

Analyse du bilan de l'environnement lumineux intérieur

Michel Perraudau, Samuel Carré

CSTB – Département Acoustique et Éclairage
Pôle Éclairage Électricité Électromagnétisme
11 rue Henri Picherit - B.P. 82341 - 44323 NANTES CEDEX 3
michel.perraudau@cstb.fr, samuel.carre@cstb.fr

RÉSUMÉ. Dans l'optique de la double optimisation thermique/éclairage et consommation/confort, il a été développé une méthode de calcul destinée à évaluer, sur une période plus ou moins longue, l'environnement lumineux intérieur en lumière du jour ainsi que les besoins en lumière artificielle de complément. Intégrée au logiciel de photo-simulation PHANIE elle peut-être appliquée aux configurations géométriques les plus complexes. Permettant de prendre en compte la mise en place des protections solaires ainsi que les possibilités offertes par l'installation d'éclairage électrique (fractionnement et/ou gradation), la méthode permet alors de contrôler au mieux les différents aspects du confort visuel et d'en évaluer les conséquences sur la durée d'utilisation et la consommation électrique de l'installation d'éclairage. Si cette méthode fournit des résultats que l'on souhaite aussi proches que possible de la situation réelle, elle doit d'abord être considérée comme une méthode de comparaison entre plusieurs configurations d'éclairage et de gestion de celui-ci.

MOTS-CLÉS : éclairage intérieur, confort visuel, méthode de calcul

ABSTRACT. For the double optimization of the thermal/lighting and consumption/comfort, a calculation method has been developed to evaluate, for a more or less long period, the luminous environment in daylight as well as the needs in artificial light of complement. This method, which is integrated into the photo-simulation software PHANIE, can be applied to the most complex geometrical configurations. It allows to take into account the implementation of the solar protections as well as the possibilities of the installation of electric lighting (division and/or gradation), to check in best the various aspects of the visual comfort and to estimate the consequences on the duration of use and the electric consumption of artificial lighting. If this method supplies results as close as possible to the real situation, it must be considered as a comparative method for some configurations of lighting and their management.

KEYWORDS: interior lighting, visual comfort, calculation method

1. INTRODUCTION

Le facteur de lumière du jour (rapport entre l'éclairement intérieur et l'éclairement extérieur) constitue depuis longtemps le critère d'évaluation de l'éclairage naturel. Le fait de se limiter aux conditions de ciel couvert, reposait entre autre sur l'hypothèse que les apports en lumière du jour étaient forcément suffisants dans des conditions de ciel clair ou de soleil visible de façon plus générale. L'utilisation de protections solaires fixes ou mobiles oblige à s'interroger sur les conditions d'éclairage naturel dans ces situations. La finalité d'une telle prise en compte est double : évaluer les apports en lumière du jour (tant du point de vue quantitatif que qualitatif) tout au long de l'année et estimer les durées d'utilisation de l'éclairage artificiel et les consommations énergétiques associées.

Faire le bilan de l'éclairage naturel sur l'année ne condamne pas l'utilisation du facteur de lumière du jour mais celui-ci doit plus être considéré comme un indicateur que comme le critère de performance. Si le facteur de lumière du jour est faible les niveaux d'éclairement intérieur seront

souvent insuffisants tout au long de l'année mais si sa valeur paraît satisfaisante cela ne garantit pas que l'éclairage naturel soit forcément optimal.

L'évaluation directe de l'éclairage naturel tout au long de l'année, à un pas de temps donné, n'étant pas envisageable, en raison des durées de calcul, il faut faire appel à d'autres méthodes. Le recours à la notion de ciel moyen est l'une de ces solutions : à partir de données météo horaires on définit une distribution de luminance du ciel correspondant à la moyenne de ce qui est observé sur l'année. L'utilisation de ce ciel moyen ne permet que de calculer la valeur moyenne annuelle de l'éclairement intérieur. D'autres méthodes "globales" permettent, à partir de l'analyse du climat lumineux du lieu, d'estimer rapidement la durée d'utilisation de l'éclairage artificiel (Krarti *et al.*, 2005 et Hviid *et al.*, 2008). C'est une méthode de ce type que l'on retrouve également dans la norme NF EN 15193 (AFNOR, 2007).

La recherche de la consommation effective liée à l'éclairage est de plus en plus présente dans les outils. En raison du grand nombre de paramètres influençant l'éclairage naturel intérieur le problème est souvent abordé en mettant en œuvre des méthodes simplifiées mais qui s'appuient néanmoins sur des données météorologiques horaires. C'est le cas de la méthode des règles Th-CE de la réglementation thermique (CSTB, 2005).

Dans le cadre de l'outil de simulation d'éclairage développé par le CSTB, une méthode reposant sur le découpage du ciel en un très grand nombre de zones a été mise au point (Perraudau *et al.*, 2007). L'objectif est de pouvoir estimer, à chaque pas de temps, différents aspects de l'environnement lumineux intérieur dans un temps "raisonnable". Ceci concerne aussi bien les éclairements (et les consommations de l'éclairage artificiel associées) que les critères du confort visuel : luminance, contraste ou indice d'éblouissement.

2. LE LOGICIEL DE PHOTO-SIMULATION

La photo-simulation de l'éclairage correspond à une approche physique des phénomènes lumineux. Ceci concerne aussi bien les sources lumineuses (artificielles et naturelles) que le comportement des matériaux (en transmission et en réflexion). Les données relatives aux sources et aux matériaux sont des données spectrales. Par défaut, le nombre de tranches de longueurs d'onde de notre outil est de 40.

La spécificité du logiciel PHANIE, développé par le CSTB, réside dans les algorithmes mis en œuvre pour traiter le plus complètement et le plus rapidement possible l'ensemble de ces phénomènes lumineux : c'est principalement une méthode de radiosité hiérarchique qui est utilisée. Cette méthode présente les caractéristiques suivantes :

- **technique itérative, indépendante du point de vue** : une fois les calculs réalisés, la scène peut être visualisée de n'importe quel point
- **utilisation de maillages de calcul adaptatifs** : ce type de maillage permet de raffiner les calculs en fonction des gradients d'éclairements
- **gestion des aspects dynamiques de l'éclairage** : l'influence de modifications "mineures" sur les sources de lumière et/ou les matériaux est obtenue rapidement sans avoir la nécessité de refaire l'ensemble du calcul

Les calculs en éclairage naturel font appel aux modèles de luminance de ciel normalisés par la Commission Internationale de l'Éclairage ou au ciel moyen représentatif des situations lumineuses sur une période donnée ou bien encore à une prise de vue fish-eye du ciel.

PHANIE permet de simuler l'éclairage dans n'importe quel type de scène : seules les performances des machines limitent la complexité de ce qui peut être simulé. Il est ainsi possible d'intégrer dans la scène l'ensemble des éléments de l'aménagement intérieur tel qu'il est envisagé et de façon plus générale tous les éléments (intérieurs et extérieurs) qui ont une influence sur la pénétration et la répartition de la lumière du jour.

3. LE CIEL MULTIZONES

Le principe retenu pour effectuer le bilan de l'éclairage intérieur sur une longue période est basé sur le découpage du ciel en un très grand nombre de zones. L'objectif est de calculer, en tout point de calcul, ce qui est dû à chacune des zones de ciel. En couplant ce résultat à des données météorologiques horaires on détermine, à chaque instant, le niveau d'éclairement (ou toute autre grandeur) correspondant.

Le découpage retenu est un découpage régulier en azimut et en $(\cos \theta)^2$, où θ est la hauteur angulaire par rapport à l'horizon. On travaille alors en termes de zones iso-facteur de forme projeté. Le nombre de zones est paramétrable, mais pour obtenir une précision satisfaisante il est en général de l'ordre de 1 000. Si on ne considérait que les apports du ciel on pourrait se contenter d'un nombre de zones moindre ; c'est le fait d'utiliser le découpage du ciel pour prendre en compte les apports solaires directs qui conduit à ce nombre élevé. Le flux lumineux du soleil est réparti entre quatre zones de ciel au prorata de la position du centre de ces zones par rapport à la position du soleil.

L'influence du nombre de zones de ciel sur le résultat est surtout sensible quand on est en présence de protection solaire à base de lames. Pour évaluer au mieux les apports solaires intérieurs il est nécessaire d'avoir un grand nombre de zones de ciel. Dans les autres cas, si on ne s'intéresse qu'à la valeur moyenne de l'éclairement intérieur, quelques centaines de zones sont suffisantes. Si les résultats du calcul par ciel zones sont utilisés pour obtenir la répartition des éclairagements pour une situation lumineuse extérieure donnée, le nombre de zones doit alors être assez important.

Chacune des zones du ciel est affectée d'une luminance unité. Le résultat d'un calcul utilisant le ciel multizones s'exprime en termes, non pas d'une valeur d'éclairement (ou autre grandeur), mais d'un tableau de N coefficients associés aux N zones de ciel. Pour obtenir la valeur de l'éclairement (ou autre grandeur) il suffit de faire la somme des N produits d'un coefficient par la luminance moyenne de la zone de ciel correspondante.

L'intégration de cette méthode dans PHANIE a été faite en utilisant les tableaux destinés aux valeurs spectrales pour y stocker les valeurs associées aux différentes zones de ciel. Dans ce mode de fonctionnement, les simulations ne sont plus spectrales : toutes les surfaces sont supposées "grises".

En raison de la taille des tableaux qui y sont manipulés (de l'ordre de 1 000 éléments par tableau) les calculs en ciel multizones sont à la fois gourmands en taille mémoire et en durée de calcul. Selon la complexité géométrique de la scène à traiter, le nombre de zones de ciel et la précision demandée, la durée du calcul peut aller de quelques minutes à quelques heures.

4. LE BILAN DE L'ÉCLAIRAGE INTERIEUR

4.1. PRINCIPE DE LA METHODE

Pour illustrer le principe de la méthode on se place dans le cas où l'on calcule des éclairagements intérieurs sur le plan de travail. Les autres possibilités offertes par la méthode sont décrites en 4.4.

Pour analyser les performances d'un bâtiment en éclairage naturel sur une période plus ou moins longue, la première étape consiste à effectuer une simulation en ciel multizones. Le principe consiste à calculer les contributions des différentes zones de ciel sur une grille de points de calcul plus ou moins importante. Le résultat d'une telle simulation se présente sous la forme d'un fichier contenant les coefficients associés aux N zones de ciel pour chacun des P points de calcul.

Dans cette première partie de la méthode, le temps de calcul est directement lié, en plus de la complexité géométrique de la scène, au nombre de zones de ciel. De façon générale, le temps associé au calcul des grandeurs auxquelles on s'intéresse est très faible comparé au temps passé à celui de l'environnement lumineux.

La deuxième étape consiste à coupler ces résultats avec des données météorologiques. Les données utilisées sont celles issues du programme SatelLight et récupérables sur le site www.satel-light.com. Les paramètres récupérés sont les éclairagements et les rayonnements diffus et global horizontaux.

L'utilisation de ces données fait appel aux modèles de ciel proposés par le CSTB (Perraudeau, 1988), mais le modèle CIE (ISO, 2004) peut également être utilisé. A chaque instant du fichier météo (toutes les ½ heures) le principe du calcul, pour obtenir le niveau d'éclairage naturel, est le suivant :

- détermination du type de ciel et de la visibilité du soleil
- calcul de la luminance moyenne de chaque zone de ciel
- calcul de l'éclairage en chacun des points par sommation des N produits du coefficient par la luminance
- si le soleil est visible dans le ciel, on ajoute au résultat précédent la contribution éventuelle du soleil après avoir déterminé sur quelles zones de ciel la répartir

On obtient ainsi, à chaque instant du fichier météo, la valeur de l'éclairage en chaque point de calcul et par conséquent la valeur moyenne sur l'ensemble des points. Les résultats sont présentés sous la forme de courbes de fréquences cumulées de la probabilité de ne pas atteindre un niveau d'éclairage en éclairage naturel seul. Cette représentation permet d'accéder directement au pourcentage de temps pendant lequel on aura recours à l'éclairage artificiel.

Si on connaît les caractéristiques de l'installation d'éclairage artificiel, telles que la puissance installée et les possibilités en terme de gradation, le calcul détermine à chaque pas de temps les besoins en éclairage artificiel pour venir compenser les faibles apports en lumière du jour. La figure 1 donne un exemple de résultats. Les consommations calculées sont comparées à celle d'un local aveugle.

Cette deuxième partie de la méthode s'effectue très rapidement (de l'ordre de quelques minutes au maximum) ; le temps de calcul dépend du nombre de zones de ciel, du nombre de points pour lesquels on estime telle ou telle grandeur et de l'étendue de la période (mensuelle et horaire) qui est prise en

compte pour le bilan. On peut ainsi facilement et rapidement voir la sensibilité de quelques paramètres tels que l'orientation du bâtiment, la transmission lumineuse du matériau verrier ou bien le niveau d'éclairage intérieur que l'on cherche à maintenir.

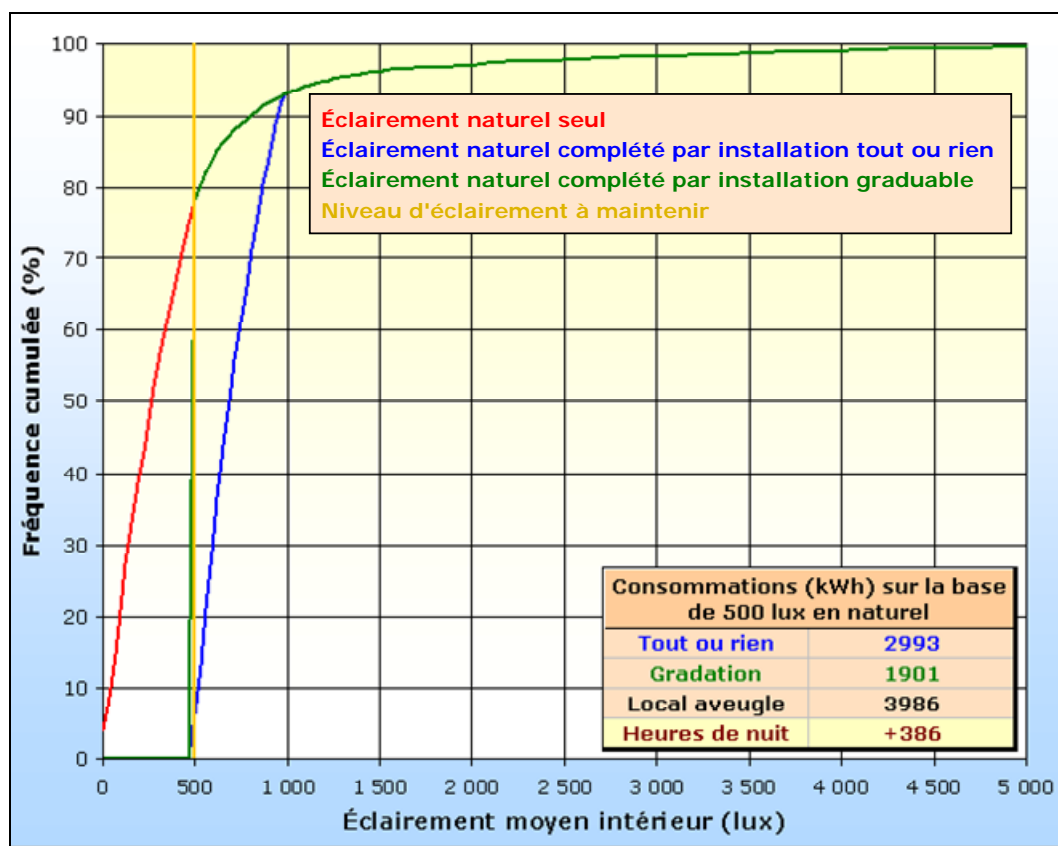


Figure 1 : Exemple de probabilité de ne pas atteindre un certain niveau d'éclairage et consommations électriques associées

4.2. PRISE EN COMPTE DES POSSIBILITES DE L'INSTALLATION D'ECLAIRAGE ARTIFICIEL

En ce qui concerne l'éclairage artificiel, on a vu que deux modes de fonctionnement de l'installation étaient considérés : en tout ou rien ou par gradation. Dans ces modes on ne définit que le niveau d'éclairage moyen associé au fonctionnement à 100 %. Il est possible d'associer le calcul en éclairage naturel en ciel zones à un calcul en éclairage artificiel. Les résultats de celui-ci sont conservés sous la forme d'éclairage aux points de la grille de calcul utilisée pour l'éclairage naturel. Dans le cas d'une installation pouvant être fractionnée, on calcule en chaque point la contribution de chacune des parties de l'installation.

Par défaut la temporisation correspond au pas de temps des données météo (30 minutes). Le fonctionnement (total ou partiel) ou l'arrêt de l'installation d'éclairage artificiel ne dépend que d'un seul seuil. Pour tenir compte de la qualité de la lumière du jour, le seuil peut être plus faible que le niveau fourni par l'éclairage artificiel dans des conditions de nuit.

4.3. PRISE EN COMPTE DE LA PROTECTION SOLAIRE

La méthode permet de prendre en compte la gestion de la protection solaire. Pour intégrer la présence d'une protection solaire amovible ou active dans le bilan de l'éclairage intérieur, on effectue,

en éclairage naturel par ciel zones, autant de calculs qu'il y a de "positions" ou d'états de la protection solaire : dans le cas d'un store toile, une position correspond à un pourcentage d'ouverture protégée ; dans le cas d'un store vénitien, c'est l'orientation des lames qui définit une position ; dans le cas d'un matériau actif, c'est la nature de la transmission lumineuse (claire ou opale, par exemple) qui définit un état

La gestion de la mise en place de la protection solaire peut se faire de différentes façons :

- à partir des **niveaux d'éclairements moyens intérieurs** : quand le rapport entre le niveau dû au ciel et au soleil et celui dû au ciel seul est supérieur à un seuil, la protection est mise en place
- à partir de **points de calculs "témoins"** placés au niveau des surfaces vitrées : en fonction du flux incident et/ou du pourcentage de points ensoleillés on décide de la mise en place de la protection
- à partir d'un **critère de confort visuel** : quand, par exemple, l'indice d'éblouissement dépasse la valeur correspondant à un éblouissement inconfortable la protection doit être mise en place

Si la protection solaire peut prendre plusieurs positions ou avoir plusieurs états, c'est la position ou l'état qui optimise le niveau d'éclairement intérieur qui est privilégiée.

Le bilan peut également être fait avec une protection solaire dont les caractéristiques seraient liées au flux lumineux reçu.

4.4. PARAMETRES POUVANT ETRE ANALYSES AVEC LA METHODE

Si l'utilisation première de cette méthode est de faire le bilan en termes de niveau d'éclairement intérieur elle peut également être mise en œuvre pour analyser les autres paramètres du confort visuel en éclairage intérieur :

- **uniformité de l'éclairement** : en éclairage artificiel, l'uniformité (rapport entre l'éclairement minimum et l'éclairement moyen) constitue un critère de qualité, avec une valeur minimale à respecter ; en situation d'éclairage naturel ou mixte, quand on s'intéresse à une zone de grande étendue, la notion d'uniformité n'a plus vraiment de sens mais, à condition de ne pas avoir les mêmes exigences, elle constitue, dans de nombreux cas, une information utile en complément du niveau d'éclairement moyen.
- **contraste** : la limitation des contrastes concerne aussi bien la tâche visuelle (le rapport entre sa luminance et celle de l'environnement immédiat ne devrait pas être supérieur à 3) que l'environnement lumineux général (rapport entre la luminance des murs et la luminance des plans horizontaux, par exemple). L'objectif n'est pas de se trouver dans une situation où toutes les surfaces auraient la même luminance, mais de s'assurer que les contrastes soient compris entre des valeurs limites jugées acceptables.
- **indice d'éblouissement** : l'indice d'éblouissement est destiné à évaluer les luminances du champ visuel en présence d'une surface de forte luminance, ce qui est le cas du ciel vu par les ouvertures ou de la protection solaire de type toile. La valeur de cet indice détermine la situation dans laquelle on se trouve, de juste perceptible à intolérable. Ce paramètre fait aussi partie de ceux pouvant être utilisés pour la mise en place de la protection solaire.

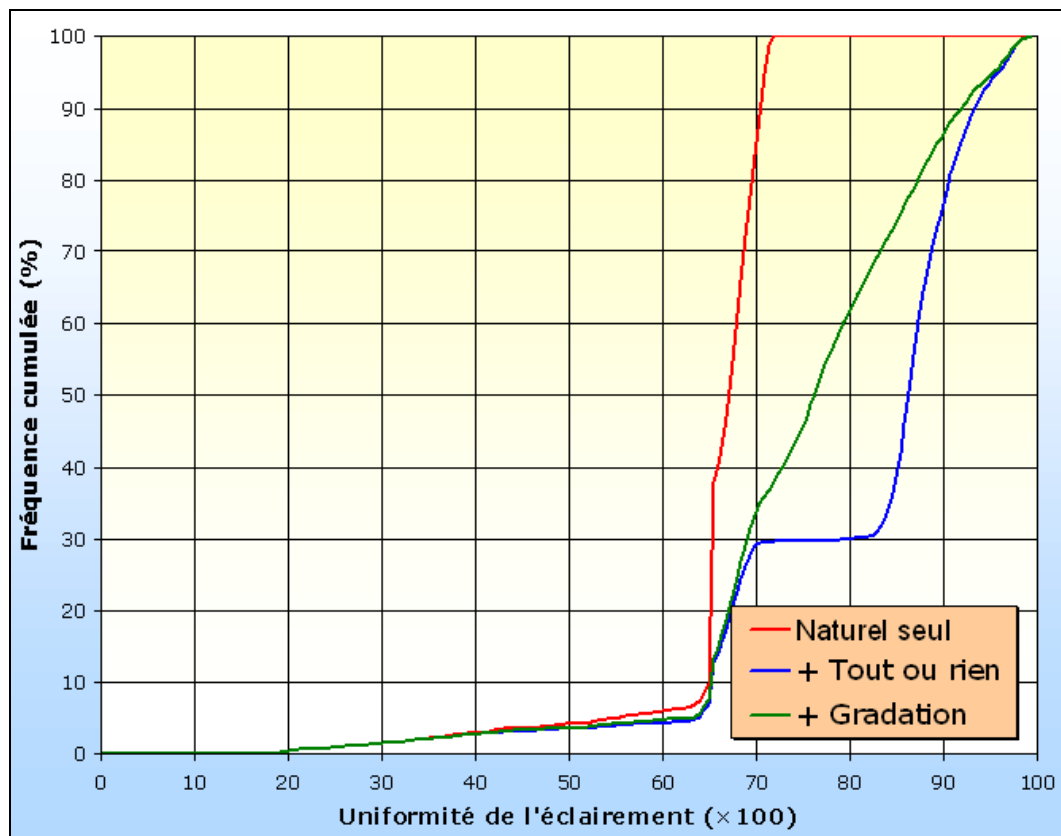


Figure 2 : Exemple de distribution de l'uniformité de l'éclairage sur un plan de travail

Pour ces trois paramètres les résultats sont présentés, comme pour le niveau d'éclairage, sous la forme d'une courbe de fréquence cumulée qui permet d'obtenir, entre autre, la fourchette et la valeur moyenne du paramètre. En mettant en parallèle le bilan de ces paramètres avec celui du niveau d'éclairage (donc de la consommation) on dispose d'éléments pour optimiser ces deux aspects de l'éclairage intérieur.

D'autre part, en dehors des résultats sous forme de bilan, les résultats issus des calculs préliminaires peuvent être utilisés pour visualiser la répartition des éclairages sur le plan étudié pour toute condition d'éclairage naturel pouvant être représentée par les modèles de ciel normalisés ou autres.

5. EXTENSION DE LA METHODE ET PERSPECTIVES

Cette méthode de calcul, basée sur l'utilisation du ciel multizones, a également été utilisée pour évaluer les performances lumineuses de systèmes d'éclairage naturel tels que les lanterneaux (Perraudeau *et al.*, 2007) ou les conduits de lumière. Dans ces cas-là, l'objectif est de caractériser le comportement photométrique de ces systèmes sur une année complète : ceci concerne le rendement lumineux, la distribution spatiale de la lumière transmise, la luminance maximale...

On accède ainsi aux mêmes informations que celles associées aux luminaires d'éclairage intérieur. Mais contrairement aux luminaires, la source lumineuse n'est pas fixe : c'est pourquoi les résultats d'une telle analyse sont présentés, comme pour le bilan de l'éclairage intérieur, sous la forme de courbes de fréquences cumulées. Cette démarche peut être mise en œuvre dans le cadre de la conception des dispositifs ou bien pour analyser leurs performances une fois mis en situation.

Deux pistes d'amélioration de la première partie de la méthode concernant la précision et la réduction des temps de calcul sont envisagées :

- **pour améliorer la précision** : au lieu d'avoir un découpage régulier de la totalité du ciel, on pourrait imaginer de renforcer le découpage dans les zones de ciel directement vues par les ouvertures et de se contenter d'un découpage plus grossier en dehors de ces zones là. Pour améliorer la prise en compte du soleil un surdécoupage pourrait être appliqué dans les zones de ciel où évolue le soleil et qui sont directement visibles depuis les ouvertures.
- **pour réduire les temps de calculs** : l'idéal serait de pouvoir traiter les N configurations de protection solaire au cours de la même simulation. Pour le moment, les N configurations sont traitées avec N simulations. L'objectif est d'adapter les algorithmes de calcul pour prendre en compte ces N configurations, en s'appuyant sur le fait que d'une configuration à l'autre on a en général des résultats assez voisins.

D'autre part, pour que les résultats soient les plus "réalistes" possible il faudrait pouvoir prendre en compte des comportements d'occupants qui ne soient plus théoriques mais représentatifs des comportements réels.

6. CONCLUSION

Avec cette méthode on dispose d'une solution pour évaluer l'environnement lumineux intérieur, non plus seulement pour telle ou telle situation d'éclairage naturel, mais en termes de bilan annuel. L'intérêt réside aussi dans le fait que cette évaluation ne se limite pas au seul niveau d'éclairement moyen sur le plan de travail mais permet d'accéder à tous les aspects du confort visuel. Elle permet également d'analyser en parallèle ce qui relève du confort et les consommations électriques pour l'éclairage. Il est prévu d'adapter la méthode à des outils de calcul aux possibilités moindre comme les règles de calcul de la future réglementation thermique.

7. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR (2007). *Norme NF EN 15193 : Performance énergétique des bâtiments - Exigences énergétiques pour l'éclairage.*
- CSTB (2005). *Réglementation thermique 2005 – Règles de calcul Th-CE*
- Hviid C.A., Nielsen T.R., Svendsen S. (2008), Simple tool to evaluate the impact of daylight on building energy consumption, *Solar Energy*, article in press
- ISO (2004). *Standard ISO 15469 : Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky*
- Krarti M., Erickson P.M., Hillman T.C. (2005), A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. *Building and Environment*, vol. 40, p. 747-754
- Perraudeau M. (1988), Luminance models, *National Lighting Conference and Daylighting Colloquium*, Cambridge, p. 291-292
- Perraudeau M., Carré S. (2007). Evaluation of annual interior lighting using multizones sky, *26th session of the CIE*, Beijing, p. D3-14 – D3-17
- Perraudeau M., Lepage B. (2007). Evaluation of annual luminous performances of skylights using luminous intensity distribution, *26th session of the CIE*, Beijing, p. D3-200– D3-203