incidence du contraste de luminances) (Gra87) (Suv99) ;
- Etre intégrés de manière optimale avec des installations d'éclairage artificiel efficaces en vue d'une utilisation rationnelle de l'énergie électrique (combinaison d'éclairages naturel et artificiel) (Lin10).

La détermination des **propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse des systèmes complexes de fenêtres** est indispensable pour caractériser leurs performances en matière de protection contre les surchauffes thermiques et/ou de contribution à l'éclairage naturel des locaux. Ces dernières permettent d'évaluer le flux lumineux traversant le dispositif en fonction de la nature (composante directe ou diffuse) et de la direction du flux incident (hauteur et azimut solaires, distribution de luminance du ciel).

Des équipements scientifiques ont été récemment mis sur pied à l'EPFL en vue de mesurer ces propriétés de transmission lumineuse avec précision (And01). Un **goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique** permet ainsi de caractériser ces dernières sous la forme d'une **Bidirectionnal Transmission Density Function (BTDF)** propre à chaque système complexe de fenêtres (And04).

La mise à disposition de ces caractéristiques photométriques (BTDF Data) auprès des praticiens, ainsi que leur utilisation par ces derniers en vue du choix et/ou du dimensionnement de systèmes complexes de fenêtres, est malheureusement encore insuffisante. Ces dernières sont pourtant comparables d'un point de vue technique aux caractéristiques des sources et luminaires d'éclairage artificiel, présentées sous la forme d'indicatrices ou de solides photométriques dans les catalogues de produits (Mur11).

Afin de faciliter la mise en œuvre de systèmes complexes de fenêtres dans la pratique, il a été envisagé d'offrir la possibilité aux praticiens de **visualiser la transmission des flux de lumière naturelle au travers de ces derniers**, lors de la conception de bâtiments (SLG93) (Sca97). Compte tenu de la complexité du processus de projétation et de réalisation architecturales, deux outils de conception et de dimensionnement différents de systèmes complexes de fenêtres ont été considérés dans le cadre de ce projet :

- Un outil informatique simplifié de **visualisation de systèmes complexes de fenêtres**, capable de reproduire la transmission du flux lumineux au travers de ces systèmes en fonction de la composante directe de la lumière naturelle ;
- Un algorithme informatique détaillé de **dimensionnement de systèmes complexes de fenêtres**, capable de simuler la transmission du flux lumineux au travers de ces systèmes et tenant compte des deux composantes de la lumière naturelle (composante directe et diffuse).

L'expérience acquise au cours de ces dernières années par le LESO-PB/EPFL, tant dans le domaine expérimental (Tha08) (And01) que dans le domaine de la simulation numérique en éclairage naturel et artificiel (Lin10), a été particulièrement mise à profit dans le cadre de ce projet.

2. Systèmes complexes de fenêtres

Une gestion optimale de l'éclairage naturel en façade nécessite de pouvoir tirer profit des possibilités de subdivision des façades vitrées sur le plan fonctionnel. Celles-ci pourvoient généralement, et de manière simultanée, aux besoins des occupants sous la forme de :

- Contribution à l'éclairage naturel des locaux ;
- Apport d'énergie de chauffage par gains solaires ;
- Apport d'air frais par l'intermédiaire de la ventilation naturelle ;
- Contact visuel avec l'extérieur du bâtiment ;
- Isolation thermique et phonique avec l'extérieur.

Il est communément admis qu'une subdivision horizontale de la façade en trois bandes horizontales égales permet une utilisation particulièrement optimale des façades vitrées. La Figure 2.1 illustre le cas des modules d'expérimentation et de démonstration en éclairage naturel situés sur le campus de l'EPFL à Ecublens.



Figure 2.1 : Vue intérieure de l'un des modules d'expérimentation et de démonstration en éclairage naturel DEMONA

La façade latérale de ces dispositifs fait appel à cette règle. Elle comprend une partie inférieure constituée d'un contrecœur opaque isolé thermiquement, une partie centrale sur laquelle sont disposés les ouvrants (contact extérieur et ventilation) et une partie supérieure dédiée principalement à l'apport de lumière naturelle (Tha08).

Les systèmes complexes de fenêtres sont principalement constitués de **dispositifs de protection solaire et de déviateurs de lumière naturelle**. Les premiers sont généralement placés sur la partie médiane de la façade et permettent de réduire les risques d'éblouissement et de surchauffes thermiques pour les occupants du bâtiment ; les seconds sont disposés sur la partie supérieure de la façade et contribuent à une gestion optimale du flux de lumière naturelle. La Figure 2.2 illustre deux systèmes complexes de fenêtres situés en partie supérieure de la façade (vues obtenues pour différents temps d'exposition). L'impact de ces deux dispositifs sur le flux de lumière naturelle peut être comparé avec celui d'un vitrage isolant standard placé au même endroit (cf. Figure 2.2, haut).



Figure 2.2 : Vues intérieures des modules en éclairage naturel DEMONA munis de différents systèmes complexes de fenêtres sur la partie supérieure de la façade : (haut) vitrage isolant standard, (centre) laser cut panel et (bas) 3M SOLF prismatic film; les images gauche et droite diffèrent par leur temps d'exposition.

De nombreux systèmes complexes de fenêtres ont été examinés dans le cadre de travaux de doctorat réalisés à l'EPFL (And01) (Tha08) et lors de programmes de recherche de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) centrés sur la thématique de l'éclairage naturel (IEA SHC Task 21, IEA ECBCS Task 45). Un descriptif détaillé des caractéristiques de systèmes complexes de fenêtres est donné à la référence (IEA21) ; les divers dispositifs étudiés à l'EPFL sont présentés de manière détaillée de manière détaillée dans la référence (And01).

Trois systèmes complexes de fenêtres ont été considérés de manière particulière dans le cadre de ce projet. Ces derniers ont fait l'objet d'études précises dans le cadre de l'IEA SHC Task 21 ; il en est de même de leurs propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse, mesurées à l'EPFL par l'intermédiaire d'un gonio-photomètre bidirectionnel à imagerie numérique, mis sur pied à cet effet. Ces systèmes sont les suivants :

- *Laser cut panel* produit par Solartran (Sol11) ;
- *3M SOLFTM* Prismatic film produit par 3M Company (3MC11) ;
- *SSG LumitopTM* produit par Saint Gobain (SGF11).

Une description de ces trois dispositifs, pris en compte dans le cadre du projet, est donnée ci-après.

Laser cut panel

Le *laser cut panel* est un dispositif, placé généralement dans la partie supérieure du vitrage, permettant de dévier la lumière naturelle vers le fond d'un local (Sol11). Il est constitué de matériau acrylique transparent d'une épaisseur de 6 mm, dans lequel sont découpées des stries parallèles et horizontales, séparées par une distance de 4 mm, au moyen d'un laser (cf. Figure 2.3).

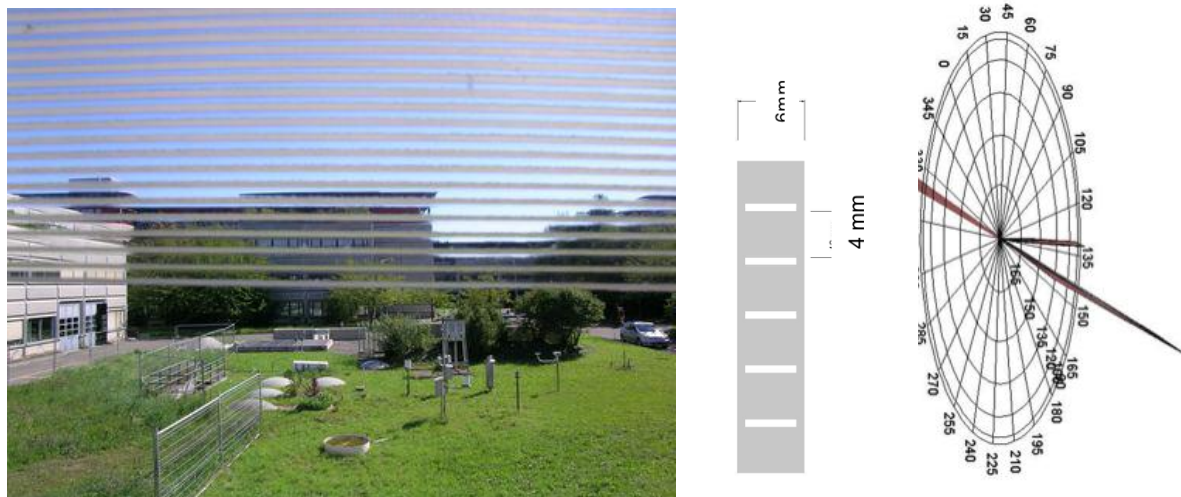


Figure 2.3 : Vue au travers d'un laser cut panel placé en partie supérieure d'un vitrage (gauche), coupe schématique (centre) et propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse du dispositif (BTDF) pour un angle d'incidence de 38° au dessus de l'horizon (hauteur solaire).

Chaque strie possède deux faces, à l'intérieur du matériau acrylique, fonctionnant comme des surfaces réfléchissantes pour les rayons lumineux. Ces derniers, provenant directement du soleil ou de la voûte céleste, sont généralement déviés vers le haut, compte tenu des propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse (cf. Figure 2.3, droite). Une description détaillée des caractéristiques physiques de ces dispositifs, ainsi que de leurs performances lumineuses, est donnée à la référence (Tha08).

3M SOLF prismatic film

Le *3M SOLFTM prismatic film* est constitué d'une feuille de polycarbonate flexible d'une épaisseur de quelques millimètres, dans laquelle sont gravées des structures prismatiques de forme triangulaire (3MC11). Ces dernières ont pour propriété de dévier les rayons lumineux par réfraction, permettant ainsi d'augmenter l'éclairement naturel au fond d'un local, lorsque ce dispositif est placé dans la partie supérieure du vitrage (cf. Figure 2.4).

Parmi les avantages de ce dispositif, on peut citer sa flexibilité dans le sens longitudinal, le faible niveau de maintenance nécessaire pour assurer sa transparence et la valeur élevée de cette dernière. Les mesures de performance lumineuse, réalisées dans le cadre de l'IEA Task 21, ont permis de confirmer le bon fonctionnement du dispositif par ciel serein (présence d'une composante directe de la lumière naturelle ; ce dernier s'avère moins convaincant en présence de lumière naturelle diffuse, caractéristique d'un ciel couvert). Il contribue toutefois à réduire les risques d'éblouissement lorsque la voûte céleste se distingue par des luminances élevées (Tha08).

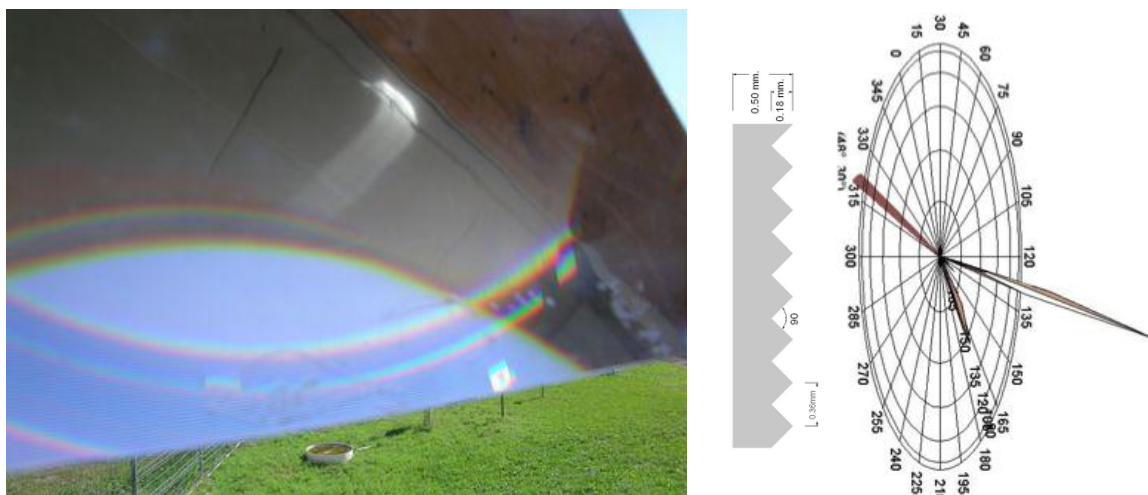


Figure 2.4 : Vue au travers d'un 3M SOLF™ prismatic film placé en partie supérieure d'un vitrage (gauche), coupe schématique (centre) et propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse du dispositif (BTDF) pour un angle d'incidence de 36° au dessus de l'horizon (hauteur solaire).

SSG Lumitop

Le *SSG Lumitop™* est constitué de profils en forme de « U » extrudés dans un matériau acrylique d'une épaisseur de 12 millimètres (Kla11). Le dispositif, placé généralement dans la partie supérieure du vitrage, tire profit de l'angle limite de réflexion au sein du matériau acrylique (angle de Brewster) ; il fonctionne ainsi comme un guide de lumière pour les rayons lumineux d'incidence comprise entre 25 et 50 degrés au dessus de l'horizon, en déviant la plus part d'entre eux vers le fond du local (cf. Figure 2.5).

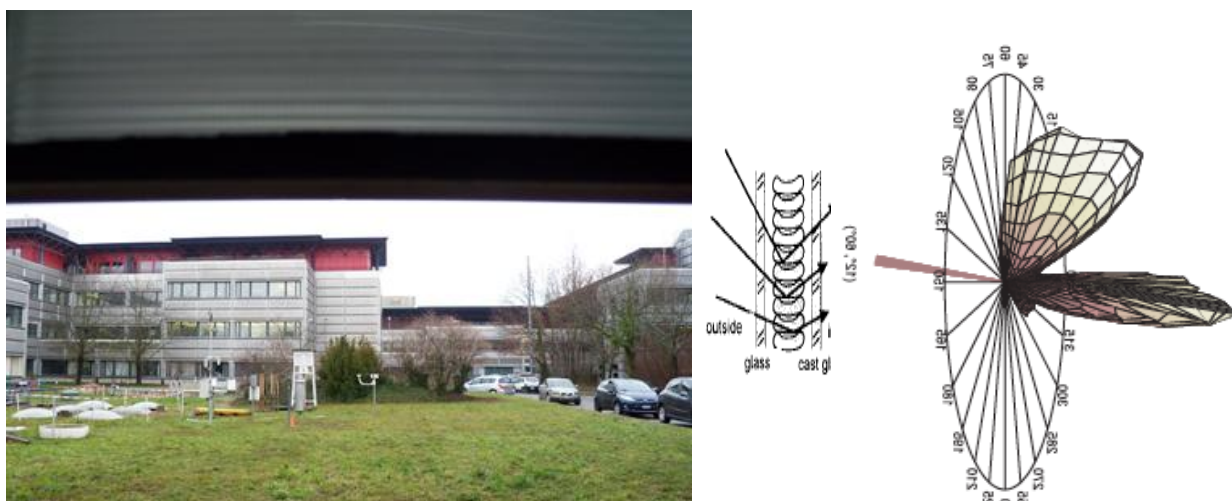


Figure 2.5 : Vue au travers d'un SSG Lumitop™ placé en partie supérieure d'un vitrage (gauche), coupe schématique (centre) et propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse du dispositif (BTDF) pour un angle d'incidence de 12° au dessus de l'horizon (hauteur solaire).

Ce dispositif se distingue plus particulièrement par ses performances lumineuses sous un ciel serein. Les mesures, effectuées dans le cadre de l'IEA Task 21, ont ainsi permis de mettre en évidence une augmentation significative de l'éclairement sur le plan de travail au

fond d'un local en présence de lumière directe ; il s'avère moins convaincant en présence de lumière naturelle diffuse, caractéristique d'un ciel couvert (IEA21). L'intégration du dispositif au sein d'un vitrage isolant permet de garantir des performances satisfaisantes sur le plan thermique ($U = 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$).

3. Propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse

Les propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse d'un **système complexe de fenêtres** - désignées par **Bidirectional Transmission Density Function (BTDF)** - indiquent dans quelle mesure un flux lumineux éclairant ce dernier est dévié vers l'intérieur du bâtiment. Cette grandeur photométrique précise, par ailleurs, de quelle manière et en quelle quantité ce flux est redirigé vers le local. La Figure 3.1 présente les caractéristiques bidirectionnelles de transmission lumineuse (BTDF Data) d'un dispositif de protection solaire (stores à lamelles, Baumann-Hüppe AG), visualisées à l'aide d'un diagramme polaire (And04).. Une fraction significative du flux de lumière naturelle (angle d'incidence de 60°) est déviée par réflexion sur les lamelles et redirigée ainsi vers le plafond.

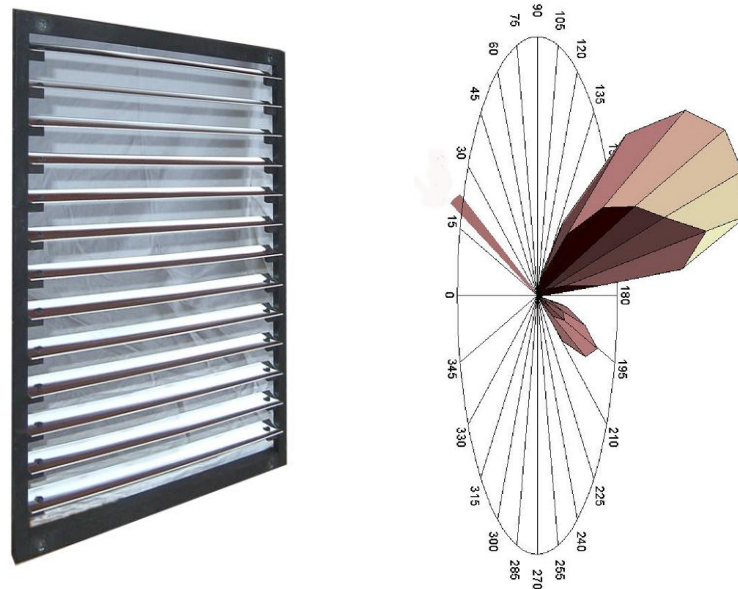


Figure 3.1 : Caractéristiques photométriques BTDF d'un dispositif de protection solaire mesurées à l'aide d'un goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique (And04)

La grandeur photométrique BTDF d'un système complexe de fenêtres, appelée aussi « Coefficient de luminance q », a été définie par la Commission Internationale de l'Eclairage en 1977 (CIE77). Elle est illustrée à la Figure 3.2 et donnée formellement par l'équation suivante :

$$BTDF(\vartheta_1, \phi_1, \vartheta_2, \phi_2) = \frac{L_2(\vartheta_1, \phi_1, \vartheta_2, \phi_2)}{E_1(\vartheta_1)} = \frac{L_2(\vartheta_1, \phi_1, \vartheta_2, \phi_2)}{L_1(\vartheta_1, \phi_1) \cdot \cos \theta_1 \cdot d\omega_1}$$

où les différents symboles de l'équation représentent les grandeurs suivantes :

- (ϑ_1, ϕ_1) et (ϑ_2, ϕ_2) sont les coordonnées polaires des flux incident et émergent de lumière naturelle, exprimées en degrés ;
- $L_1(\vartheta_1, \phi_1)$ et $L_2(\vartheta_2, \phi_2)$ sont les luminances respectives de flux incident et émergent élémentaires, exprimées en (Cd.m^{-2}) ;
- $d\omega_1$ est l'angle-solide sous-tendu par le flux lumineux incident élémentaire, exprimé en (sr) ;
- $E_1(\vartheta_1)$ est l'éclairement de l'échantillon dû au flux lumineux incident, exprimé en (lux).

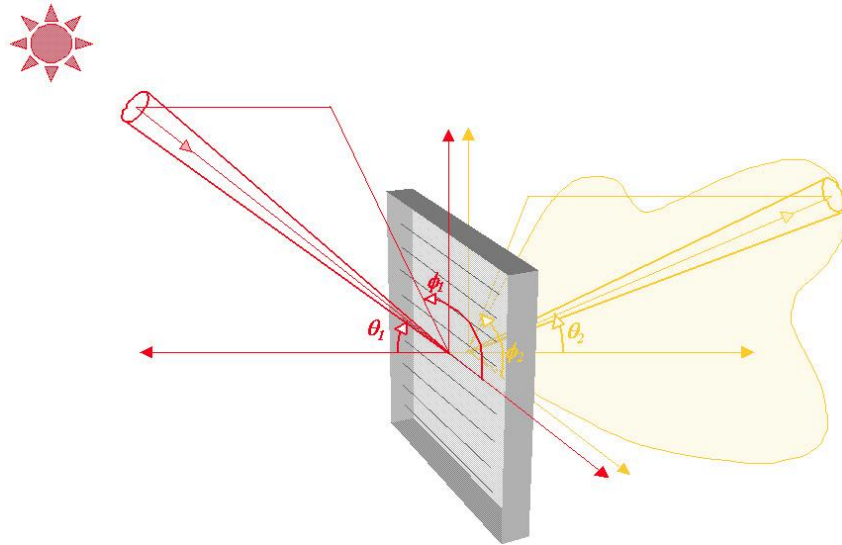


Figure 3.2 : Grandeurs géométriques et photométriques utilisées pour caractériser les propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse d'un système complexe de fenêtres

L'origine du système de coordonnées polaires, qui définit les quatre variables indépendantes de la grandeur $BTDF(\vartheta_1, \phi_1, \vartheta_2, \phi_2)$, est placée sur la surface extérieure du système (échantillon de mesure); les directions des flux lumineux incident et émergent sont repérées par leurs hauteurs angulaires et azimuts respectifs (ϑ_1, ϕ_1) et (ϑ_2, ϕ_2) . Le plan de référence pour le flux lumineux incident n'est autre que la surface extérieure de l'échantillon ; le plan de référence pour le flux lumineux émergent est constitué de la surface intérieure de l'échantillon. Un changement de référentiel est systématiquement appliqué, lorsque l'épaisseur de l'échantillon est significative : c'est le cas pour la plupart des protections solaires (And04).

La caractérisation d'un système complexe de fenêtres par l'intermédiaire de la grandeur photométrique BTDF est basée sur un ensemble de 145 coordonnées polaires prédéfinies, qui a fait l'objet d'une convention sur le plan international dans la cadre de l'IEA Task 21; les différentes directions d'incidence du flux lumineux, à partir desquelles sont déterminées les BTDF, sont réparties sur un hémisphère selon le protocole de Tregenza (Tre87). Le choix des directions d'émergence dépend de la précision souhaitée ; la résolution angulaire maximale est, dans ce cas, de $5^\circ \times 5^\circ$. La Figure 3.3 illustre les coordonnées polaires des directions d'incidence, présentées en détail à la référence (And02).

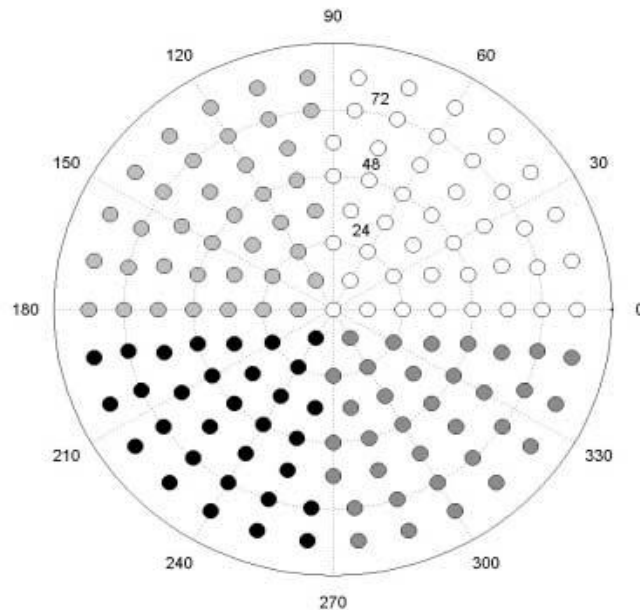


Figure 3.3 : Coordonnées polaires, définissant 145 directions d'incidence du flux lumineux, utilisé pour la mesure des grandeurs BTDF ; cette subdivision de l'hémisphère a été proposée par Tregenza dans le cadre de l'International Daylighting Measurement Programme (IDMP), en vue de la mesure de la distribution de luminance du ciel.

Un aperçu de l'équipement nécessaire pour procéder à la mesure expérimentale de la grandeur photométrique BTDF, ainsi qu'une liste des systèmes complexes de fenêtres considérés à ce jour, font l'objet du paragraphe suivant.

4. Mesure des propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse de systèmes complexes de fenêtres

La mesure des propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse de systèmes complexes de fenêtres (BTDF) est réalisée à l'aide d'un goniophotomètre bidirectionnel basé sur des techniques d'imagerie numérique. Une description détaillée de ce dispositif expérimental, développé à l'EPFL et illustré à la Figure 4.1, est donnée à la référence (And04).

Le goniophotomètre est placé dans une chambre noire de dimensions égales à 15 x 7 x 8 m, munie de parois en velours et d'une moquette de couleur noire (facteur de réflexion inférieur à 1%). Le dispositif fait appel à une caméra CCD (Charge-Coupled Device), préalablement calibrée et munie d'un filtre photométrique, afin de capter le flux lumineux traversant l'échantillon. L'échantillon est éclairé pour ce faire à l'aide d'un projecteur lumineux muni d'une lampe à décharge (cf. Figure 4.1). Un plan triangulaire, revêtu d'une peinture blanche diffusante et opérant six rotations d'un angle de 60° à l'intérieur du goniophotomètre, permet la mesure du flux lumineux transmis par l'échantillon dans toutes les directions possibles d'émergence.

Le goniophotomètre est muni de moteurs électriques qui permettent de modifier la direction d'incidence du flux lumineux par rapport à l'échantillon (cf. Figures 3.2 et 3.3). L'ensemble de la procédure d'acquisition et de traitement d'image numérique est automatisé et géré par micro-ordinateur. Des résolutions très élevées tant au niveau des directions d'incidence que de celles d'émergence du flux lumineux peuvent ainsi être atteintes dans un temps de mesure raisonnable (moins d'une minute par direction d'incidence).

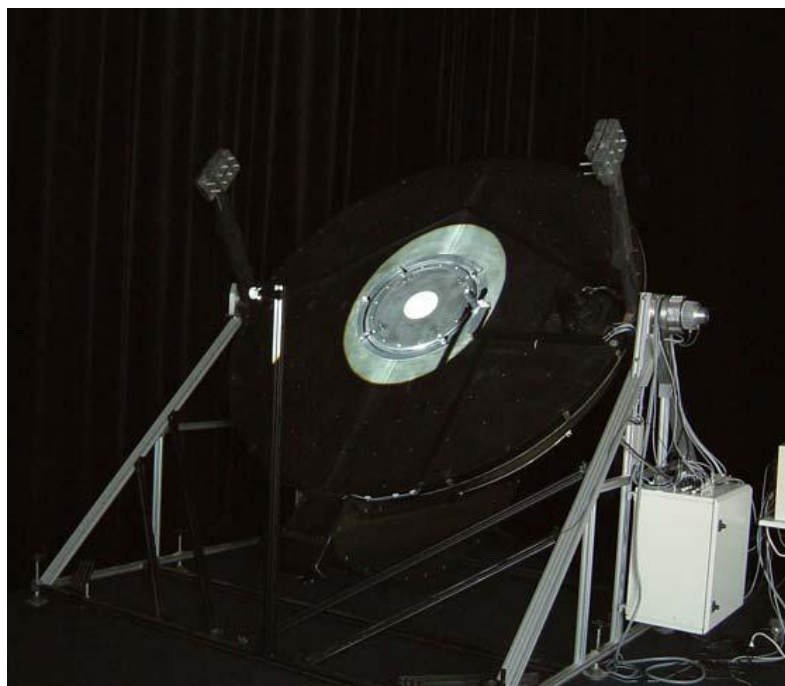


Figure 4.1 : Vue du goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique développé à l'EPFL en vue de la mesure des propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse de systèmes complexes de fenêtres.

Cet équipement a fait l'objet d'une révision complète dans le cadre du projet. Plusieurs de ses composants ont ainsi été remplacés et/ou recalibrés afin d'obtenir un fonctionnement optimal et une précision de mesure maximale du goniophotomètre. Les opérations suivantes ont ainsi été entreprises pour ce faire :

- fabrication et remplacement de l'un des éléments du filtre photométrique ;
- révision de la caméra numérique et remplacement de l'unité de contrôle du capteur CCD ;
- réparation et remplacement de l'un des câbles de commande des moteurs électriques ;
- réparation et remplacement de l'une des cartes électroniques de commande des moteurs électriques ;
- contrôle, simplification et « débogage » de certaines procédures informatiques.

Les données BTDF mesurées (BTDF Data) obtenues après traitement numérique, sont stockées en format ASCII dans des fichiers informatiques, dont le format a été défini dans le cadre de l'IEA Task 21 et a fait l'objet d'une convention internationale (IEA21). Ces données peuvent être représentées à des fins de visualisation sous les différentes formes suivantes :

- image numérique du flux lumineux transmis par l'échantillon;
- projection des données BTDF sur un hémisphère virtuel;
- solide photométrique;
- coupes transversales du solide photométrique.

La référence (And02) donne une description détaillée et illustre les possibilités de visualisation graphique des données BTDF obtenues à l'aide de ce dispositif.

La liste des systèmes complexes de fenêtres, dont la BTDF a été mesurée expérimentalement à l'aide du goniophotomètre bidirectionnel de l'EPFL, est relativement longue et comprend des :

- Matériaux diffusants
 - Verre acrylique (PMMA, 6mm d'épaisseur)
 - Feuille plastique (PTFE, 2.5 mm d'épaisseur)
- Déviateurs de lumière naturelle
 - Laser cut panel (Solartran, 6mm d'épaisseur)
 - SOLF Prismatic film (3M Company, 3mm d'épaisseur)
 - LumitopTM Sun-directing Glass (Vegla/Saint-Gobain, 25mm d'épaisseur)
 - Holographic Optical Element (BASF, 7mm d'épaisseur)
 - Serraglaze (Saint-Gobain, 25mm d'épaisseur)
 - Panneau prismatique (SITECO/Siemens, 12 mm d'épaisseur)
- Protections solaires
 - Stores en tissu de type DOLAN (Baumann-Hüppe)
 - Stores en tissu de type DOLAN DUO COLOR (Baumann-Hüppe)
 - Stores en tissu de type PANAMA (Baumann-Hüppe)
 - Stores en tissu de type PLISSEE (Baumann-Hüppe)
 - Stores en tissu de type ROLLO (Baumann-Hüppe)
 - Stores en tissu de type SHADOW (Baumann-Hüppe)
 - Stores en tissu réfléchissant de type VEROSOL (REVIS)
 - Stores à lamelles de couleur standard (Baumann-Hüppe)
 - Stores à lamelles gris métallisés/quartz (Baumann-Hüppe)
 - Stores à lamelles métalliques réfléchissantes (OKA Solar)
 - Stores à lamelles métalliques miroitées (Baumann-Hüppe)
 - Stores à lamelles métalliques miroitées (Köster)

Certains systèmes complexes de fenêtres ont fait l'objet d'une caractérisation photométrique BTDF complète selon toutes les 145 directions d'incidence, définies selon le protocole de Tregenza (cf. Figure 3.2). C'est le cas, en particulier, des trois dispositifs considérés dans le cadre de ce projet (Laser cut panel, 3M SOLF prismatic film, SSG Lumitop). Leur simulation par la technique de lancer de rayons (War98) est ainsi envisageable, en particulier en ce qui concerne la composante diffuse provenant de la voûte céleste. Dans les autres cas, seules des simulations de la composante directe de la lumière naturelle (lumière solaire) sont envisageable pour les directions d'incidence considérées. Une description des développements informatiques réalisés dans le cadre de ce projet en vue de réaliser ces simulations numériques est donnée ci-après.

5. Outil informatique simplifié de conception et de visualisation de systèmes complexes de fenêtres

Interface graphique

Par souci de compatibilité entre les différentes plateformes informatiques (Mac, Linux et Windows), l'outil informatique simplifié de visualisation de systèmes complexes de fenêtres – appelé **Geronimo** - a été réalisé au moyen de la toute dernière librairie Qt de Nokia (Nok21, version 4.7.4). Cette librairie permet une utilisation aisée de la gestion graphique des fenêtres d'affichage; le programmeur passe ainsi moins de temps à élaborer l'interface et peut se concentrer davantage sur son contenu. Pour la gestion de l'outil informatique simplifié, il a été fait plus particulièrement usage de :

- Gestion de l'interface « clavier – souris » permettant l'utilisation des *LineEdit*, *ComboBox*, *HorizontalSlider*, *PlainTextEdit*, *GroupBox*, *RadioButton* et *Label*. Ces éléments permettent à l'utilisateur d'interagir avec l'algorithme de calcul, notamment pour introduire les paramètres de simulation ;
- OpenGL, une librairie graphique permettant l'affichage rapide de formes géométriques et de volumes 3D mémorisés sur une carte graphique. Son implémentation dans Qt se nomme *GLWidget* et permet d'utiliser aisément des éléments graphiques OpenGL dans une sous-fenêtre du programme principal ;
- Gestion des événements de la souris permettant l'interprétation des actions conjuguées du « click » (droit, milieu ou gauche) et des mouvements de la souris. Cela permet de gérer le déplacement du point de vue de l'observateur dans le *GLWidget*, ainsi que la direction du regard ;
- Gestion de l'exécution de programmes en parallèle *Qthread*, qui permettent d'exécuter en tâche de fond le lancer de rayon et de surveiller le déroulement de ses étapes, de façon à ce que l'interface ne se bloque jamais.

La principale fenêtre d'interface de l'outil informatique simplifié a été optimisée, du point de vue de sa facilité d'utilisation et de sa compréhension, grâce à l'appui de plusieurs architectes du LESO-PB (Apiparn Borisuit, Chantal Basurto et Marja Edelman). Le programme Qt Designer a ainsi été utilisé pour créer un modèle *UI* (User-Interface), dont la Figure 5.1 illustre une copie d'écran.

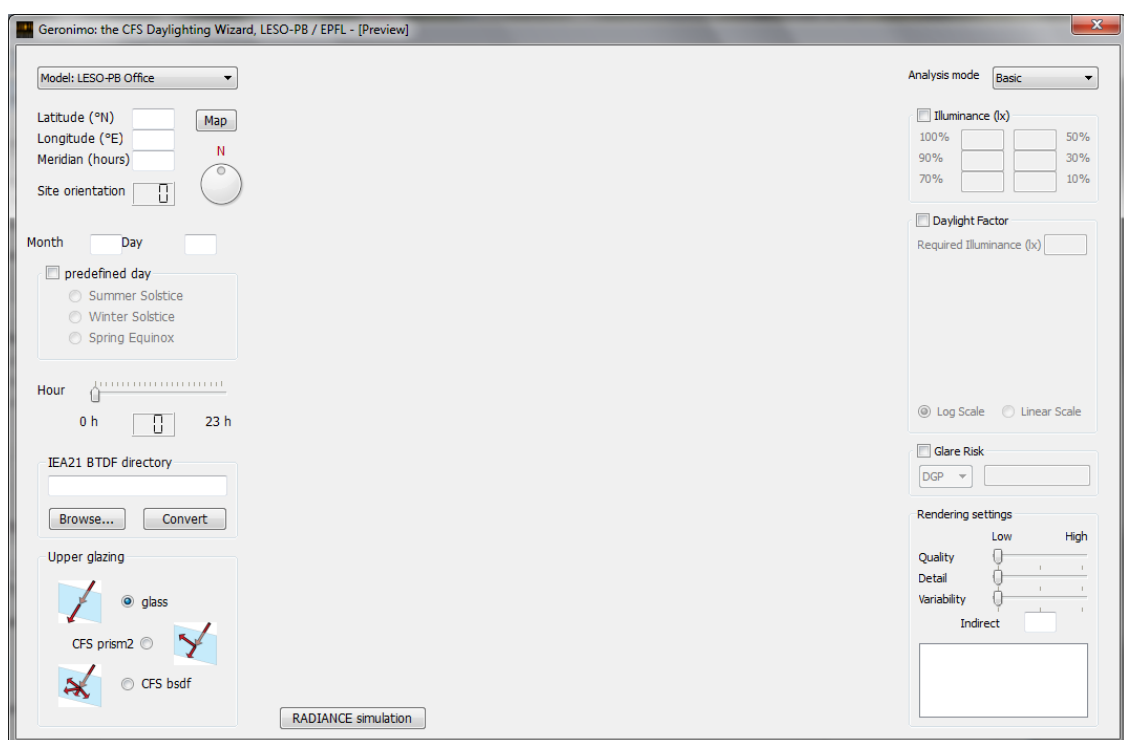


Figure 5.1 : Interface graphique (modèle Qt *UI*) de l'outil simplifié de visualisation de systèmes complexes de fenêtres (version Windows 7)

La partie gauche de la fenêtre permet de gérer le modèle du local de bureau à afficher sur l'écran (*Model*), de même que le lieu géographique de la simulation. L'utilisateur peut ainsi définir ce dernier au moyen de la latitude et la longitude du lieu ou encore sélectionner ce dernier sur une carte interactive, qui apparaît en cliquant sur le bouton *Map*. L'orientation du local peut être réglée par un bouton « radio » à l'aide d'un angle d'azimut, compris entre 0 et 359 degrés par rapport au Nord, compté dans le sens antihoraire. Le jour et l'heure de la simulation peuvent être définis précisément ; ils peuvent aussi être fixés à partir des dates

des solstices et des équinoxes. La partie *IEA BTDF Directory* permet de sélectionner un système complexe de fenêtres, dont les propriétés bidirectionnelles de transmission ont été mesurées, et de les convertir dans un format utilisable pour la visualisation. Le degré d'approximation du système complexe de vitrage, dépendant de la procédure de calcul (cf. paragraphe "Technique de lancer de rayons"), peut aussi être sélectionné sur cette partie gauche, selon les trois modes suivants :

- Glass : double vitrage isolant standard (verre transparent, non teinté) ;
- CFS prism2 : utilisation de la fonction *BTDF2prism2* (Kae04) pour la simulation du local en éclairage naturel. Cette application suppose deux redirections principales de la lumière naturelle au travers du système complexe de fenêtre et représente une simplification considérable de la fonction BTDF ;
- CFS bsdf : utilisation d'une matrice de transmission (145x1297), basée sur le protocole de Tregenza (cf. Figure 3.3). Cette application considère 1297 redirections possibles de la lumière naturelle dans tout l'hémisphère et permet une prise en compte fidèle de la fonction BTDF mesurée avec une résolution de $5^\circ \times 5^\circ$.

La partie droite de la fenêtre d'interface permet de sélectionner les options possibles pour le traitement et l'analyse des résultats de simulation. Différents modes d'utilisateurs sont envisageables, tels que *Basic*, *Medium*, *Advanced User* afin de prendre en compte les attentes de chaque type d'utilisateur. Ces modes sont présentés en détail dans paragraphes suivants ; il en est de même des résultats de simulation correspondants.

La partie centrale de la fenêtre d'interface permet l'affichage au moyen d'OpenGL (*GLWidget*) du local de bureau considéré, à partir d'un point de vue choisi par défaut (cf. Figure 5.2). L'interaction à l'aide la souris dans la zone d'affichage du local (un bureau standard dans ce cas) permet par un simple *clic* de modifier l'axe de vision (direction du regard) et de déplacer l'observateur sur l'axe de vision à l'aide de la roulette (en avant et en arrière). La Figure 5.2 illustre l'écran graphique de l'utilisateur au moment du lancement de l'outil simplifié ; le cas présenté est celui d'un local de bureau standard du bâtiment LESO, choisi par défaut.

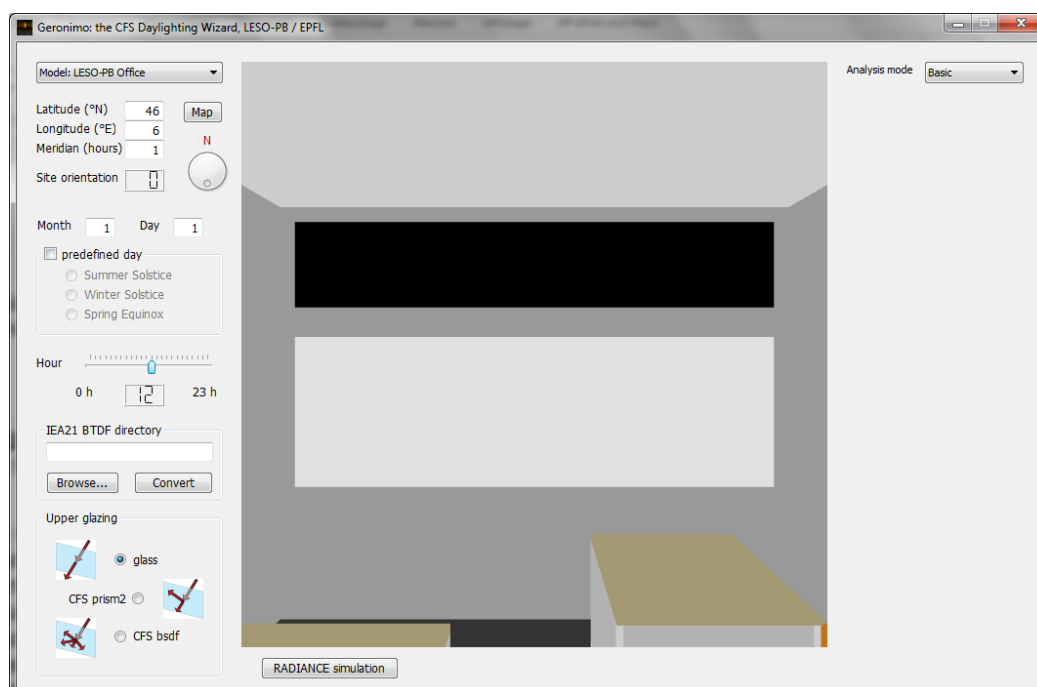


Figure 5.2 : Vue de l'interface graphique de l'outil simplifié de conception et de visualisation lors d'un premier lancement du programme (version Windows 7).

Modèles de simulation

La fenêtre supérieure de ce local standard est affichée en noir sur la figure précédente, afin d'indiquer l'emplacement sur lequel est placé le système complexe de fenêtres simulé. Le choix du type de local a été volontairement limité à huit variantes, afin de faciliter l'utilisation de l'outil simplifié dans une première approche. Les huit types de locaux disponibles peuvent être répartis en 3 catégories:

- Local de bureau standard du bâtiment solaire expérimental LESO, orienté su sud et muni d'un vitrage avancé sur la partie supérieure de la façade (Lin10);
- Six bureaux types issus de l'étude typologique menée par Golay à l'EPFL dans le cadre du projet de recherche interdisciplinaire LUMEN (Mor98) ;
- Local de bureau entièrement paramétrable (local *base_7*), destiné à un utilisateur expert maîtrisant le programme de simulation Radiance (utilisateur *Avancé*).

Les bureaux types, provenant de l'étude typologique réalisée par Golay, sont ainsi utilisés comme modèles prédéfinis. Ces derniers, correspondant aux typologies 1, 4a, 4b, 4c, 5 et 10 de cette étude, ont été choisis dans la mesure où ils permettent la mise en place de systèmes complexes de fenêtres sur la partie supérieure de la façade. La Figure 5.3 illustre les six bureaux types issus de cette étude typologique.

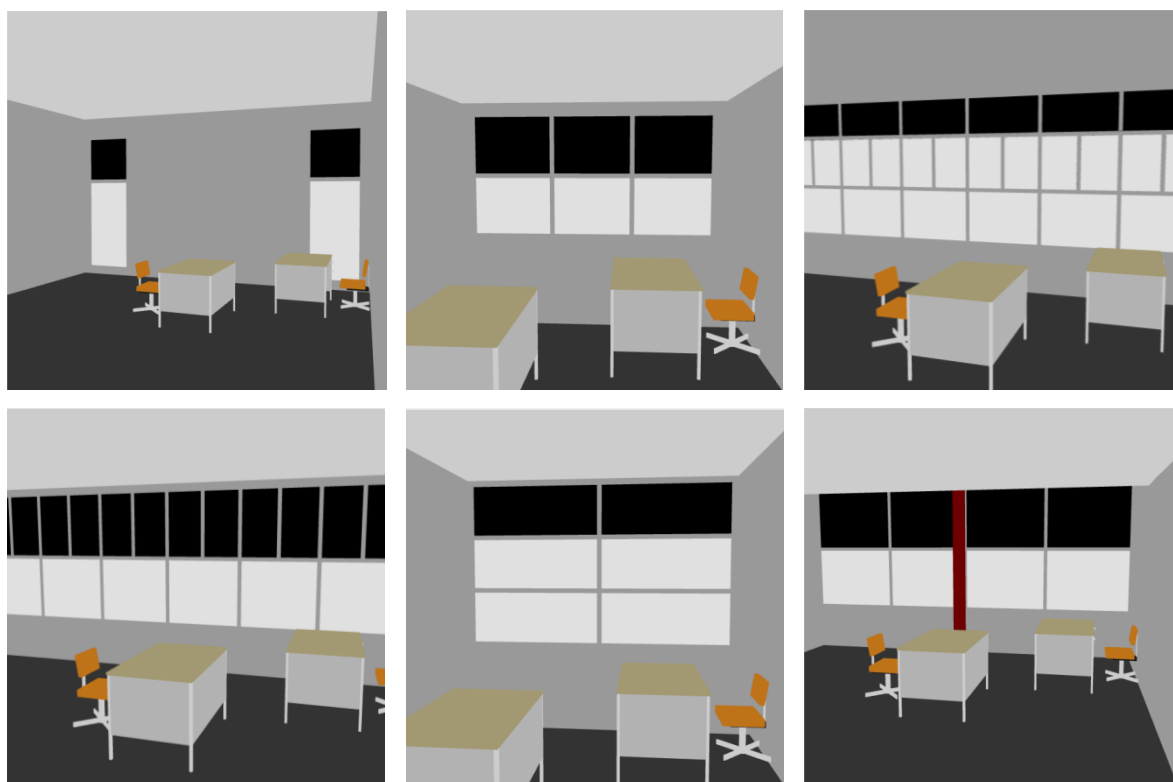


Figure 5.3 : Modèles de bureaux prédéfinis dans l'interface graphique, provenant de l'étude typologique menée par Golay à l'EPFL, représentés en visualisation *OpenGL*.

Modes d'utilisation

Trois différents types d'utilisateurs peuvent être pris en charge par l'outil simplifié de conception et de visualisation de systèmes complexes de fenêtres. Ces derniers sont illustrés au moyen du rendu graphique d'un local de bureau standard du bâtiment expérimental LESO, muni d'un double vitrage conventionnel sur la partie supérieure de la façade. Les simulations sont réalisées à l'aide de la méthode de lancer de rayons arrière (Backward Raytracing), présentée ci-dessous :

Mode *Basic*

Le mode *Basic* permet une visualisation à l'intérieur du local, conforme à la perception visuelle humaine. Cette dernière obéit à une loi logarithmique en ce qui concerne le champ de luminances. La Figure 5.4 illustre une simulation en éclairage naturel, obtenue en mode *Basic* en cliquant sur le bouton *RADIANCE simulation*.

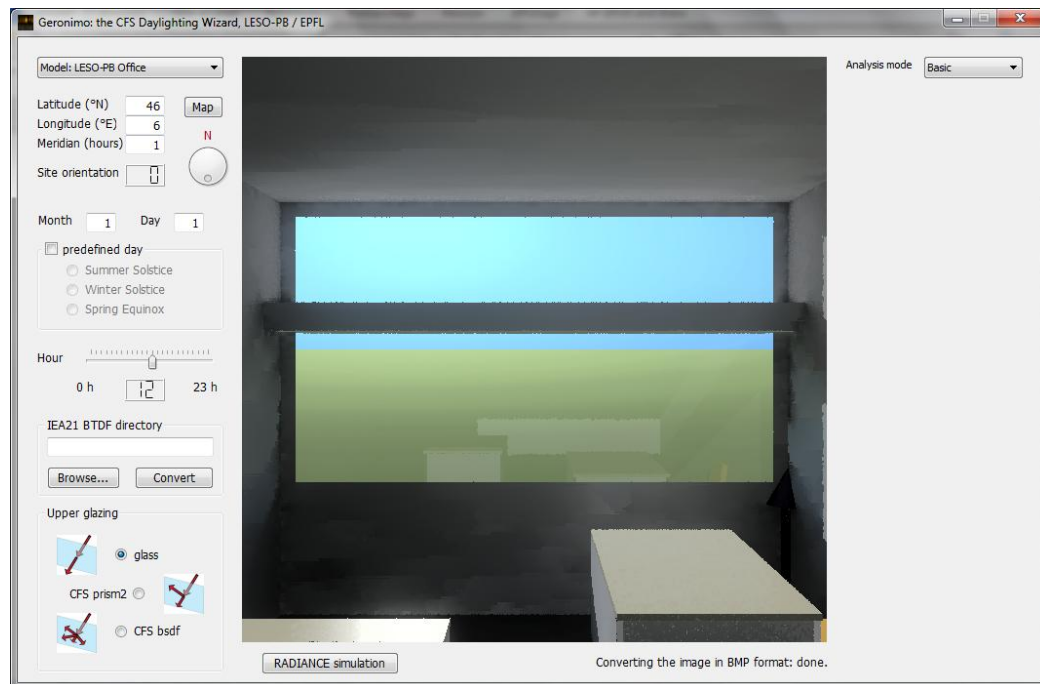


Figure 5.4 : Simulation en éclairage naturel d'un local standard LESO en mode *Basic*

La ligne de texte, située à droite du bouton *RADIANCE simulation*, observable à la Figure 5.4, informe l'utilisateur sur l'étape de simulation en cours par lancer de rayons ; elle fait part à celui-ci du succès ou de l'éventuel échec de la simulation. La dernière étape de la simulation est la transformation de l'image de synthèse en format BMP, qui est affiché ensuite en lieu et place de la vue en *OpenGL*. Ce format a l'avantage d'être simple et compatible avec toutes les plateformes micro-informatiques actuelles (Windows, Mac, Linux).

Mode *Medium*

Trois options différentes d'analyse des résultats de simulation par lancer de rayons sont possibles dans le mode *Medium*. Les grandeurs photométriques suivantes peuvent ainsi être affichées :

- l'éclairement lumineux (*illuminance*) ;
- le facteur de lumière du jour (*daylight factor*) ;
- les risques d'éblouissement (*glare risks*).

Au cas où l'utilisateur sélectionne l'éclairement lumineux (*illuminance*) comme variable d'analyse et actionne le bouton *RADIANCE simulation*, une image en fausses couleurs est calculée ; celle-ci permet d'afficher les différents niveaux d'éclairement lumineux sur les surfaces intérieures du local. Une échelle de couleurs allant du bleu (10% de l'éclairement maximal) au jaune (100% de l'éclairement maximal) est utilisée pour faciliter la visualisation de cette grandeur ; les valeurs d'éclairement, correspondant à 100%, 90%, 70%, 50%, 30% et 10% de la valeur maximale, sont affichées par ordre décroissant sur la partie droite de la fenêtre.

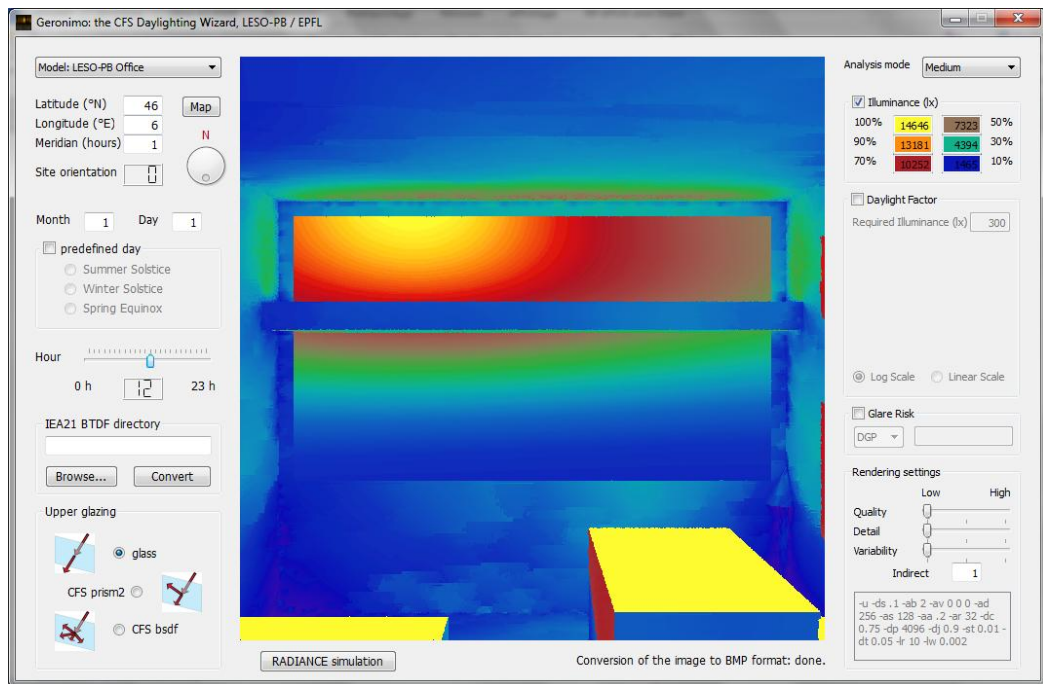


Figure 5.5 : Analyse de *éclairage lumineux (illuminance)* d'un local standard LESO en mode *Medium*.

Dans le cas où l'utilisateur sélectionne le facteur lumière du jour (*daylight factor*) comme variable d'analyse, le programme fait appel à un ciel de type couvert (*overcast sky*), formellement défini par la Commission Internationale d'Eclairage (CIE70), pour effectuer une simulation par lancer de rayons (cf. Figure 5.6).

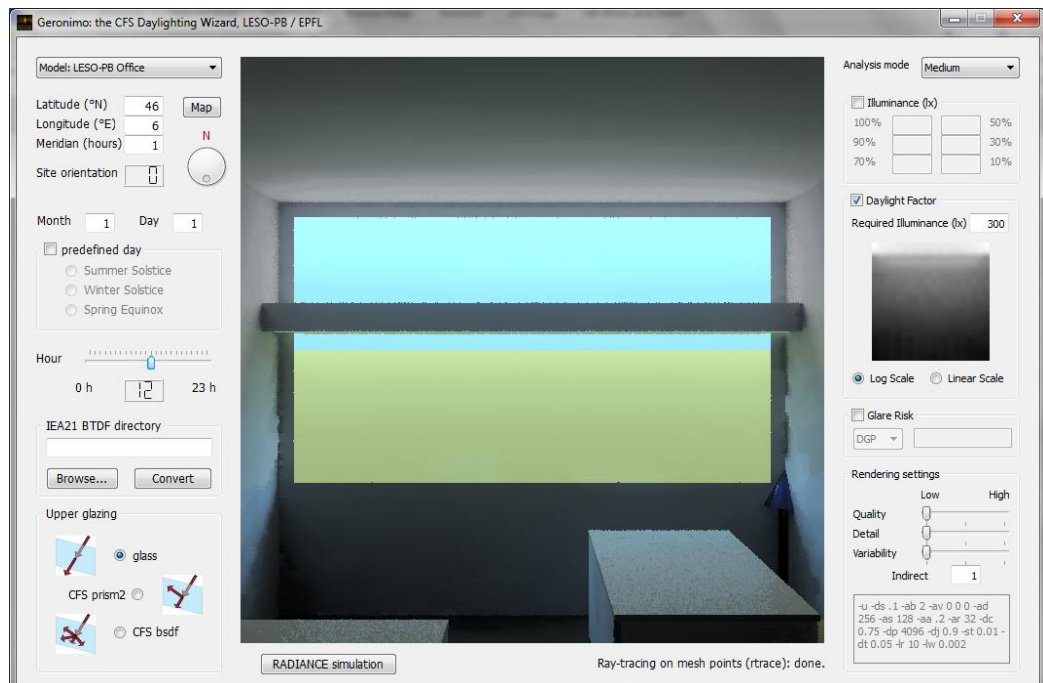


Figure 5.6 : Analyse du *facteur lumière du jour (daylight factor)* d'un local standard LESO en mode *Medium*

Le facteur lumière du jour est illustré graphiquement sur la partie droite de la fenêtre par le biais de différents tons de gris ; ces valeurs, calculées au niveau du plan de travail à 80 cm du sol, sont réparties sur une grille de 20 x 20 points équidistants dans le plan du local.

Une échelle linéaire ou logarithmique peut être sélectionnée pour représenter les différentes valeurs de facteur lumière du jour. Le ton noir de l'image (ton gris correspondant au digit 0) est ajusté automatiquement en fonction de l'éclairement prescrit sur le plan de travail (*required Illuminance*) ; il correspond à une autonomie nulle en éclairage naturel sur l'ensemble de l'année. Toutes les surfaces du local représentées en noir sur l'image nécessitent ainsi un important complément en éclairage artificiel.

La Figure 5.6 montre le résultat d'une telle simulation avec analyse du facteur lumière du jour. Les deux modes d'analyse en éclairage lumineux et en facteur de lumière du jour peuvent aussi être combinés ; cette option n'est toutefois pas illustrée ici.

Dans la cas où l'utilisateur sélectionne les risques d'éblouissement (*glare risks*) comme variable d'analyse, une identification des sources potentielles d'éblouissement est réalisée ; les différents indices d'éblouissement sont calculés par la suite. Les indices d'éblouissement considérés par le programme, définis de manière détaillée à la référence (CIE83), sont les suivants:

- DGI - Discomfort Glare Index ;
- CGI - CIE Glare Index ;
- VCP - Visual Comfort Probability
- UGR - Unified Glare Rating ;
- DGP - Discomfort Glare Rating.

Un menu déroulant, situé dans le *ComboBox*, permet de sélectionner l'indice d'éblouissement souhaité. La Figure 5.7 illustre les sources d'éblouissement potentielles et l'indice UGR calculé pour un local de bureau standard LESO.

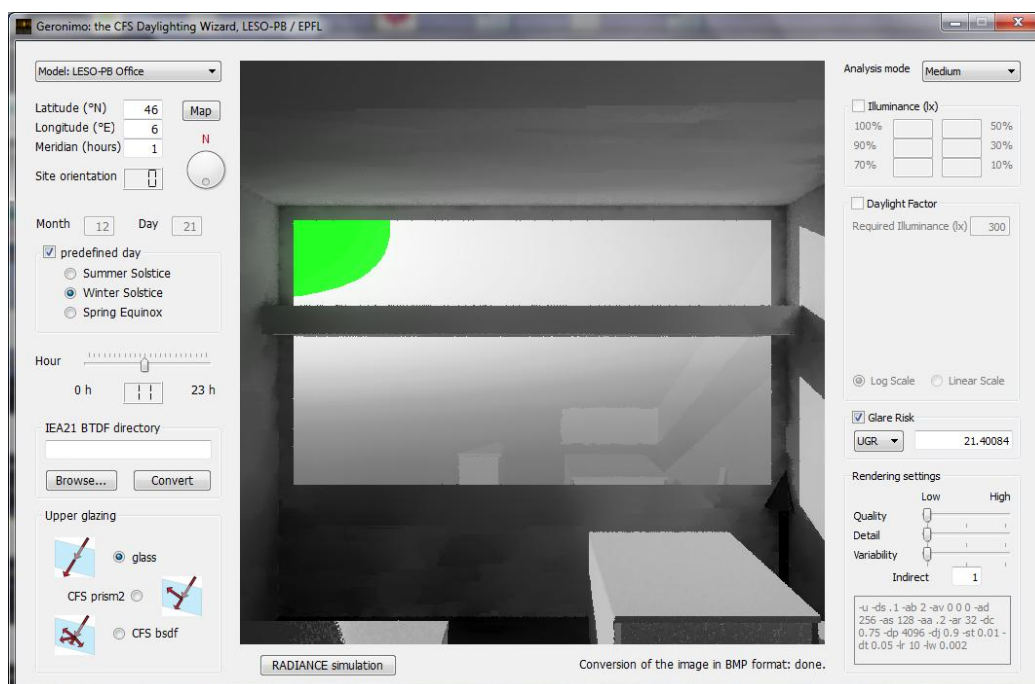


Figure 5.7 : Analyse des risques d'éblouissement (*glare risks*) d'un local standard LESO en mode *Medium* ; la surface de couleur verte indique une source d'éblouissement potentiel due au soleil.

L'utilisateur a aussi la possibilité, dans le cadre du mode *Medium*, de gérer la précision du lancer de rayons au moyen des paramètres de réglage de la simulation (*rendering settings*). La qualité, la définition et la variabilité de l'image de synthèse peuvent ainsi être sélectionnés selon les trois modes de résolution basse (*low*), moyenne (*medium*) et haute (*high*). Certains paramètres ont été préalablement définis par défaut, afin d'obtenir rapidement des résultats de simulation offrant une approximation suffisante des niveaux d'éclairement lumineux. Des images de haute qualité peuvent être obtenues moyennant un temps de calcul CPU de plusieurs heures. Le nombre d'inter réflexions de la composante diffuse du flux lumineux (*indirect*) est un autre paramètre ajustable de la simulation. Ils exercent une grande influence sur la qualité du rendu ; sa valeur a été fixée par défaut à une seule réflexion.

Mode Advanced

Il est indispensable pour les utilisateurs avancés de pouvoir modifier à leur guise les principaux paramètres de simulation. En choisissant le mode *Advanced*, l'accès à tous les paramètres du lancer de rayons est ainsi possible : ces derniers peuvent être modifiés au bas du cadre de la partie droite de l'interface. Les utilisateurs avancés peuvent aussi créer leurs propres modèles numériques tridimensionnels de locaux à l'aide d'un *Modeller* et visualiser ces derniers au moyen de l'interface graphique.

Technique du lancer de rayons

Le rendu des images de synthèse est réalisé à l'aide du programme de calcul d'éclairage Radiance (War98). Il s'agit d'un logiciel *Open Source*, qui a été maintes fois validé et reconnu par la communauté internationale pour la qualité de ses rendus et la fiabilité de la simulation par rapport à la réalité.

La version 4.1 du logiciel a été récemment mise à disposition du public en novembre 2011. Elle inclut le matériau *bsdf*, qui permet de représenter la distribution du flux lumineux au travers d'un système complexe de fenêtres, au moyen d'une matrice de transmission lumineuse (War09). Cette dernière se présente sous la forme de fichiers XML, dont la base géométrique est non conventionnelle (cf. Figure 5.8). Afin de profiter de ces nouveaux développements, les données BTDF, transcrites initialement dans le format défini sur le plan international (IEA21), ont été converties dans le format directement utilisable par la routine *bsdf*.

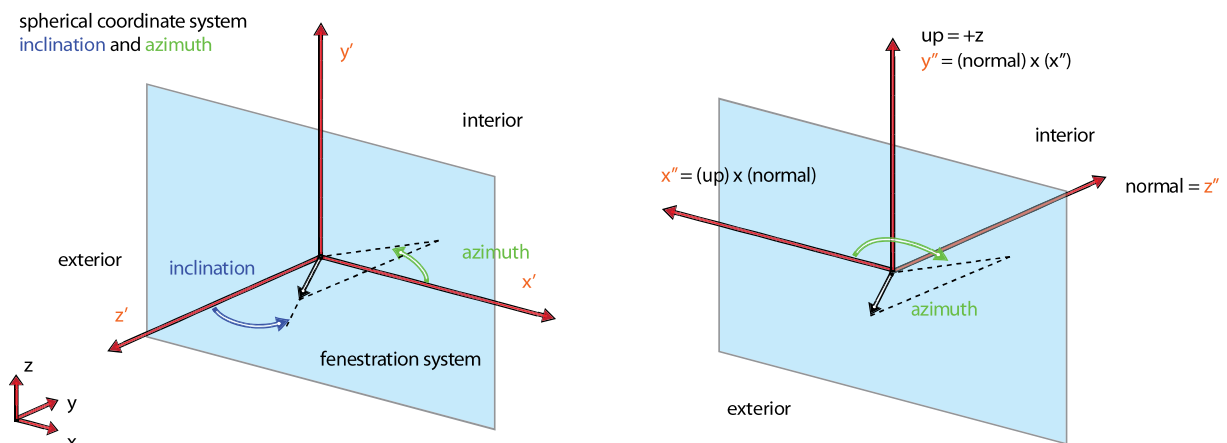


Figure 5.8 : Bases orthonormées utilisées pour la simulation de systèmes complexes de fenêtres: (x, y, z) - Base cartésienne selon Radiance, (x', y', z') - Base associée aux données BTDF (IEA21), (x'', y'', z'') - Base associée à la routine *bsdf* (« up » = $+Z$).

L'analyse des différentes bases géométriques, ainsi que leurs transformations mutuelles, a fait l'objet d'une communication dans la cadre de la conférence internationale CISBAT 2011 (Kae11, cf. Annexe A) ; elles ne sont pour cette raison pas présentées en détail. Les BTDF transformées dans le format XML permettent de réaliser des simulations en éclairage naturel plus précises que celles menées à bien jusqu'alors au moyen de la fonction *BTDF2prism2* (Kas04) (cf. Figure 5.9).



Figure 5.9 : Visualisation d'un système complexe de fenêtres de type *Laser cut panel* ; de gauche à droite : fenêtre supérieure munie d'un double vitrage (*glass*), simulation par la fonction *BTDF2prism2* et simulation par la fonction *mkillum* et le matériau *bsdf*.

Comme on peut le constater sur cette figure, une amélioration significative du réalisme est apportée par l'utilisation de la fonction *mkillum* et du matériau *bsdf*. Cette amélioration du rendu de la simulation numérique est importante. Elle permet de reproduire plus fidèlement les propriétés lumineuses des systèmes complexes de fenêtres, caractérisés par une grande dispersion du flux lumineux transmis; cette situation est observée pour la plupart des protections solaires et pour certains déviateurs de lumière naturelle (cf. Figure 3.1). La fonction *BTDF2prism2* ne permet pas d'offrir une telle précision, les données BTDF étant approximées, dans ce cas, par deux directions principales de transmission lumineuse. Une première vérification du résultat de lancer de rayons au moyen du fichier XML a été effectuée sur la base d'images de synthèse. Une validation plus approfondie au moyen d'un gonio-photomètre virtuel ou par comparaison avec des mesures expérimentales sur modèles ou modules d'expérimentation doit permettre de confirmer ces premiers résultats.

6. Algorithme informatique détaillé de dimensionnement de systèmes complexes de fenêtres

La société Relux Informatik AG a été approchée dans le cadre de ce projet en vue de la prise en compte des données BTDF, mesurées au LESO-PB/EPFL, dans leur logiciel de calcul d'éclairage. Le logiciel ReluxPro (Rel11), développé par cette dernière, est un outil informatique qui permet rapidement et efficacement :

- de sélectionner des luminaires dans une base de données photométriques à partir de leurs images photographiques;
- de placer ces luminaires dans un local à l'aide de la souris et d'un modèle virtuel ;
- d'obtenir un rendu du local et des luminaires au moyen d'images de synthèse ;
- de calculer l'éclairement lumineux sur les différentes surfaces du local.

Le logiciel fait appel à deux procédures de calcul différentes : la première est basée sur une méthode de radiosité, permettant un calcul très rapide et un rendu approximatif du local con-

sidé, la seconde utilise la technique du lancer de rayons, issue du programme Radiance (War98), offrant des résultats numériques plus précis.

Une base de données, contenant plus de trois cent mille luminaires disponibles sur le marché, est à disposition des utilisateurs du programme. Le principal atout du logiciel ReluxPro réside principalement dans ses excellentes capacités de simulation en matière d'éclairage artificiel : ces dernières sont à la base du succès du logiciel auprès des fabricants d'éclairage et du développement économique de la société Relux Informatik AG. La prise en compte de l'éclairage naturel par le logiciel ReluxPro est malheureusement encore lacunaire : celle-ci est indispensable, si l'on veut mettre en valeur les économies potentielles d'énergie qui lui sont associées.

La société Relux Informatik AG a été ainsi convaincue de l'intérêt, que représente une collaboration scientifique avec le LESO-PB/EPFL pour ce logiciel. Cette dernière vise, ni plus, ni moins, à permettre l'intégration des systèmes complexes de fenêtres dans le logiciel ReluxPro au même titre que des luminaires d'éclairage artificiel.

La collaboration avec Carsten Bauer, responsable du développement du moteur de lancer de rayons dans le logiciel ReluxPro, a permis d'aboutir à des améliorations substantielles des possibilités de calcul du logiciel en matière d'éclairage naturel. La nouvelle version de ReluxPro, d'ores et déjà disponible gratuitement sur le Web (Rel11), intègre la possibilité de simuler des systèmes complexes de fenêtres, mesurés au LESO-PB/EPFL dans le format XML compatible avec Radiance (cf. paragraphe 4). Une première version d'une base de données, associée aux systèmes complexes de fenêtres, a été réalisée à des fins de démonstration; elle comprend les trois déviateurs de lumière naturelle décrits au paragraphe (Laser cut panel, 3M SOLF™ Prismatic film et SSG Lumitop™).

La Figure 6.1 présente une capture écran du logiciel ReluxPro. Une sélection du système complexe de fenêtres, placé dans la partie supérieure du vitrage, est possible à l'aide de la souris. Le menu déroulant donne accès à un double vitrage isolant (*defaultGlass*), ainsi qu'aux systèmes complexes de fenêtres inclus dans la base de données.

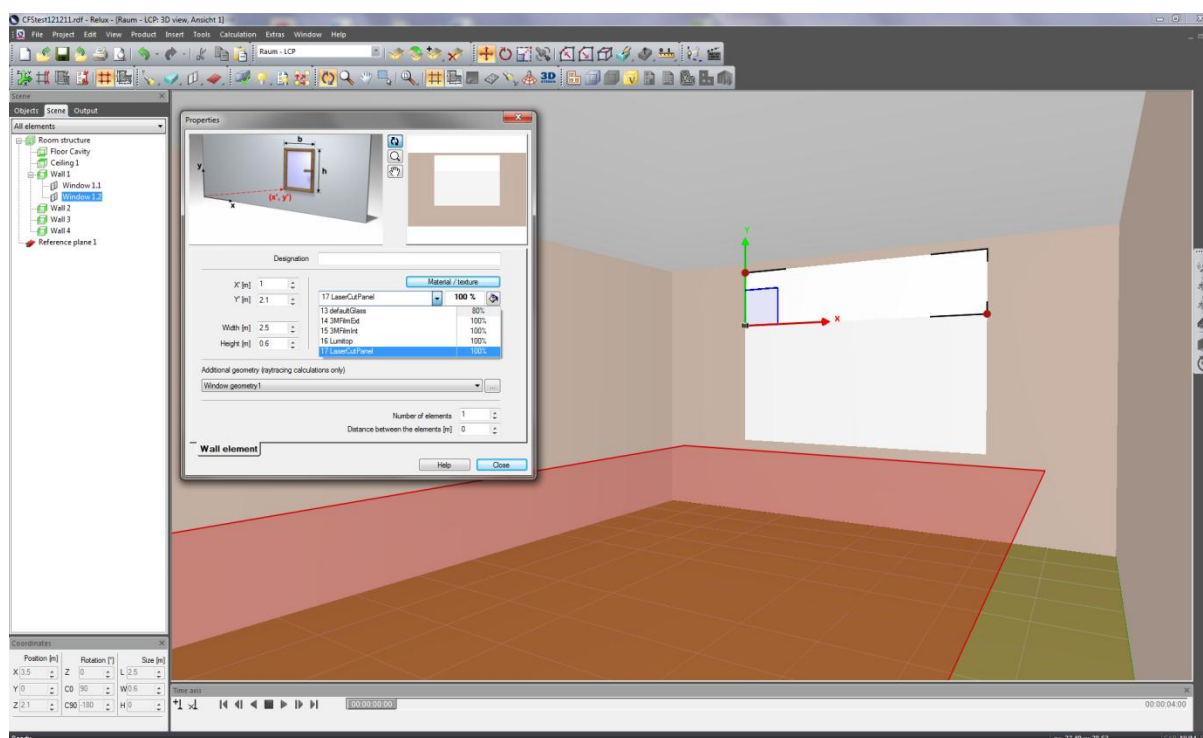


Figure 6.1 : Capture d'écran du logiciel ReluxPro - Local type muni d'un système complexe de fenêtres sur la partie supérieure du vitrage.

En parcourant la base de données, l'utilisateur bénéficie d'informations sur les systèmes complexes de fenêtres disponibles. La Figure 6.2 suit l'organisation de la base de données de systèmes complexes de fenêtres, offrant ainsi la possibilité de :

- sélectionner, en premier lieu, les matériaux qui influencent le tracé des rayons lumineux (*raytracer materials*) (cf. Figure 6.2, en haut, à gauche) ;
- de sélectionner, dans une seconde étape, un des fabricants de systèmes complexes de fenêtres (*manufacturers products*) (cf. Figure 6.2, en haut, à droite) ;
- de sélectionner finalement l'un des produits offerts par le fabricant choisi au préalable (cf. Figure 6.2, bas).

L'organisation de cette base de données est comparable à celle de la base de données de luminaires, permettant ainsi une même navigation efficace et rapide au travers des différents produits. Les produits des sociétés 3M et Saint-Gobain sont illustrés au bas de cette figure.

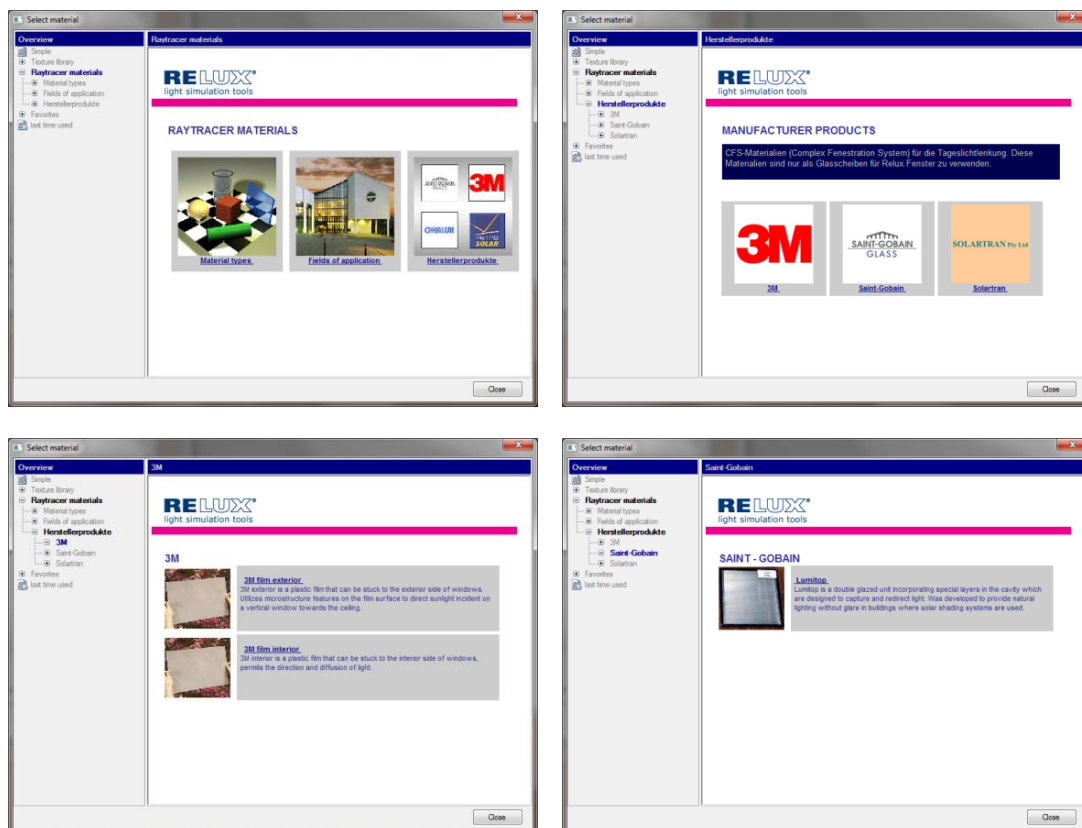


Figure 6.2 : Capture d'écran du logiciel ReluxPro - Base de données des matériaux modifiant le tracé des rayons lumineux.

Après avoir défini les propriétés géométriques et photométriques du local considéré et procédé à la sélection des divers matériaux et systèmes complexes de fenêtres, une simulation par lancer de rayons peut être lancée par l'utilisateur. La Figure 6.3 illustre le résultat d'une telle simulation obtenu sous la forme d'une image de synthèse du local : le rendu de ce dernier met en évidence le déviateur de lumière naturelle *Laser cut panel* situé sur la partie supérieure du vitrage. La distribution de luminance du ciel est du type « CIE ciel serein » ; la position du soleil correspond à celle du 10 mai à 12h30 heure légale à Bâle. La déviation de la composante directe de la lumière naturelle vers le plafond, due au *Laser cut panel*, est observable sur cette figure.

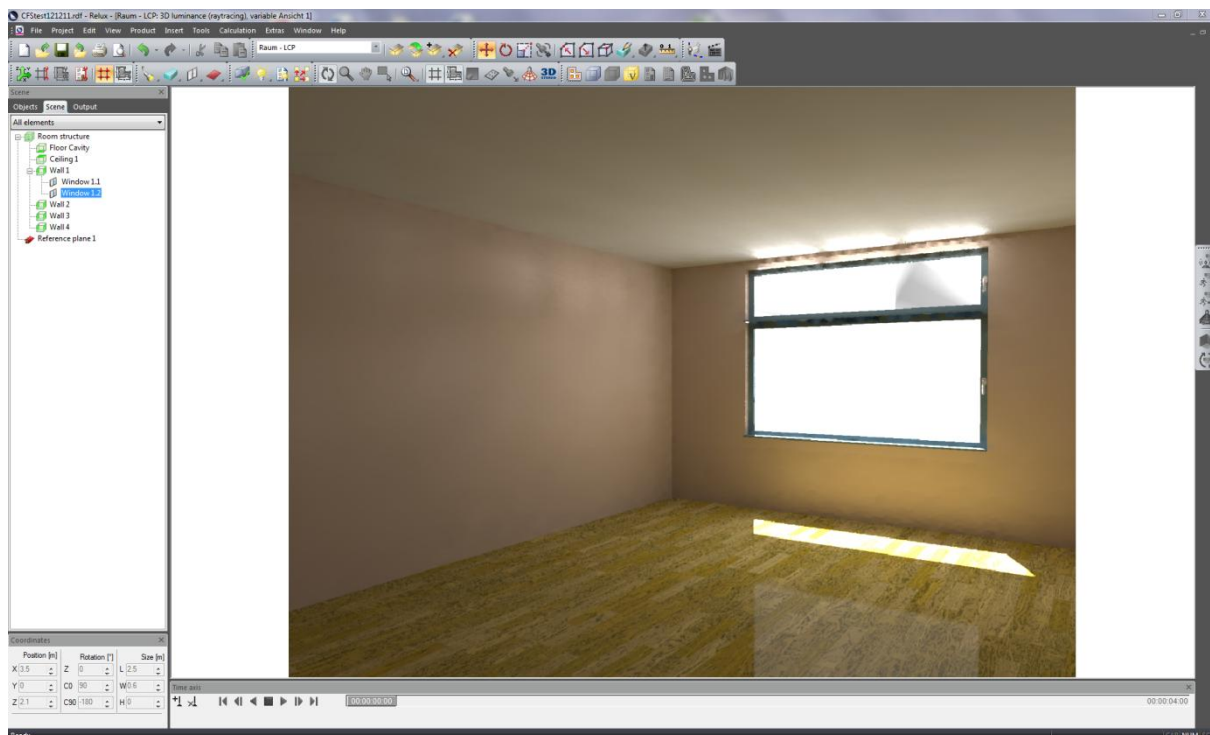


Figure 6.3 : Capture d'écran du logiciel ReluxPro - Image de synthèse d'un local muni d'un déviateur de lumière naturelle de type *Laser cut panel* situé sur la partie supérieure du vitrage.

Les paramètres de simulation du lancer de rayons peuvent être ajustés dans le mode expert du programme ; celui-ci permet, par exemple, à l'utilisateur de modifier la subdivision géométrique de la fenêtre pour le rendu final. La version actuelle du logiciel ReluxPro est toutefois encore limitée : elle ne permet d'effectuer des simulations de systèmes complexes de fenêtres qu'au moyen de la méthode de lancer de rayons. La procédure de calcul par radiosité n'a pour l'instant pas été corrigée dans ce sens ; des modifications seront vraisemblablement apportées ultérieurement au logiciel ReluxPro par son propriétaire. L'utilisateur ne peut, pour cette raison, procéder à des simulations des systèmes complexes de fenêtres qu'en faisant appel au module « Lancer de rayons » du logiciel.

Grâce à la collaboration, établie dans le cadre de ce projet entre le LESO-PB/EPFL et la société Relux Informatik AG, le logiciel ReluxPro dans sa version actuelle d'effectuer les tâches informatiques suivantes :

- Simuler des systèmes complexes de fenêtres intégrés dans la partie supérieure du vitrage d'un local éclairé par la lumière du jour ;
- Prendre compte la contribution de la lumière naturelle à l'éclairage du local en conjonction avec celle de la lumière artificielle ;
- Accéder à une liste de fabricants de systèmes complexes de fenestration et de produits mis sur le marché ;
- Dimensionner des systèmes complexes de fenêtres pour une utilisation optimale de la lumière naturelle et d'une optimisation des conditions de confort visuel du local.

Le nouveau logiciel ReluxPro dans sa version β a été mis à disposition de certains collaborateurs du LESO-PB/EPFL, afin de procéder à l'évaluation de ses performances et à l'identification de possibles erreurs de programmation. Ces derniers ont suivis les cours « Relux Pro Access » et « Relux Interior 1 », donnés par Relux Informatik AG, en vue de se familiariser au mieux avec ce programme.

Le logiciel avec son extension a été mis à disposition du grand public sur le Web à partir du mois d'août 2011. Une présentation conjointe de **Geronimo** et de ReluxPro a été réalisée en première mondiale au « 10th International Radiance Workshop » qui s'est tenu du 24 au 26 août au Lawrence Berkeley National Laboratory en Californie/Etats-Unis (Rad11).

Les efforts du partenaire industriel du projet se concentreront à l'avenir sur la promotion du nouveau logiciel et sur la recherche de sociétés industrielles susceptibles d'enrichir la base de données par de nouveaux de systèmes complexes de fenêtres ; une telle démarche a déjà été appliquée avec succès en ce qui concerne la base de données de luminaires. La validation de l'outil informatique par le biais de mesures sur des modules d'expérimentation en éclairage naturel permettra de compléter le projet (Tha08).

7. Mise en œuvre de l'outil informatique

Une première mise en œuvre de l'outil informatique de conception et de dimensionnement en éclairage naturel **Geronimo** a été effectuée dans le cadre de l'étude en éclairage naturel de la bibliothèque universitaire de l'Institut de Technologie de Monterrey, situé dans la ville de Zacatecas au Mexique (22° 78'N latitude, 102°58'W longitude). La Figure 7.1 illustre ce bâtiment, ainsi qu'une vue intérieure du service administratif de la bibliothèque, dont l'un des bureaux fait l'objet d'une analyse de ses performances lumineuses.

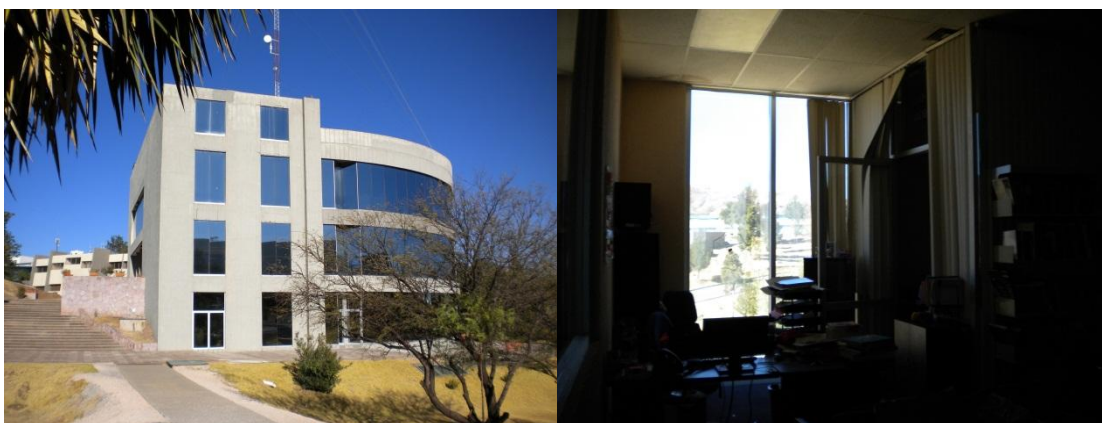


Figure 7.1 : Vue extérieure de la bibliothèque universitaire de l'Institut de Technologie de Monterrey (Zacatecas, Mexique), comprenant un local de bureau au rez-de-chaussée (gauche) ; vue intérieure du local, orienté au sud-ouest et muni de vitrages teintés (droite).

Le local de bureau considéré est situé au rez-de-chaussée sur la façade sud-ouest du bâtiment. Il est muni de vitrages teintés, caractérisés par une transmission lumineuse de 31%, limitant fortement la pénétration de la lumière naturelle dans le local (cf. Figure 7.1, droite). Le bâtiment fait l'objet d'une analyse approfondie en éclairage naturel dans le cadre d'une thèse de doctorat menée au LESO-PB (Bas10). Celle-ci consiste à étudier les possibilités d'implantation de déviateurs de lumière naturelle dans les conditions lumineuses propres au centre du Mexique, dominées par le ciel serein. L'étude est menée sur le plan expérimental par l'intermédiaire de mesures de performances lumineuses « in situ » et par des simulations numériques réalisées à l'aide du programme **Geronimo**. La référence (Bas11) donne un aperçu des premiers résultats obtenus dans le cadre de ce travail.

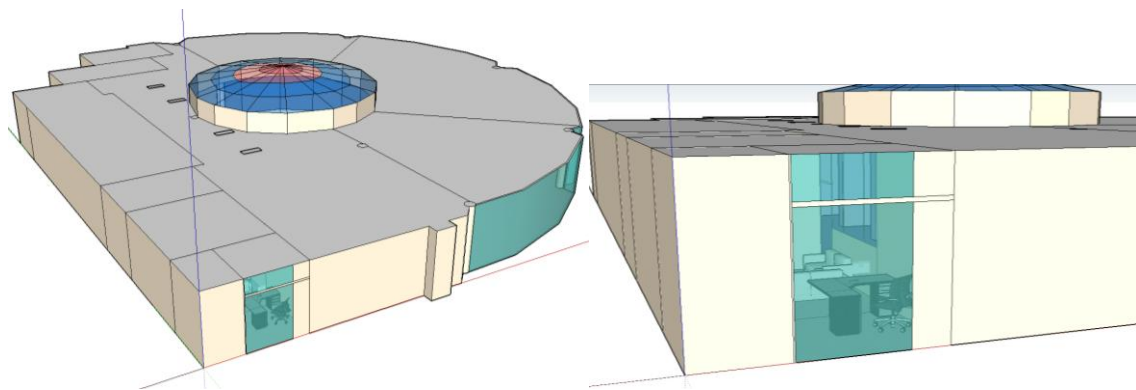


Figure 7.2 : Modèle numérique tridimensionnel de l'Institut de Technologie de Monterrey (Zacatecas, Mexique) (gauche) ; vue extérieure rapprochée du local de bureau considéré dans cette étude (droite).

Un modèle numérique de simulation, illustré à la Figure 7.2, a été élaboré à cet effet à l'aide du programme *Google Sketch-up*. Ce dernier a été employé pour mener à bien des simulations numériques par le biais du programme **Geronimo** et procéder à une réhabilitation du local sur le plan de l'éclairage naturel. Une sélection de déviateurs de lumière naturelle, appropriés aux conditions de ciel serein (laser cut panel, 3M SOLF prismatic film, etc.), a été effectuée pour ce faire.

La Figure 7.3 présente un rendu du local obtenu dans les conditions de ciel serein pour le mois de février à midi. Le cas considéré correspond à la situation actuelle du local, muni de vitrages teintés, caractérisé par un éclairement minimal sur le plan de travail de 1032 lux.

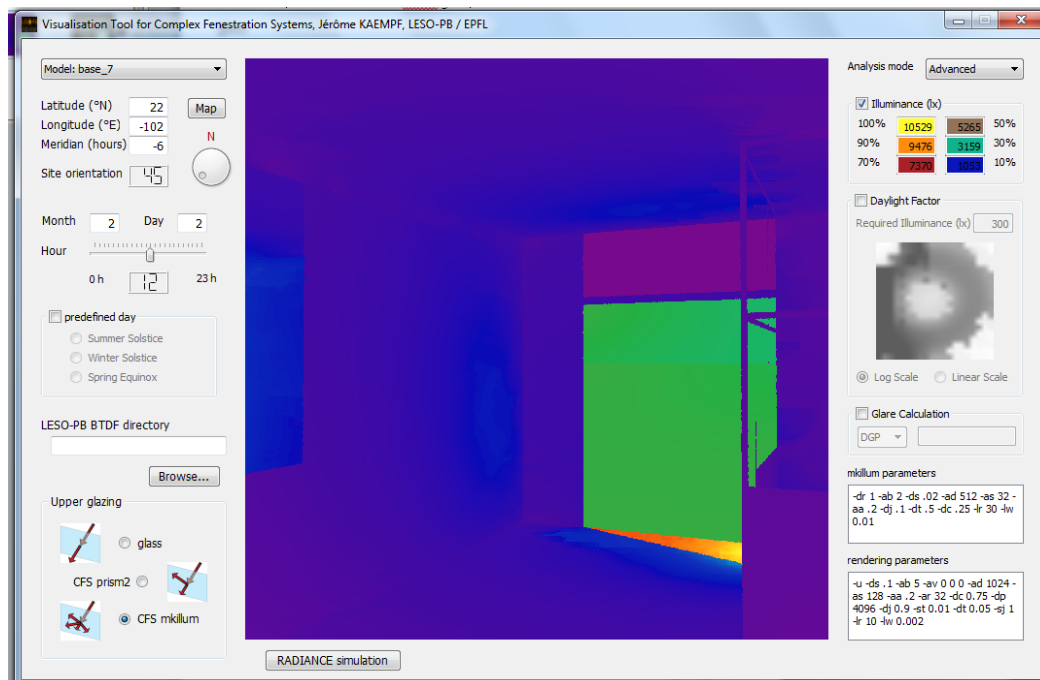


Figure 7.3 : Simulation numérique d'un local de bureau, situé dans la ville de Zacatecas au Mexique (bibliothèque universitaire de l'Institut de Technologie de Monterrey), muni de vitrages teintés (transmission lumineuse de 31%).

La Figure 7.4 illustre le résultat obtenu en remplaçant le vitrage teinté par un verre transparent (transmission lumineuse de 80%) et en plaçant déviateur de lumière naturelle du type *Laser cut panel* dans la partie supérieure de l'ouverture vitrée.

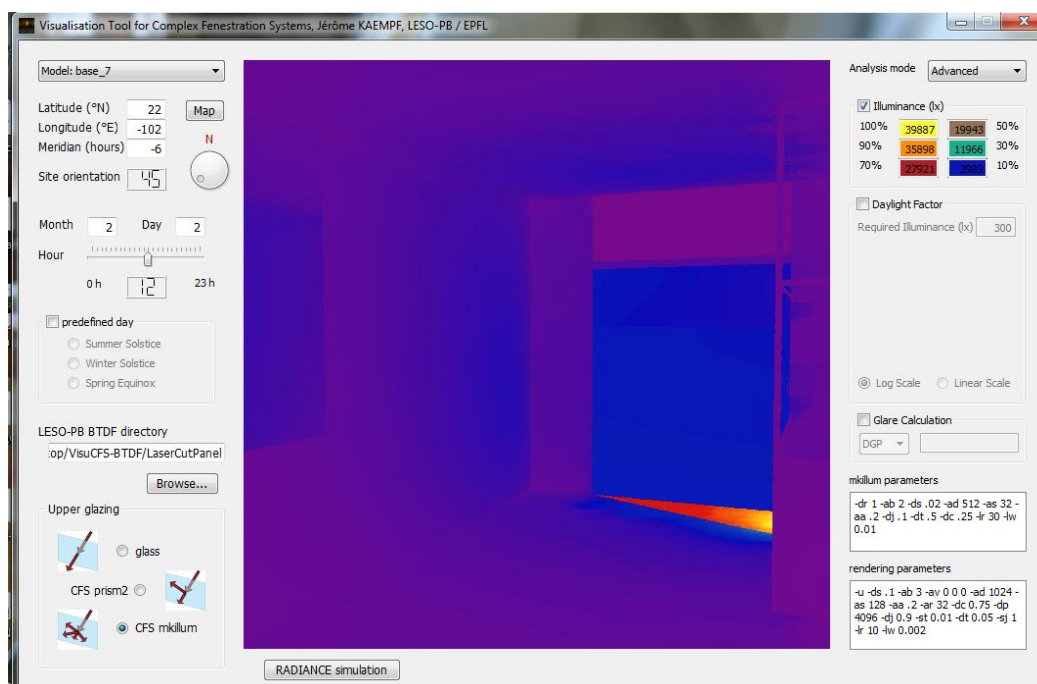


Figure 7.4 : Simulation numérique d'un local de bureau, situé dans la ville de Zacatecas au Mexique (bibliothèque universitaire de l'Institut de Technologie de Monterrey), muni de verres transparents (transmission lumineuse de 80%) et d'un déviateur de lumière naturelle de type *Laser cut panel*.

L'éclairage minimal sur le plan de travail dû à la lumière naturelle, en absence d'éclairage artificiel, est de 3612 lux dans cette configuration; il atteint 3690 lux en cas d'utilisation d'un *3M SOLF prismatic film*. Une amélioration du contraste lumineux est aussi obtenue dans ce cas de figure ; elle est mise en évidence par l'uniformité des teintes de l'image de synthèse donnée à la Figure 7.4 par opposition à celle de la Figure 7.3 (fort contraste de luminances traduits par des teintes chaudes et froides).

Cette première étude réalisée par l'intermédiaire du programme **Geronimo** est en voie d'être complétée par celles d'autres bâtiments situés au Mexique et en Europe.

8. Conclusion

Les systèmes complexes de fenêtres, composés principalement de **dispositifs de protection solaire et de déviateurs de lumière naturelle**, contribuent de manière significative à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments (diminution des charges thermiques et des besoins en éclairage électrique). Des équipements (goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique) ont été récemment mis sur pied afin de caractériser les **propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse (Bidirectional Transmission Density Function)** de ces systèmes.

Un logiciel informatique, permettant de **concevoir et visualiser des systèmes complexes de fenêtres** en cours de fonctionnement (transmission des composantes directe et diffuse de la lumière naturelle), a été mis sur pied en vue de faciliter leur mise en œuvre dans la pratique. Ce dernier fait appel aux **propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse (données BTDF)** de dispositifs de protection solaire (stores à lamelles, etc.) et de

déviateurs de lumière naturelle (3M SOLF™ Film, Laser Cut Panel, SSG Lumitop™, etc.) mesurées par le biais d'un gonio-photomètre. Il est constitué :

- D'un outil informatique simplifié de visualisation de systèmes complexes de fenêtres intégrés en façade;
- D'un algorithme informatique détaillé de dimensionnement de systèmes complexes de fenêtres intégrés en façade.

L'outil informatique simplifié est pourvu d'une interface graphique adaptable aux connaissances et compétences des utilisateurs en matière d'éclairage naturel (architectes, éclairagistes et chercheurs). Il a été mis en œuvre, de façon très concluante, sur un certain nombre de systèmes complexes de fenêtres et doit faire l'objet d'une intégration au sein du logiciel de calcul d'éclairage Relux Vision™ Celle-ci sera effectuée en collaboration avec la société Relux Informatik AG, responsable du développement de ce logiciel de calcul et bénéficiant d'un très large réseau de diffusion sur le plan national et international.

9. Références bibliographiques

- (And01) M. Andersen, C. Roecker and J.-L. Scartezzini, Experimental assessment of bi-directional transmission distribution functions using digital imaging techniques, *Energy & Buildings*, Vol. 33, N°5, p. 417-431, 2001.
- (And02) M. Andersen, *Data Format for BTDF/BRDF Measurements*, IEA Task 21 Technical Report, Lausanne, 2002.
- (And04) M. Andersen, *Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems*, PhD Thesis N°2941, pp. 221, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2004.
- (Bas10) M. Basurto, Optimization of daylight in Educational Buildings in prevailing clear sky Conditions and its consequent Influence on Energy Efficiency, PhD Research Plan, EDCE Doctoral Programme, EPFL, 2010.
- (Bas11) C. Basurto, A. Borisuit, J. Kaempf, M. Münch and J.-L. Scartezzini, Daylight Optimization of Buildings and Application of Advanced Daylighting Systems in Central Mexico, Proc. of International Conference CISBAT 2011, Lausanne, 14.-16. September 2011.
- (3MC11) J. T. Simpson, *3M Center*, St Paul, Minnesota, USA, 2011.
- (CIE70) Commission Internationale de l'Eclairage, *Daylight*, CIE Publ. N°16(E-3.2), Paris, 1970.
- (CIE77) Commission Internationale de l'Eclairage, *Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement*, CIE Publ. N°38(TC-2.3), Paris, 1977.
- (CIE83) Commission Internationale de l'Eclairage, *Discomfort glare in the interior working environment*, CIE Publ. N°55(TC-3.4), Paris, 1983.
- (CIE98) Commission Internationale de l'Eclairage, *Practical methods for the measurements of reflectance and transmittance*, CIE Publ. N°130, Paris, 1998.
- (CTI02) Commission Technologie et Innovation, *Projet 3361.2 Goniophotomètre bidirectionnel*, Rapport final 1998-2001, pp. 8, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2001.
- (CTI04) Commission Technologie et Innovation, *Projet 4881 KTS Gonioréflexomètre bidirectionnel*, Rapport final 2002-2004, pp. 8, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2004.
- (Gra87) E. Grandjean, *Ergonomics in computerized offices*, Taylor & Francis, London, 1987.

- (IEA21) International Energy Agency Task 21, *Daylight in Buildings, A Source Book on Daylighting systems and Components*, LBNL-47493, San Fransisco, USA, 2000.
- (Kae04) J. Kaempf and J.-L. Scartezzini, *Integration of BT(R)DF Data into Radiance Lighting Simulation Programme*, Technical Report, CTI Project 4881.1 "Bidirectional Goniophotometer", LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2004.
- (Kla11) S. Klammt, H.F.O. Müller and A. Neyer, *Redirection of sunlight by micro-structured components*, Proc. of CISBAT 2011 International Conference CleanTech for Sustainable Buildings, Lausanne, 14.-16. September 2011.
- (Lin10) F. Linhart, Energetic, *Visual and Non-Visual Aspects of Office Lighting*, PhD Thesis N° 4587, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2010.
- (Mor98) C. Morel, Y. Golay et D. Lymberis, *Lumière naturelle et Energie : Etudes typologiques*, Rapport final, Projet LUMEN, ITB/EPFL, Lkausanne, 1998.
- (Mur11) J. B. Murdoch, *Illumination Engineering*, Visions Communications, Pennsylvania, USA, 1994.
- (Nok11) Nokia Corporation, *Qt – Cross-platform application and UI framework*, qt.nokia.com, Last visited November 2011.
- (SGF11) H. Müller, *Saint Gobain France*, Courbevoie, France, 2011.
- (SIA90) Société des Ingénieurs et Architectes, *Chaleur er Lumière dans le Bâtiment*, SIA Docu 056, Ed. A. Faist, Zürich, 1990.
- (Suv99) Caisse Nationale d'Assurance, *Le travail à l'écran de visualisation*, Manuel technique, pp. 107, CNA/SUVA, Luzern, 1999.
- (Sca93a) J.-L. Scartezzini, et al., *Eléments d'éclairagisme*, Manuel RAVEL, pp. 95, OFFPT, Bern, 1993.
- (Sca93b) J.-L. Scartezzini et al., *Eclairage des bureaux*, Manuel RAVEL, pp. 103, OFFPT, Bern, 1993.
- (Sca94) J.-L. Scartezzini, R. Compagnon, G. Ward and B. Paule, *Outils informatiques en éclairage naturel*, pp. 143, Université de Genève/EPFL, Genève/Lausanne, 1994.
- (Sca97) J.-L. Scartezzini et al., *Daylighting Design of European Buildings*, Technical Report, pp. 225, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 1997.
- (SLG93) Schweizerische Licht Gesellschaft, *Computer Programme für die Beleuchtungsplanung*, SLG/ASE, Bern, 1993.
- (Sol11) I. Edmonds, *Solartarn Pty Ltd*, Kenmore, Brisbane, Australia, 2011.
- (Tha08) A. Thanachareonkit, Comparing physical and virtual methods for daylight performance modelling including complex fenestration systems, PhD Thesis N°4130, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2008.
- (Tre87) P. Tregenza, Subdivision of the sky hemisphere for luminous measurements Lighting Research and Technology, 19:13-19, London, 1987.
- (War98) G.J. Ward, F.M. Rubinstein, A new technique for computer simulation of illuminated spaces, *J. of Illum. Engineering Soc.*, Vol. 17, N°1, 1998.
- (Wit08) S. Wittkopf, MPVF – Multifunctional Photovoltaic facades with integrated innovative thin-film and selected emerging PV technologies for energy generation and conservation, Research Project, pp. 35, SERIS/NUS, Singapore, 2009.
- (War09) G. Ward, *Radiance 4.0 Improvements*, Radiance Workshop, Harvard University, Graduate School of Design, October 2009.

Annexe A - Publications

- C. Basurto, A. Borisuit, J. Kaempf, M. Münch and J.-L. Scartezzini, Daylight Optimization of Buildings and Application of Advanced Daylighting Systems in Central Mexico, Proc. of International Conference CISBAT 2011, Lausanne, 14-16 September 2011.
- J.H. Kämpf, J.-L. Scartezzini, Ray-Tracing Simulation of Complex Fenestration Systems Based on Digitally Processed BTDF Data, Proc. of International Conference CISBAT 2011, Lausanne 14-16 September 2011

DAYLIGHT OPTIMIZATION OF BUILDINGS AND APPLICATION OF ADVANCED DAYLIGHTING SYSTEMS IN CENTRAL MEXICO

Basurto C., Borisuit A., Kämpf J, Münch M and Scartezzini J-L

Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland

ABSTRACT

The intensive use of daylight in buildings is beneficial at many levels: it provides sufficient levels of illumination to perform working activities throughout the day and it reduces the use of artificial light, which in turn leads to lower electricity consumption [1-3]. The spectral composition of daylight often leads to higher visual comfort in humans, compared to electric lighting. There are also illuminance and spectrally-dependent light effects on the human circadian system, which regulate hormonal rhythms, alertness and (visual) performance across 24 hours [4-6]. The main objective of this work was to assess luminous performance in office buildings and to test optimizations by virtually applying different daylighting strategies by computer simulations.

We first assessed the daylight distribution in two different office rooms, set-up as test modules on the EPFL campus in Lausanne (46° 32'N, 6° 39'E). One of these test modules is equipped with a standard double-glazing; the second one comprises anidolic daylighting systems [7], which convey diffuse daylight and sunlight deeper in the room, and reduce glare risk. In both rooms, we also assessed vertical spectral irradiance in the visible range, which gave us additional information with respect to photo biological properties of the available daylight. We then measured the real daylighting situation in an office room located in the city of Zacatecas, Mexico (22°47'N 102°34'W), which is equipped with a standard double-glazing window. In a next step we tested, whether the daylight distribution for this room could be improved by virtually applying different complex fenestration systems (such as prismatic panels and laser cut panels) by using computer simulations. The results of these simulations showed higher indoor luminous performance with the two advanced daylighting systems. This new method may contribute to an improved and tailored design of daylight availability in real buildings at different geographical locations.

INTRODUCTION

Daylight in buildings often leads to benefits for energy efficiency and to positive effects on visual and non-visual functions in humans. Because of these benefits the efficient use of daylight has become more relevant recently [2]. Many strategies have been developed to effectively use this natural light source, including the development of advanced daylighting systems. Their common principle is the efficient collection of the exterior daylight (direct and indirect components) its redirection into the interior space and thereby improvement of light distribution in the room [7]. One of the main characteristics of daylight is its temporal variation caused by meteorological and seasonal parameters [8] and therefore, different types of advanced daylight systems were designed to fit the geographical location of a building. For example, at locations with predominantly overcast weather conditions, the main task of the advanced daylighting system is to collect and redistribute the diffuse daylight component inside the room. Different advanced daylighting systems, based on non-imaging optics (anidolic systems), were developed for this purpose. The physical principle of these non-imaging optics systems is an angular selection of the admitted light rays with a minimal number of inter-reflections so that the system efficiently collects diffuse daylight from the sky vault and re-distributes it in the interior space [7]. In the case of locations with predominantly clear sky conditions, the objective is not only to collect and re-distribute the daylight indoors but also to protect from the incidence of direct sunrays and to avoid overheating and the risk of discomfort glare. Therefore, for locations at low geographical latitudes different solutions are required and only few advanced systems have been implemented so far [9].

One of the objectives of this work was to analyse the performance of an already implemented advanced daylighting system in a real size test room, and to compare the distribution of daylight to a second test room with standard double glazing windows in Switzerland. A second aim was to evaluate the luminous performance at low latitude locations with prevailing clear sky conditions (Zacatecas, Mexico 22°47'N 102°34'W). We finally simulated the efficiency of different complex fenestration systems (CFS) by using ray tracing simulation methods (Radiance-based, [10]). For the CFS, we used a laser-cut panel and a prismatic panel, which are recommended for prevailing clear sky conditions [2].

METHODOLOGY

1. Assessment of daylight availability in two test modules (with and without advanced daylighting systems)

The two test modules are located on the EPFL campus in Lausanne, Switzerland (46°32'N, 6°39'E Altitude: 410 m), with an equal size of 3.05 x 6.55 x 3.05 m and south orientated windows. One of these two modules is equipped with a standard double glazing window and serves as reference room, while the second module contains two different anidolic daylighting systems (ADS): an anidolic ceiling (AC) and an integrated anidolic system (IAS) [11]. Both modules have identical photometrical and geometrical features (Figures 1 and 2). For this work, we have chosen to compare the IAS to the standard double glazing window, because of its lower cost and presumably easier adaptation for potential building retrofits in México.



Fig.1 Outside view of the two test modules on the EPFL campus. The test module on the left side contains integrated anidolic systems (IAS) and the test module on the right side is equipped with a standard glazing window.



Fig.2 Interior view of the standard double glazing module at the EPFL campus (Switzerland).

In order to better understand the advantages of the IAS vs. the glazing system in the reference room, we conducted on-site monitoring: We first assessed the daylight distribution in both test modules by calculating their daylight factors (DF). The DF is defined as the ratio of indoor illuminance on a horizontal surface (E_i) and the simultaneously available outdoor illuminance (E_o) by using the formula: $DF = (E_i/E_o) \times 100$ (%). [11, 12]. To account for the non-visual aspects of daylight, we also assessed the vertical $C(\lambda)$ -weighted spectral irradiance [13] in the blue range of the visible light spectrum, using a portable digital spectroradiometer (Specbos 1201, JETI Technische Instrumente GmbH, Jena, Germany). The spectroradiometer was placed in the centre of the room, by directing the device on a vertical plane to the wall at 1.2 m height (i.e. at the approximate eye level of a sitting person). Measurements were taken every 15 minutes, alternating for both modules from 9am until 6pm, under intermediate sky conditions.

2. Luminous performance assessment in an office without advanced daylighting systems at a different geographical latitude

We selected an existing building in the city of Zacatecas, Mexico (22°47'N 102°34'W) and assessed its real luminous performance by performing illuminance and luminance measurements. We used two different illuminance meters (Chauvin Arnoux C.A. 811 Lightmeter) for interior and exterior measurements, which had prior been referenced to a calibrated device (Spectroradiometer, Specbos 1201, JETI Technische Instrumente GmbH Jena, Germany). For luminance measurements we used a special customized device made of a tube with an aperture of 3° (diameter of opening = 2 cm) covered inside with a black foil and placed on the illuminance sensor; the calibration of this device was made by using a luminance meter as reference (LS-110 Minolta).

The selected room was the Library's office of a private educational University (Tecnologico de Monterrey campus Zacatecas, México). The room showed poor availability of daylight due to the very low glazing transmittance of the tinted glass (31%) and a South-West orientation of the building. Two pictures taken at times of day show the interior view of the Library's office in the morning (Figure 3) and in the evening hours (with direct sun shining on the working area; Figure 4).

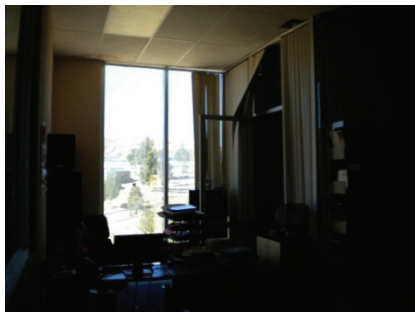


Fig. 3. View of the Library's office under overcast sky conditions in the morning

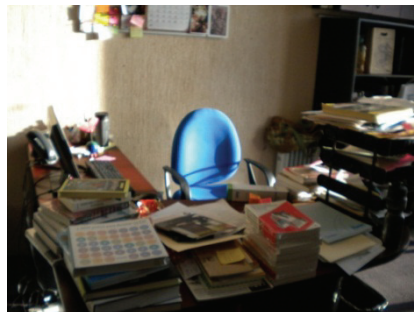


Fig. 4. View of the Library's office under clear sky conditions in the evening

In order to perform a detailed analysis of the real luminous performance in the office showed on Figure 3 and 4, we carried out measurements under overcast and clear sky conditions, using the DF as a metric to assess the indoor daylight distribution.

3. Luminous performance optimization for an office with poor daylight availability

The optimization of daylight availability in buildings requires a strategy which includes early decisions in the architectural design, such as interior material properties, window configuration and glazing transmittance as well as the use of CFS. Different combinations of these previously mentioned parameters were virtually assessed and tested by using computer simulations, based on ray tracing software (Radiance [10]). In order to simulate the implementation of two different CFS [14], we used existing BTDF data (Bi-directional Transmittance Distribution Function [15]). Simulations with two different CFS, laser-cut panel and prismatic panels (3M Optical Lighting Film), were performed.

RESULTS

1. Assessment of daylight availability in two test modules

Overall, there was a significant difference of the DF's between both test modules ($p < 0.05$). Moreover, the DF in the middle of the room of the reference test module was only 2.5%, but 4% for the module equipped with the IAS, which suggests a different light distribution deeper in the room (Figure 5).

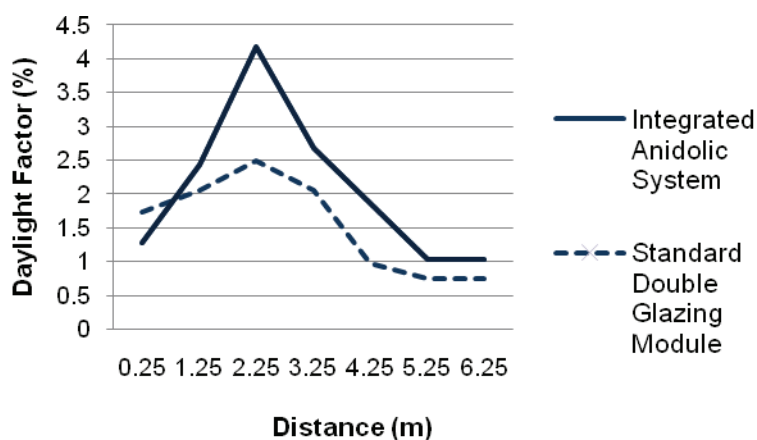


Fig. 5 Daylight Factor (%) in the test modules with the integrated anidolic system and the standard room.

The vertically $C(\lambda)$ -weighted spectral irradiance of the visible light spectrum was significantly higher in the module with IAS compared to the reference test room with standard double glazed window (1.295 W/m^2 vs. 0.5089 W/m^2 ; $p < 0.05$, Figure 6).

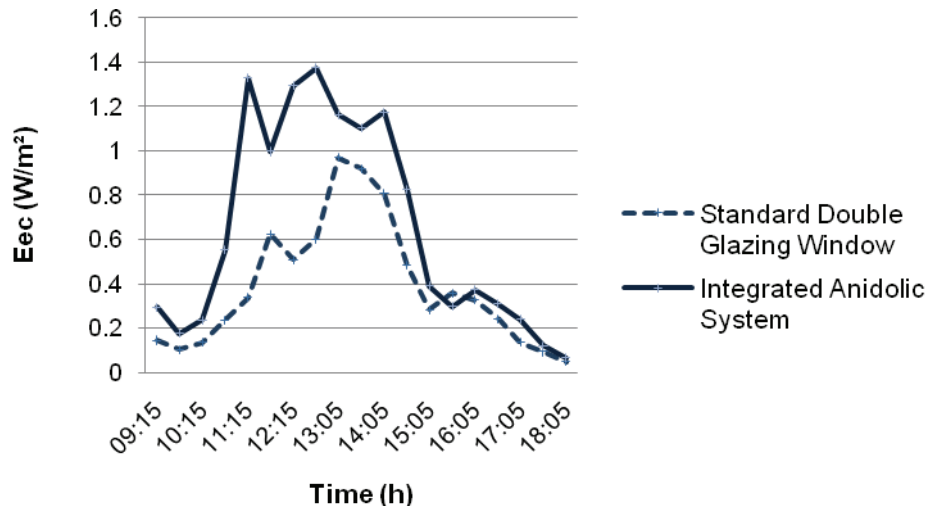


Fig.6. Spectral irradiance (W/m^2), measured in a vertical direction from the centre of the two test modules, across different times of day.

2. Luminous performance assessment in a real office without advanced daylighting systems

The calculation of the DF in the Library Office in México showed a rapid decrease deeper in the room. Starting with a DF of 5.9% at a distance of 0.4 m from the window, the DF gradually decreased and was only 0.9% in the back of the room (Figure 7). The luminance measurements further showed low levels and inadequate luminance-ratios between paper tasks, screen and walls, as well as a high contrast between the window and the surrounding areas (data not shown). These on-site measurements were used to compare the optimization strategies which we carried out with computer simulations.

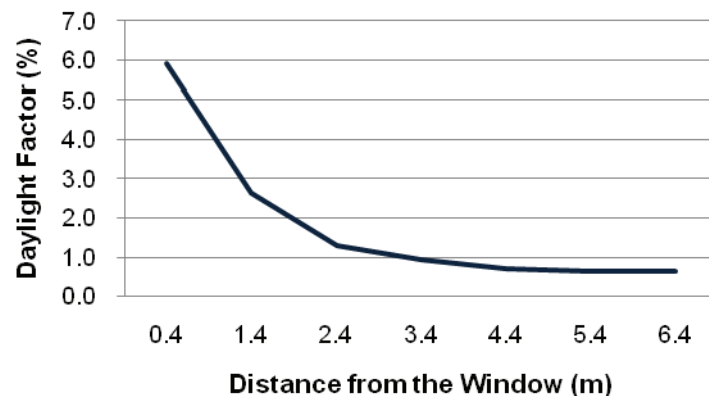


Fig.7. Daylight Factor measurements in the Library Office, México (measurements were taken every m)

3. Daylight simulation of a real office with and without complex fenestration systems

Figure 8 illustrates the simulated Library's office room situation in México, where we measured in average a minimum illuminance of 926 lx. After increasing the transmittance of the glazing up to 80% (Figure 9), the same room showed a minimum illuminance of 3451 lx. When we virtually applied a prismatic panel, a minimum illuminance of 3531 lx (Figure 10) was obtained, and with a laser-cut panel we reached a minimum illuminance of 3540 lx (Figure 11); all simulations were carried-out using BTDF data.

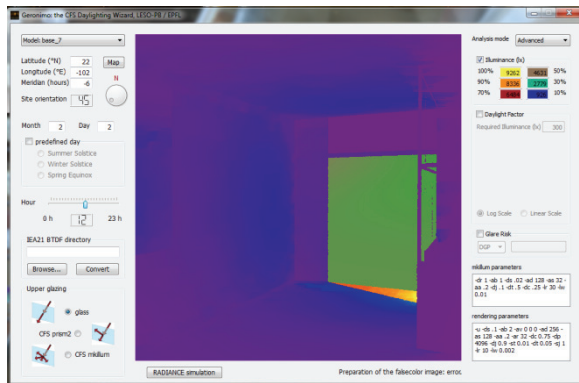


Fig. 8 Print screen of the simulated real illuminance situation in the office in Mexico, with South-West orientation of the building and a glazing transmittance of 31%.

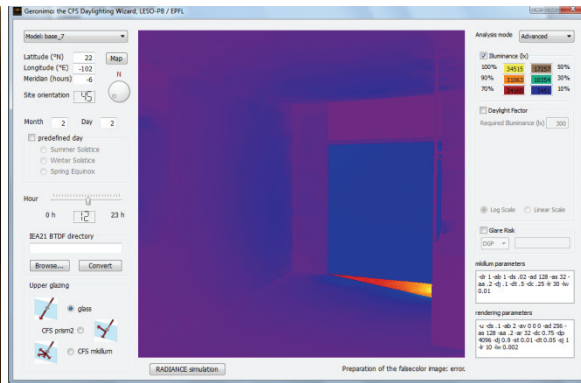


Fig. 9. Simulated higher illuminance in the same office room in Mexico when the glazing transmittance was increased to 80% (South-West orientation).

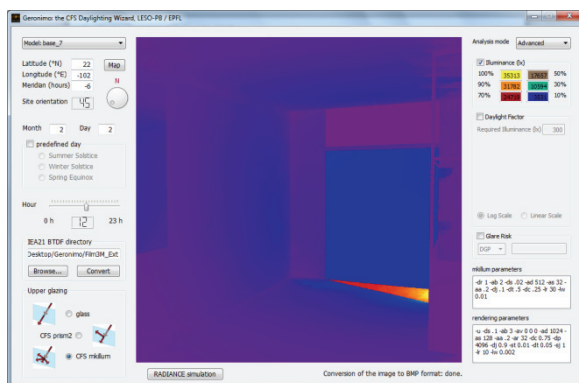


Fig.10.Simulated optimized illuminance situation by using a prismatic panel as a complex fenestration system (South-West orientation; Film 3M interior)

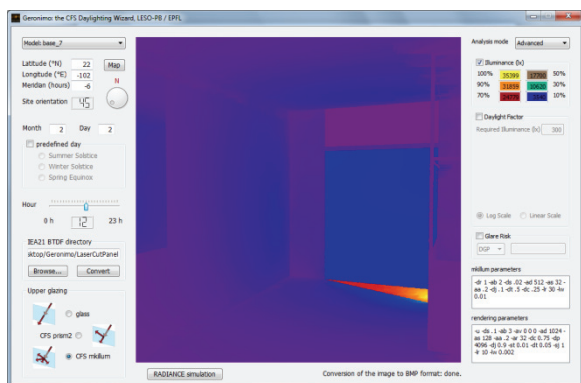


Fig.11. Optimized daylight situation by using a laser-cut panel as a complex fenestration system (South-West orientation).

DISCUSSION

We assessed the real daylighting situation by monitoring the daylight factor in two test modules in Switzerland and in an office room in Mexico. For the two test modules in Switzerland, we found a slightly better daylight distribution in the module equipped with the IAS, when compared to the module with the standard double-glazing window. The $C(\lambda)$ -weighted spectral irradiance in the blue range of the visible spectrum was significantly higher in the module with the IAS, suggesting that the interior daylighting environment may be beneficial not only in terms of energy savings but also for visual and non-visual human functions. We also showed by computer simulations that the luminous daylight performance could be improved in real office rooms at low geographical latitudes (library office in México) by using different complex fenestration systems. Further studies are needed to investigate different daylighting metrics in order to also include time of day and year, weather conditions and local climates [16]. Future work should also address problems related to discomfort glare and thermal comfort, in order to avoid potential overheating due to excessive solar gains - both are non-negligible risks for buildings located at low geographical latitudes. To summarize, our results showed possible improvements for indoor daylight performance by virtual application of advanced daylighting systems, using computer simulations. This might be used to improve daylight performance in the design of new buildings or the retrofit of existing buildings at low geographical latitudes.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by a grant of the Mexican National Council of Science and Technology (CONACYT), and by the Research Contract no. 154393 of the Swiss Federal Office of Energy (SFOE). M. Münch and A. Borisuit are supported by the VELUX Foundation (Switzerland).

REFERENCES

1. McHugh, J., P.J. Burns, and D.C. Hittle, *The Energy Impact of Daylighting*. Ashrae Journal, 1998. 40(5): p. 31-35.
2. Ruck, N., et al., *Daylight in Buildings*. 2000: International Energy Agency (IEA).
3. Bodart, M. and A.D. Herde, *Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting*. Energy and Buildings, Elsevier, 2001. 34: p. 421-429.
4. Brainard, G.C. and J.P. Hanifin, *The effects of light on Human Health and behavior relevance to architectural lighting*, in *Simposium: Light and Health: non-visual effects*. CIE. 2004: Vienna, Au. p. 2-16.
5. Cajochen, C., *Alerting effects of light*. Sleep Medicine Reviews, Elsevier, 2007. 11: p. 453-464.
6. Bommel, W.J.M.v., *Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work*. Elsevier, 2006. 37(4): p. 461-466.
7. Scartezzini, J.-L. and G. Courret, *Anidolic Daylight Systems*. Solar Energy, 2002. 73(2): p. 123-135.
8. Becchi, E., et al., *Daylighting in Architecture, A european reference book*, ed. N. Baker, A. Fanchiotti, and K. Steemers. 1993: James & James for the Comission of the European Communities, Directorate-General XII for Science, Research and Development.
9. Edmonds, I.R. and P.J. Greenup, *Daylighting in the tropics*. Solar Energy, 2002. 73(2): p. 111-121.
10. Larson, G.W. and R. Shakespeare, *Rendering with Radiance, The Art and Science of Lighting Visualization*. 1997: Morgan Kaufmann.
11. Thanachareonkit, A., *Comparing physical and virtual methods for daylight performance modelling including complex fenestration systems*, in *LESO-PB*. 2008, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne: Lausanne.
12. IESNA, *IES Lighting Handbook, Reference Volume*. 1984: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA).
13. Gall, D. and K. Bieske, *Definition and measurement of circadian radiometric quantities*, in *Light and health- non-visual effects: proceedings of the CIE*. 2004: Vienna, Austria.
14. Kaempf, J. and J.-L. Scartezzini, *Integration of BT(R)DF data into Radiance Lighting Simulation Programme, Technical Report 2004*, EPFL: Lausanne.
15. Andersen, M., *Light distribution through advanced fenestration systems*. Building Research & Information, 2010. 30(4): p. 264-281.
16. Reinhart, C.F. and J. Mardaljevic, *Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design*. Institute for Research in Construction NRC-CNRC, 2006. 3(1): p. 1-25.

RAY-TRACING SIMULATION OF COMPLEX FENESTRATION SYSTEMS BASED ON DIGITALLY PROCESSED BTDF DATA

J. H. Kämpf¹; J.-L. Scartezzini¹

1: Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, Switzerland

ABSTRACT

The implementation of Complex Fenestration Systems (CFS) in the day-to-day life by practitioners, such as lighting designers, architects and façade makers is not an easy task. However, computer design tools can reinforce their usage through the determination of the luminous properties of a building interior prior to its construction or refurbishment. This paper presents a methodology based upon computer daylighting simulations carried out with RADIANCE in which the *mkillum* procedure was improved in order to render the light distribution due to diffuse daylight and sunlight on the inner surface of a fenestration system by the way of BTDF data. For the sake of standardization, the BTDF data accepted as input may be formatted according to the course of IEA Task 31 “Daylighting in Buildings” (e.g. following Tregenza format).

Keywords: Complex Fenestration Systems (CFS), Bi-directional Transmission Distribution Function (BTDF), RADIANCE software, backward ray-tracing, video-goniophotometer

INTRODUCTION

Complex Fenestration Systems (CFS) available today on the market are mainly constituted of solar shadings and light redirecting devices. They can contribute to substantial reduction of the heating and electricity loads in non-residential buildings through an optimal use of passive solar gains and daylighting [1]. Their implementation in the day-to-day life by practitioners, such as lighting designers, architects and façade makers is not an easy task, as long as the latter will be unable to: i) integrate and combine CFSs with efficient luminaires for the sake of energy savings (optimal use of daylighting and electric lighting) and ii) improve simultaneously the users’ visual comfort and performance in computerized office spaces (avoiding glare risks and excessive task luminance). Computer simulation tools such as RADIANCE [2] can help to achieve these objectives through the determination of the luminous properties of a building interior prior to its construction or refurbishment.

Nowadays, new photometric equipments, such as bidirectional video-goniophotometer [3], can be used to assess the luminous transmission properties of CFSs, the so-called Bidirectional Transmission Distribution Function (BTDF). Measurements can be realized according to the sensitivity of the human eye $V(\lambda)$ [4] and even in the near infrared [5]. A collection of measured BTDFs corresponding to a bunch of CFSs is available today at EPFL [6], but currently not sufficiently used in practice. The collection is stored in an international standard for BTDF data defined in the course of IEA Task 31 “Daylighting in Buildings” [7].

The first approach of CFS simulations with RADIANCE was carried out using an approximation of the measured BTDF data with the *prism2* primitive [8] and successfully applied for sharp redirecting CFS (Laser Cut Panel, Holographic Film and 3M Film) [9]. Recently, RADIANCE has been improved [10] to be able to render the light distribution due

to diffuse daylight and sunlight on the inner surface of a fenestration system by the way of BTDF data. The latter is stored in an XML file according to a data format defined at Lawrence Berkeley National Laboratory (e.g. suggested by Klems) [11].

The computer methodology presented in this paper aims at being a link between the international standard for BTDF data storage [7] and the improved RADIANCE version [10]. The paper describes the modifications brought in this prospect to the RADIANCE ray-tracing programme along with simulation results of a non-sharp redirecting CFS (Veglas Lumitop) whose BTDF data were monitored at EPFL.

METHODOLOGY

The RADIANCE *mkillum* routine in the official release 4.0 is able to read and use an XML file that contains BTDF data [10]. However, this XML file format has nothing to do with a prior defined BTDF data standard of goniophotometers such as the one defined in the course of IEA Task 31 “Daylighting in Buildings” [7]. In the latter, a text file is given for each pair of incoming angles (azimuth and elevation) according to the Tregenza subdivision of the hemisphere in 145 zones. In the case of symmetry of the sample (vertical and/or horizontal), the number of measured pairs of incoming angles may be reduced down to 42. The C++ programme *btdf2prism2* [8], that has already been developed by the authors to approximate a BTDF with two main redirecting components using the RADIANCE *prism2* routine, was used as a basis for reading the IEA 21 BTDF file format. The programme was renamed to *btdf2radiance* and modified to generate the BTDF data as a matrix of size (input directions) times (output directions) in the XML file format. As mentioned earlier, with EPFL’s goniophotometer the input directions are the centroid of the 145 Tregenza zones, and the output directions are each 5° in azimuth and 5° in elevation leading to 1297 zones. This last number being equal to (90°/5°) times (360°/5°) plus the zenithal zone, the corresponding BTDF matrix is rectangular. Two steps were required to achieve the link between the measurements of EPFL’s goniophotometer in IEA 21 format and the BTDF data usable by the RADIANCE routine *mkillum*:

- 1) Modify the RADIANCE *mkillum* routine to take into account the basis in which the 145 input Tregenza directions and the 1297 (5° by 5°) output directions are defined,
- 2) Write the *btdf2radiance* routine to convert the IEA 21 BTDF format in the XML file format usable by *mkillum*.

The following two paragraphs present the last points in details.

Modifications in the RADIANCE *mkillum* routine

The source code of RADIANCE is modular; all what concerns the basis of BTDF data is located in the file /common/bsdf.c. Three existing basis can be found in the latter: LBNL/Klems Full, LBNL/Klems Half and LBNL/Klems Quarter. Those are given by couples of inclination and number of subdivisions of the band that is in between the current and next inclinations. Symbolically the couples can be represented by:

$$\theta_1, 1, \theta_2, s_{2 \rightarrow 3}, \theta_3, s_{3 \rightarrow 4}, \dots, \theta_n, 0, \quad (1)$$

in which θ is the inclination angle (accounted for from the normal, see Figure 1) and $s_{a \rightarrow (a+1)}$ is the number of subdivisions between θ_a and θ_{a+1} for $a = 1..(n-1)$. The first number of subdivisions is always 1 in common hemisphere subdivisions, e.g. the zenithal zone is unique. The last number of subdivisions on the other hand is always 0 to end the series. The Tregenza

basis, named in the modifications brought to *mkillum* “EPFL/Tregenza Full”, is thus given in this notation by:

$$-6,1, 6,6, 18,12, 30,18, 42,24, 54,24, 66,30, 78,30, 90,0, \quad (2)$$

and the 5° by 5° basis, named in the modifications brought to *mkillum* “EPFL/5deg Full”, is given by:

$$-2.5,1, 2.5,72, 7.5,72, 12.5,72, 17.5,72, ..., 87.5,72, 90,0, \quad (3)$$

in which we notice a fixed number of subdivisions of the bands and a fixed step increment of 5° in θ . The first inclination angle of each series is negative and equals in absolute value to the second inclination angle to indicate the extent of the unique zenithal zone. With the basis defined, each zone of the hemisphere is then identified by a unique number which starts by the zenithal zone and follows with the successive bands. The numbering goes according to the right-hand rule associated with the reference frame shown in Figure 1.

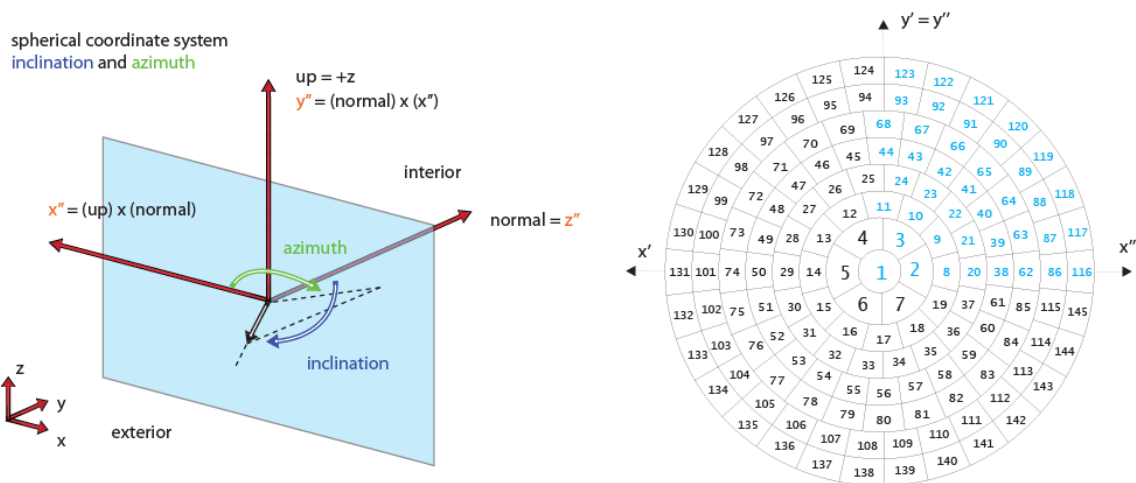


Figure 1: The coordinate system associated with the glazing used by default by *mkillum* ($up = +Z$) on the left-hand side, the numbering of the zones in the “EPFL/Tregenza Full” basis on the right-hand side (in blue the minimum of 42 zones for a complete set considering symmetries).

When defining a surface in RADIANCE to be represented by a BTDF, the user should define the vertex order to arrange for the normal of the surface to point inside the room. The *mkillum* routine then associates another reference frame to the surface: (x'', y'', z''). The latter is defined by taking as default an “up” direction equals to the z-axis in the room’s Cartesian coordinate system (x, y, z): the vector product between “up” and the surface normal defines the x'' -axis, the vector product between the surface’s normal and x'' defines y'' and finally the normal itself defines the z'' -axis.

Remember that a fully transparent glazing represented by its BTDF matrix using the “EPFL/Tregenza Full” basis in input and output directions is diagonal.

Conversion of the IEA 21 BTDF file format to the *mkillum* XML file format

The programme *btdf2radiance* makes the link between the IEA 21 BTDF file format and the XML file format requested by *mkillum* after the previous modifications. The IEA 21 BTDF file format defines a separate file for each pair of incoming angles, each of which contains the BTDF values associated with a pairs of outgoing angles. Those angles (incoming and

outgoing) are measured in a reference frame attached to the considered CFS sample (x', y', z'), that is different from the one used by *mkillum* (see Figure 2).

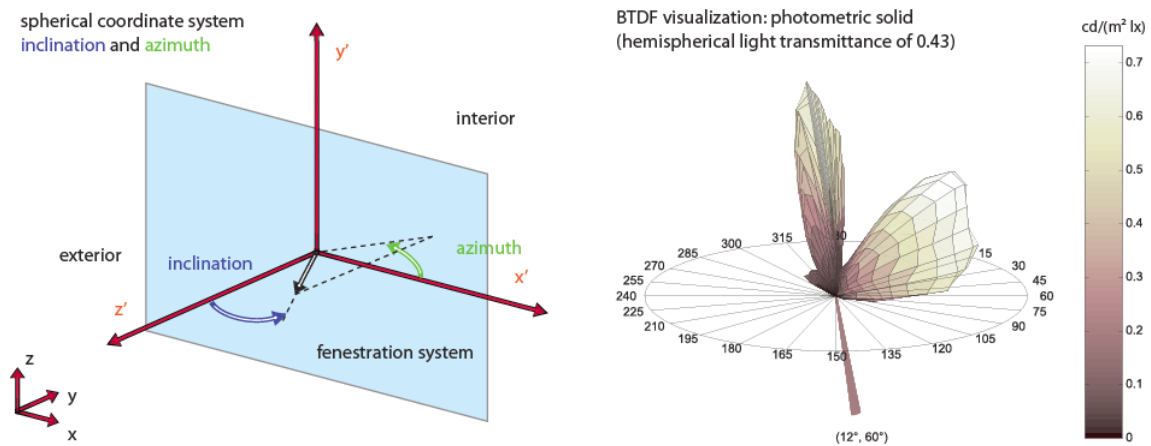


Figure 2: The coordinate system associated with the measured BTDF in the international standard IEA 21 and a visualization of the measured BTDF of Veglas Lumitop for impinging angles of 12° in inclination and 60° in azimuth (z' -axis goes downwards).

The transformation that goes from IEA 21 coordinate system (x', y', z') shown in Figure 2 to the *mkillum* coordinate system (x'', y'', z'') shown in Figure 1 can be written, in spherical coordinates, as:

$$\theta \mapsto \pi - \theta, \varphi \mapsto \pi - \varphi, \quad (4)$$

in which $\theta \in 0, \pi$ is the inclination angle and $\varphi \in 0, 2\pi$ the azimuth angle in IEA 21 reference frame. The algorithm which produces an XML file usable by *mkillum* from IEA 21 BTDF files contains six steps: 1) transformation of the incoming angles in the *mkillum* reference frame, 2) identification of the incoming zone number (in the “EPFL/Tregenza Full” basis from 1 to 145), 3) transformation of all outgoing angles to the *mkillum* reference frame, 4) identification of the outgoing zone number (in the “EPFL/5deg Full” basis from 1 to 1297), 5) attribution of the BTDF values in the asymmetrical matrix (of size 145×1297) and 6) in case of symmetries defined, copy the values accordingly in the matrix. The final asymmetrical matrix is written in the form given by Table 1.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<WindowElement>
  <Information Material="Lumitop" Source="btdf2radiance"/>
  <Optical>
    <Layer>
      <WavelengthData>
        <Wavelength>Visible</Wavelength>
        <WavelengthDataBlock>
          <WavelengthDataDirection>Transmission Front</WavelengthDataDirection>
          <ColumnAngleBasis>EPFL/Tregenza Full</ColumnAngleBasis>
          <RowAngleBasis>EPFL/5deg Full</RowAngleBasis>
          <ScatteringData>
            ... the asymmetrical BTDF data in 1297 rows of 145 columns ...
          </ScatteringData>
        </WavelengthDataBlock>
      </WavelengthData>
    </Layer>
  </Optical>
```

</WindowElement>

Table 1: The structure of the XML file for the simulation of BTDF data with *mkillum*.

As illustration of the matrix structure, the normal-hemispherical transmission of a monitored CFS sample can be computed using the first column of the matrix which corresponds to the incoming zone 1 (normal to the sample). Furthermore, the BTDF visualization in Figure 2 of Veglas Lumitop for incoming angles (12°,60°) corresponds to the incoming zone 4, in other words the 4th column of the matrix.

Usage of the resulting XML file with *mkillum*

The routine *mkillum* is used exactly in the same way as for any kind of glazing, except that one need to mention the name of the XML file to be used. Table 2 shows a RADIANCE file describing a surface that should behave in the same way as the XML file specified. For more details about RADIANCE simulations please refer to [2].

```
#@mkillum i=void c=d d=btdf2mkillum145x1297.xml s=40000 l+ u=+Z

void polygon upper_glazing
0
0
12
0.1 0 2.7
3.35 0 2.7
3.35 0 2.1
0.1 0 2.1
```

Table 2: The radiance description file (.rad) of a glazing with mention of the XML data file.

SIMULATION RESULTS

An office room in the LESO Solar Experimental Building located on the EPFL campus in Switzerland was chosen as virtual model for producing renderings (see Figure 3). The glazed facade faces south, with a standard double glazing in its lower part and a hypothetical installation of a Veglas Lumitop in its upper part. The device redirects the sun rays towards the ceiling in winter, spring and autumn; it blocks the sun rays in summer.

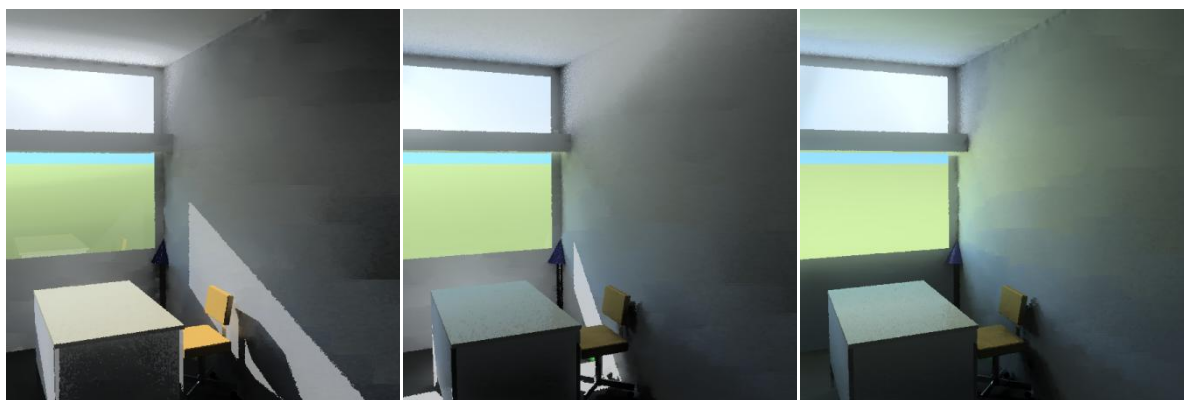


Figure 3: RADIANCE renderings of a virtual model of a simple room in LESO-PB office room (Switzerland), from left to right: winter solstice, spring/autumn equinox and summer solstice at noon (local winter time).

These renderings give convincing results, which is not the case for the ones that can be realized with the *prism2* primitive in RADIANCE [8]. Indeed, the Lumitop has a diffuse directional redirection property (see Figure 2 for an illustration) that cannot be represented by two sharp directions.

CONCLUSION

The approximation of monitored BTDF data using the RADIANCE *prism2* primitive developed previously by the authors comes to a limit when considering CFS having a significant diffuse component. To overcome this and bring compatibility between the international standard IEA 21 for BTDF data storage and the recent improvement of the RADIANCE *mkillum* routine, a new C++ programme *btdf2radiance* was developed. The renderings are convincing so far; however a further verification procedure is foreseen for the next months.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) under the grant # 154 393.

REFERENCES

1. J.-L. Scartezzini et al., Daylighting design of European buildings, Technical Report, pp. 225, LESO-PB/EPFL, Lausanne, 1997.
2. G. W. Larson and R. Shakespeare. Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization. Morgan-Kaufmann, San Francisco, 1998.
3. M. Andersen. Light distribution through advanced fenestration systems, Building Research and Information, Volume 30, Issue 4, July 2002, Pages 264-281.
4. M. Andersen, L. Michel, C. Roecker and J.-L. Scartezzini. Experimental assessment of bi-directional transmission distribution functions using digital imaging techniques, Energy & Buildings, Vol. 33, N°5, p. 417-431, 2001.
5. M. Andersen, E. Stokes, N. Gayeski, C. Browne. Using digital imaging to assess spectral solar-optical properties of complex fenestration materials: A new approach in video-goniophotometry, Solar Energy 84 (4), pp. 549-562, 2010.
6. M. Andersen. Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems: List of BT(R)DF measurements. Internal Report, LESO-PB, EPFL, 2004.
7. International Energy Agency Task 21, Source Book on Daylighting Systems and Components, Chap. 8.3: Optical Characteristics of Daylighting Materials, pp. 8.16 - 8.22, Paris, July 2000.
8. J. Kaempf, J.-L. Scartezzini. Integration of BT(R)DF Data into Radiance Lighting Simulation Programme, Technical Report, CTI Project 4881.1 "Bidirectional Goniophotometer", LESO-PB/EPFL, Lausanne, 2004.
9. A. Thanachareonkit, J.-L. Scartezzini. Modelling Complex Fenestration Systems using physical and virtual models, Solar Energy 84 (4), pp. 563-586, 2010.
10. G. Ward, Radiance 4.0 Improvements, Radiance Workshop, Harvard University, Graduate School of Design, October 2009.
11. M. Konstantoglou. Radiance: Visualizing Daylight Impacts, Complex Fenestration Systems Workshop, LBNL, June 1-3, 2009.