



HAL
open science

Eclairage

Yannick Sutter

► **To cite this version:**

Yannick Sutter. Eclairage. Energétique des bâtiments & simulation thermique, 2016, 978-2-212-14275-4. hal-04847070

HAL Id: hal-04847070

<https://hal.science/hal-04847070v1>

Submitted on 18 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1.2 ECLAIRAGE, Y. SUTTER

PREAMBULE

La caractérisation globale des ambiances lumineuses fait l'objet de nombreuses recherches. Les outils informatiques permettent aujourd'hui de déterminer un grand nombre d'indicateurs caractérisant la quantité et qualité de la lumière mais il est encore difficile de caractériser numériquement le caractère agréable d'un éclairage.

Les possibilités offertes par les logiciels de simulation de la propagation de la lumière sont très vastes, allant de la détermination de profils d'utilisation de protections solaires aux rendus photoréalistes en passant par les calculs de facteur de lumière du jour. Une bonne maîtrise de ces outils est néanmoins essentielle pour prétendre à des résultats fiables.

Dans ce chapitre nous évoquons les divers indicateurs et méthodologies qui permettent d'apprécier la quantité et la qualité de la lumière naturelle dans un espace. Nous aborderons également les divers algorithmes de simulation de propagation de la lumière qui existent à ce jour avant de proposer plusieurs tests paramétriques dont le but est de sensibiliser le lecteur à l'impact des paramètres de modélisation et de simulation sur la précision des résultats.

INDICATEURS D'ECLAIRAGE NATUREL

CONCEPT DE L'AMBIANCE LUMINEUSE

Il existe plusieurs approches pour caractériser l'éclairage dans un espace intérieur. Certains s'intéressent à la quantité de lumière disponible, d'autres vérifient que la conception permet de prévenir les situations d'éblouissement et d'autres encore se basent sur leur ressenti du caractère plaisant et agréable de l'éclairage.

Aucune de ces approches n'est meilleure ou moins bonne qu'une autre, elles répondent à des objectifs différents et sont toutes les trois importantes. Dans la plupart des espaces, on aura toujours besoin à un moment ou à un autre de disposer de suffisamment de lumière et de ne pas être ébloui pour effectuer la tâche que l'on est en train de faire mais également de s'y sentir bien. Ces trois paramètres permettent de caractériser une ambiance lumineuse (Moniteur, 2007), (ARENE, 2014).

Une ambiance lumineuse réussie devra pouvoir satisfaire ces exigences quantitatives et qualitatives. La manière dont elle y répondra dépendra des priorités qui seront fixées lors de la conception, priorités qui sont en grande partie liées à l'usage de l'espace mais également au contexte culturel.

Comme l'indique la représentation schématique de la figure 1, l'ambiance lumineuse d'un espace intérieur se caractérise de manière globale par sa capacité à :

- Offrir un éclairage qui fournira une quantité de lumière suffisante pour effectuer une tâche, autrement dit à satisfaire la notion de besoin
- Garantir un espace dépourvu d'éblouissement, autrement dit à satisfaire la notion de confort ou d'absence d'inconfort,
- Proposer à l'usager une expérience lumineuse agréable et plaisante, autrement dit à satisfaire la notion d'agrément.

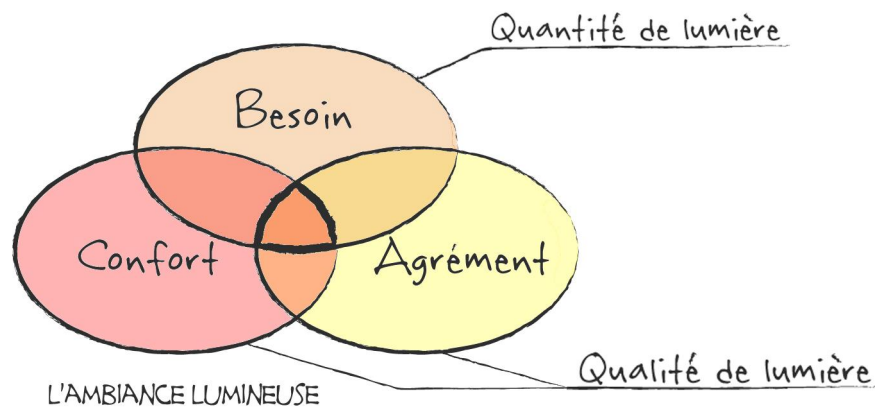


Figure 1 : représentation schématique de l'interaction des paramètres de l'ambiance lumineuse

Une ambiance lumineuse idéale satisfait ces trois paramètres. Les conceptions lumineuses et architecturales les plus à même d'y répondre seront souvent celles qui permettent une versatilité de l'environnement. Cloisons amovibles, protections solaires mobiles, éclairage électrique gradable, multiplication des sources lumineuses, sont quelques exemples de solutions qui pourront participer à l'amélioration de l'ambiance lumineuse.

INDICATEURS DE CARACTERISATION DES AMBIANCES LUMINEUSES

Plusieurs types d'indicateurs sont disponibles pour caractériser une ambiance lumineuse en éclairage naturel. Avant de choisir d'en utiliser un plutôt qu'un autre, il convient de réfléchir à l'aspect que l'on souhaite caractériser pour ensuite identifier le ou les indicateurs qui permettront d'apprécier au mieux la problématique. Par exemple, utiliser le calcul de facteur de lumière du jour dans l'objectif de caractériser les zones d'un local qui présenteront un potentiel d'éblouissement n'aboutira à aucune conclusion.

INDICATEURS DE BESOIN

La grandeur photométrique utilisée pour déterminer si un éclairage permettra d'effectuer une tâche dans de bonnes conditions visuelles est l'éclairement. Il représente la quantité de lumière reçue par une surface et se mesure en lux.

La norme EN 12464-1 propose des seuils d'éclairement à maintenir en fonction de la tâche effectuée. Si l'éclairement est utilisé pour caractériser les performances d'une installation d'éclairage électrique, cette grandeur ne peut être utilisée seule en éclairage naturel à cause de sa variabilité permanente.

LE FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR

Pour s'affranchir de la variabilité de la lumière naturelle, le concept de Facteur de Lumière du Jour (ou FLJ) aurait été introduit en 1895 Alexander Pelham Trotter (Mardalevic, 2013). L'ambition du facteur de lumière du jour est de permettre la caractérisation de l'accès à la lumière naturelle d'un local en fonction de la géométrie et des propriétés optiques de l'environnement mais indépendamment des conditions extérieures. Il représente le ratio entre l'éclairement intérieur horizontal (E_{int}) en un point d'un local et l'éclairement horizontal extérieur non-obstrué (E_{ext}) sous un ciel couvert représenté par le modèle théorique du ciel couvert CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) (Moon, 1942). Il s'exprime en pourcents :

$$FLJ (\%) = 100 \times E_{int}/E_{ext}$$

Compte tenu de sa définition, le facteur de lumière du jour est un indicateur qui ne tient pas compte de la localisation géographique, de l'orientation des prises de jour et de la variabilité des conditions météorologiques. C'est en d'autres termes une métrique qui permet de caractériser l'accès à la lumière naturelle d'un local dans les conditions les plus défavorables, celles du ciel couvert sans soleil. Sa pertinence dépend donc de la fréquence d'occurrence des ciels couverts pour le lieu considéré. En Europe continentale cette fréquence est suffisamment élevée pour justifier l'utilisation du facteur de lumière du jour.

Comme représenté sur la figure 2, trois composantes participent au facteur de lumière du jour d'un local :

- La composante directe, due à la voute céleste uniquement
- La composante réfléchie externe, due aux réflexions de la lumière naturelle sur l'environnement extérieur
- Et la composante réfléchie interne, due aux réflexions de la lumière naturelle dans le local considéré.

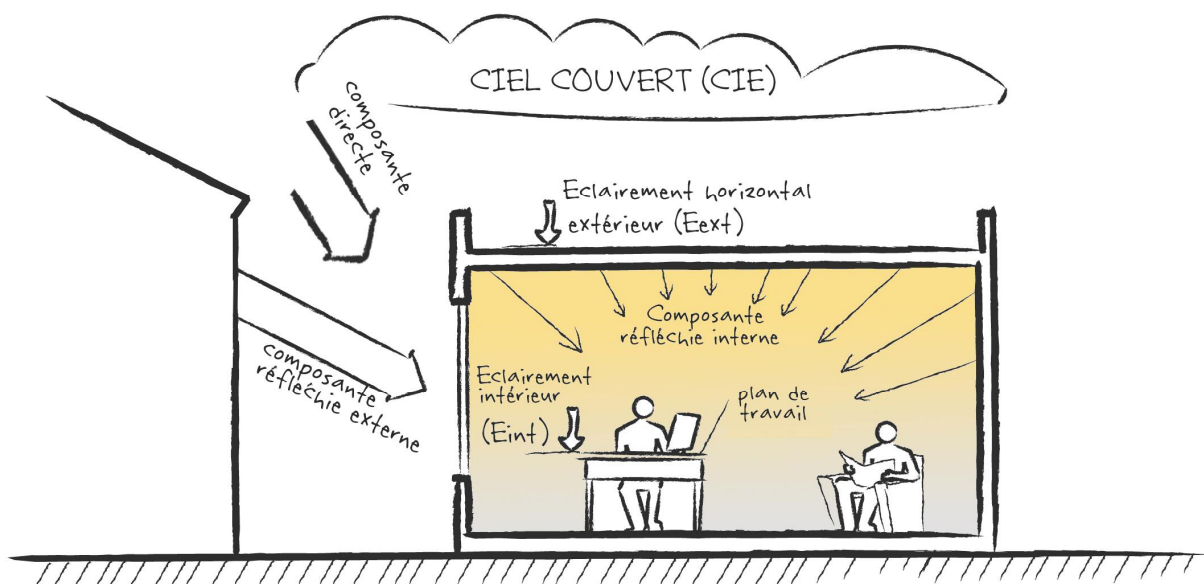


Figure 2 : les trois composantes du facteur de lumière du jour

Pour un local déterminé, il est possible de représenter les valeurs ponctuelles du facteur de lumière du jour sous forme d'une cartographie et également d'en réaliser une moyenne pour obtenir le facteur de lumière du jour moyen.

L'AUTONOMIE LUMINEUSE

L'apparition de stations de mesure et de stockage des conditions lumineuses extérieures en temps réel (CIE, 1994) ont permis la production de données statistiques qui renseignent par exemple sur la fréquence d'occurrence de niveaux d'éclairage diffus (dus à la voute céleste uniquement) et globaux (dus à la voute céleste et au soleil).

La figure 3 représente la répartition en fréquence des niveaux d'éclairage extérieur horizontal diffus à Paris sur une année entre le lever et le coucher du soleil.

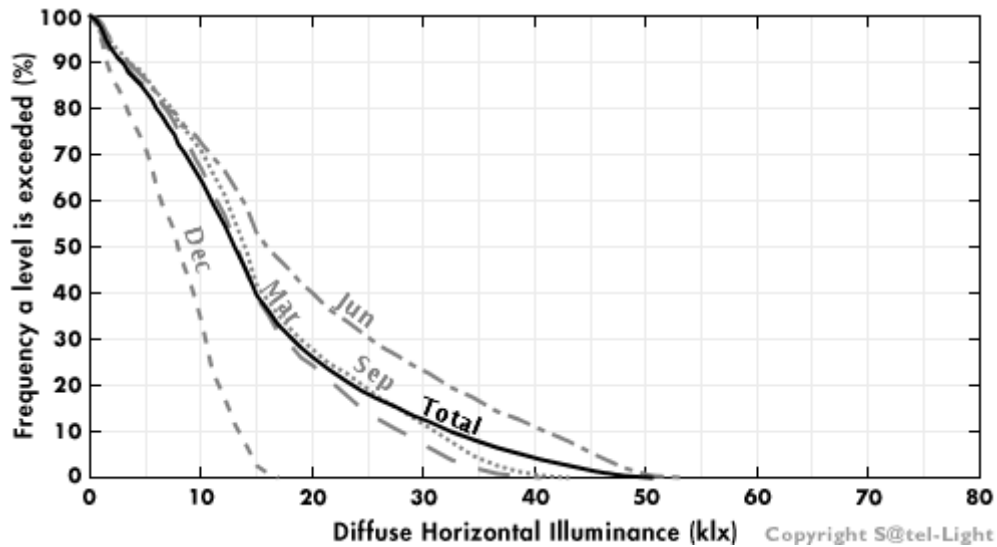


Figure 3 : Répartition en fréquence des niveaux d'éclairage extérieur horizontal diffus à Paris (source : satel-light.com)

Cette répartition en fréquence permet d'exploiter le facteur de lumière du jour afin de tenir compte de la disponibilité en éclairage naturel d'un site géographique. Si l'on se fixe une consigne d'éclairage intérieur à respecter, il est possible de déterminer la fréquence durant laquelle cette consigne est atteinte en utilisant des statistiques de fréquence de dépassement d'éclairage diffus et la valeur du facteur de lumière du jour moyen du local.

Par exemple, pour un local à Paris ayant un facteur de lumière du jour moyen de 2%, on souhaite connaître le pourcentage de temps durant lequel l'éclairage intérieur dû à l'éclairage naturel seul dépassera 300 lux. On peut déduire de la formule définissant le facteur de lumière du jour que cette valeur sera dépassée dès lors que l'éclairage extérieur horizontal diffus atteindra 15 000 lux (300 lux divisé par 0,02). On peut alors lire sur la Figure 3 que cette valeur est dépassée, donc qu'il y aura au moins 300 lux sur le plan utile du local, pendant environ 40% en moyenne sur l'année (entre 3% en décembre et 60% en juin). Cette approche peut également être utilisée pour déterminer le facteur de lumière du jour moyen d'un local qui permettra d'atteindre une consigne d'éclairage donnée pendant une période définie.

Cet exemple illustre la naissance du concept d'autonomie lumineuse en éclairage naturel. Elle est définie comme le nombre d'heures (ou le pourcentage de temps) durant lesquelles une consigne d'éclairage donnée sera atteinte grâce à l'éclairage naturel seul sur une période donnée.

Grâce au développement des méthodes numériques et la disponibilité de données statistiques d'éclairages extérieurs, il est devenu possible de déterminer l'autonomie lumineuse d'un bâtiment en tenant compte des conditions climatiques réelles de la localisation géographique, de l'orientation et des horaires d'utilisation, ce que ne permet pas le facteur de lumière du jour.

Le calcul de l'autonomie lumineuse par simulation utilise le concept du Daylight Coefficient (Tregenza, 1983) qui relie la participation de la luminance d'une portion de ciel à l'éclairage en un point du local en fonction de la géométrie de l'environnement et de l'angle solide sous-tendu par ladite portion de ciel. Le ciel est discrétisé en un nombre fini de zones et la participation de chacune de ces zones à l'éclairage en un point du local est ainsi déterminée. Comme le calcul numérique d'une autonomie lumineuse utilise des données climatiques mesurées avec un pas allant d'une minute à une heure, cette méthodologie permet d'optimiser le temps de calcul en évitant de générer un calcul de propagation de la lumière pour chaque type de ciel.

De nombreuses variantes de l'autonomie lumineuse de base ont été développées (Reinhart, 2010) :

- Lumière naturelle utile ou UDI (Useful Daylight Illuminance). Cet indicateur caractérise le nombre d'heures durant lesquelles l'éclairage naturel à l'intérieur d'un local ne sera ni trop faible (<100 lux) ni trop abondant (>2000 lux). Ces seuils délimitent la plage d'éclairages qui représentent des conditions acceptables d'éclairage naturel.
- Autonomie lumineuse continue (DA_{cont}). Cet indicateur propose de prendre en considération la participation de la lumière naturelle qui est en dessous de la consigne fixée. Par exemple sur une plage temporelle délimitée, si la consigne est de 300 lux, chaque occurrence d'éclairage E inférieur à cette consigne sera prise en considération dans le calcul statistique avec un poids de $E/300$. C'est un moyen d'assouplir le seuil tout-ou-rien de l'autonomie classique. Cet indicateur permet de valoriser les systèmes de gradation de l'éclairage électrique.
- Autonomie lumineuse maximale (DA_{max}). Cette autonomie ne prend pas en compte les éclairages qui sont supérieurs à 10 fois la consigne fixée et exclut ainsi de ses données d'entrée les périodes durant lesquelles un éblouissement pourrait vraisemblablement se produire.
- Autonomie lumineuse spatiale (Spatial daylight autonomy – sDA). Cet indicateur renvoie le pourcentage de surface d'un local où l'éclairage sera supérieur à 300 lux pendant 50% du temps (IES, 2012)

INDICATEURS DE CONFORT

La grandeur photométrique qui permet de caractériser le confort visuel et l'éblouissement est la luminance. Elle représente la quantité de lumière réfléchié ou produite par une surface, telle qu'elle est perçue par le système visuel ; elle s'exprime en candela par mètre carré (cd/m^2). La luminance est la seule grandeur photométrique appréciable par le système visuel.

L'inconfort visuel est caractérisé par le degré d'éblouissement subi par un individu. L'éblouissement peut se produire dans deux types de situations. Lorsqu'une lumière parasite vient perturber la visibilité, on parle d'éblouissement d'incapacité. C'est un phénomène physiologique qui se traduit par une diminution instantanée de la performance visuelle. Une répartition défavorable des luminances dans le champ de vision peut entraîner un déséquilibre difficilement gérable par le système visuel ou par le référentiel propre à chaque individu, on se trouve dans ce cas dans une situation d'éblouissement d'inconfort. Cette sensation relève en grande partie du subjectif.

Les deux phénomènes peuvent se produire simultanément ou indépendamment l'un de l'autre. Si un individu sait identifier lorsqu'il se trouve dans une situation d'éblouissement d'incapacité, cela ne sera pas nécessairement le cas pour une situation d'éblouissement d'inconfort. Il en subira en revanche les conséquences à plus ou moins long terme sous la forme de maux de têtes, de picotements d'yeux ou encore d'irritabilité.

RAPPORTS DE CONTRASTES DE LUMINANCES

De nombreuses recommandations d'éclairage abordent la question de l'éblouissement d'inconfort en proposant d'étudier les rapports de contrastes entre les luminances des surfaces présentes dans le champ de vision, représenté sur la figure 4.

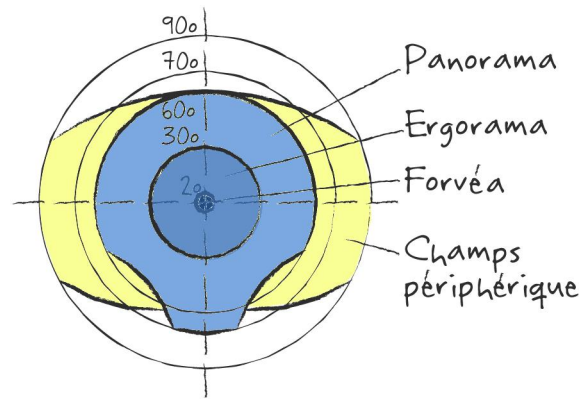


Figure 4 : représentation des zones du champ visuel

Pour un individu effectuant une tâche statique, il est souvent recommandé que les rapports de contrastes de luminances dans les zones du champ de vision respectent les ratios suivants afin de prévenir les situations d'inconfort (CIBSE, 1994), (Rea, 1993):

- 1 :3 ou 3 :1 entre la tâche visuelle (en principe placée au centre du champ de vision) et l'environnement proche (ergorama)
- 1 :10 ou 10 :1 entre la tâche visuelle et les surfaces non-adjacentes (panorama)
- 1 :20 ou 20 :1 entre les sources lumineuses et leur environnement proche.

Ces recommandations sont davantage adaptées à un environnement éclairé électriquement. L'agrément additionnel apporté par l'éclairage naturel peut entraîner une tolérance supérieure et des études montrent que ces ratios supportent d'être multipliés par deux dans un local éclairé naturellement (Sutter, 2006).

INDICES D'EBLOUISSEMENT

De nombreuses recherches ont tenté de quantifier l'éblouissement d'inconfort. Le Daylight Glare Index (DGI) est une adaptation pour l'éclairage naturel de l'Unified Glare Rating (UGR), utilisé pour l'éclairage artificiel (Chauvel, 1983). Le DGI a cependant été élaboré à partir d'expériences utilisant des sources d'éclairage électrique verticales assimilables à des fenêtres, ce qui limite son champ d'application et sa validité.

Le Daylight Glare Probability (DGP) semble avoir aujourd'hui remplacé le DGI. Cet indice, développé à partir d'expériences sur des sujets soumis à diverses configurations d'éclairage naturel (Wienold, 2009), est une fonction de l'éclairement vertical total au niveau de l'œil (E_v), de la luminance des sources d'éclairage naturel (L_i), de l'angle solide soustendu par les sources d'éclairage naturel (ω_i) et de l'indice de position de Guth (P_i) qui permet d'apprécier l'effet de l'angle entre les sources d'éclairage et l'axe de vision. Il s'exprime à l'aide de la formule suivante :

$$DGP = 5.87 \times 10^{-5} E_v + 9.18 \times 10^{-5} \log \left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} P_i^2} \right)$$

(equation à éditer??)

Cet indice représente une avancée prometteuse dans la caractérisation de l'éblouissement d'inconfort et son utilisation se répand en étant notamment implémentée dans certains logiciels de simulation d'éclairage.

INDICATEURS D'AGREMENT

La notion d'agrément en éclairage naturel tient un rôle essentiel dans la caractérisation d'une ambiance lumineuse. S'il est important de proposer une conception qui permet de garantir un niveau d'éclairage approprié aux tâches à effectuer et de prévenir les situations d'éblouissement, il est au moins aussi important de réfléchir au caractère agréable de l'ambiance lumineuse.

Par exemple, un espace offrant un éclairage adapté sans générer d'éblouissement pourra s'avérer monotone et ne constituera pas nécessairement une expérience agréable pour un individu. A l'inverse, l'ambiance lumineuse d'un espace pourra dans certains cas être perçue comme agréable même s'il n'y pas suffisamment de lumière ou qu'un éblouissement potentiel est subi. Par exemple la présence d'une tache solaire qui pourrait être éblouissante sera toutefois tolérée par un individu car elle participera à son bien-être (ARENE, 2014)

Cet exemple illustre le poids important que tient l'agrément dans l'appréciation d'une ambiance lumineuse. Comme il s'agit d'un phénomène en grande partie subjectif, sa caractérisation est complexe et il n'existe pas d'indicateur unanime.

On peut néanmoins proposer des pistes de caractérisation de l'agrément en éclairage naturel:

- Proposer une vue sur l'extérieur agréable. Des recherches récentes ont permis d'établir un lien entre les divers composants d'une vue sur l'extérieur et son appréciation par un individu (Hellinga, 2013)
- Disposer de rayonnement solaire direct à l'intérieur d'un local. Certaines recommandations internationales proposent des seuils de rayonnement solaire direct à atteindre à l'intérieur d'un espace dans l'objectif de satisfaire les attentes des occupants (BS, 2008)
- Installer des protections solaires pour moduler l'apport de lumière naturelle (et par la même occasion les apports thermiques)
- Sélectionner des revêtements et matériaux qui génèrent des contrastes de couleurs, de textures et de luminances afin de briser la monotonie de l'espace.

APPROCHE GLOBALE

Nous avons à présent établi l'importance de caractériser une ambiance lumineuse de manière globale. Des recherches récentes ont pour ambition de proposer des approches multicritères qui considèrent tous les paramètres de l'ambiance lumineuse présentés dans ce document.

Le Daylighting Dashboard (Leslie, 2012) examine divers paramètres afin de constituer une analyse complète d'une situation d'éclairage naturel. Cette méthodologie analyse :

- L'éclairage moyen annuel sur le plan de travail déterminé à l'aide de données climatiques réelles.
- L'absence de zones trop sombres en calculant le pourcentage de surface du plan utile dont l'éclairage sera au dessus d'une consigne minimum fixée
- Le potentiel d'éblouissement dû à la présence de rayonnement solaire direct en calculant le pourcentage de surface qui en reçoit. Cette analyse est relaxée pour les locaux où le rayonnement solaire direct est bienvenu.
- Le potentiel d'économie d'énergie sur l'éclairage électrique en calculant le pourcentage de surface du plan utile où l'éclairage sera supérieur à une consigne de déclenchement de l'éclairage électrique
- Le potentiel de l'éclairage naturel du local à stimuler le cycle circadien des occupants pour activer leur horloge biologique en fonction de la fréquence de dépassement d'une consigne d'éclairage au niveau de l'œil
- Le bon dimensionnement des surfaces vitrées en calculant si le pourcentage de vitrage par rapport à la surface du sol est inférieur à une consigne fixée

- La qualité de la vue sur l'extérieur en examinant si elle contient une portion de ciel et une portion de sol extérieur.
- Le potentiel de surchauffe du local en vérifiant que l'apport énergétique moyen quotidien en W/m^2 dû à l'éclairage naturel est inférieur à une consigne donnée

Ces 8 paramètres sont ensuite reportés sur un diagramme radar afin d'obtenir une vision globale de la performance en éclairage naturel d'un local (Leslie, 2012).

METHODOLOGIES DE PREDETERMINATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL

Plusieurs méthodes sont possibles pour déterminer les indicateurs présentés dans la section précédente.

LES MESURES

La lumière se propage de manière identique dans un local à l'échelle 1 et dans un même local à échelle réduite, pourvu que les propriétés optiques des matériaux spécifiés soient similaires. Ainsi, il est possible d'effectuer des mesures dans un modèle réduit de bâtiment pour prédéterminer les facteurs de lumière du jour, la répartition des luminances ou encore la course du soleil à l'intérieur du local. En fonction de ce que l'on souhaite évaluer, les modèles réduits seront placés sous un ciel artificiel avec ou sans soleil ou bien à l'extérieur.

LES CALCULS

L'évolution des simulations numériques a tendance à faire disparaître l'utilisation de calculs manuels. La plupart des formules sont soit trop simplistes et leur utilisation est limitée à la phase esquisse d'un projet, soit trop complexes et impossibles à calculer manuellement, comme celle de l'indice d'éblouissement DGP.

Parmi les diverses formules simplifiées qui existent, comme par exemple les indices de vitrage et de profondeur (ARENE, 2014), on retiendra la formule du facteur de lumière du jour moyen (Littlefair, 1986).

Pour des locaux de forme standard, il est possible d'estimer le facteur de lumière du jour moyen en utilisant la formule suivante :

$$FLJ_{\text{moy}} = (T \cdot A_w \cdot \theta) / A(1 - R^2)$$

où :

- T est le facteur de transmission diffuse du vitrage,
- A_w est la surface vitrée (m^2),
- θ est l'angle de ciel visible depuis le centre de l'ouverture ($^\circ$),
- A est la surface totale des parois intérieures (fenêtre comprise) (m^2),
- R est le coefficient de réflexion moyen pondéré en surface des parois intérieures.

Le champ d'application de cette formule est limité. Par exemple, elle ne rendra pas correctement compte de la participation des surfaces vitrées situées sous le plan utile ou ne sera pas représentative pour des locaux de forme complexe ou présentant des zones qui ne sont pas directement éclairées par une fenêtre, comme dans le cas d'un local en L.

En revanche, en dehors de ces configurations, cette formule présente l'avantage de fournir des résultats intéressants en utilisation relative, par exemple si l'on souhaite analyser l'impact de la modification des surfaces vitrées ou du coefficient de transmission lumineuse du vitrage sur l'évolution du facteur de lumière du jour moyen. Plutôt que d'avoir un recours systématique aux simulations, la formule permettra dans une certaine limite de fournir une indication de la variation relative du facteur de lumière du jour moyen en fonction de l'évolution de ces paramètres.

LES SIMULATIONS NUMERIQUES

Les outils numériques permettent de calculer plusieurs des indicateurs présentés dans ce chapitre. En plus de faciliter les calculs, ils permettent également de considérer le comportement des usagers en intégrant des algorithmes d'utilisation de l'éclairage électrique et des protections solaires en fonction de leur type de pilotage et des consignes implémentées.

Le paragraphe suivant détaille les divers outils et méthodologies disponibles.

ZOOM SUR LES ALGORITHMES DE SIMULATION NUMERIQUE DE LA PROPAGATION DE LA LUMIERE

Il existe plusieurs algorithmes qui permettent de simuler la propagation de la lumière. Nous détaillons ici les principes de calcul pour les principaux d'entre eux.

LA METHODE DES FLUX SEPARES

Cette méthodologie, développée par le Building Research Establishment (Littlefair, 1986), permet de déterminer séparément la participation des composantes directe, réfléchie externe et réfléchie interne à l'éclairage global dans un local.

La composante directe (Sky Component ou SC) en chaque point de la grille de calcul est une fonction :

- de la luminance de chaque portion de ciel vue depuis les points de calcul,
- de la transmission lumineuse du ou des vitrages séparant la grille de calcul de la voûte céleste,
- de la surface apparente de chaque portion de ciel vue depuis les points de calcul.

La composante réfléchie externe (Externally Reflected Component ou ERC) est déterminée selon le même principe que la composante directe. Les propriétés de chaque portion de ciel obstruée sont remplacées par celles de l'obstruction. La composante réfléchie externe est donc fonction:

- de la luminance de chaque obstruction visible depuis les points de calcul
- de la transmission lumineuse du ou des vitrages séparant la grille de calcul des obstructions
- de la surface apparente de chaque obstruction vue depuis les points de calcul.

La composante réfléchie interne (Internally Reflected Component ou IRC) est considérée identique en chaque point de la grille de calcul et elle est fonction :

- de la géométrie du local,
- des coefficients de réflexion lumineuse des matériaux internes,
- de la portion de ciel visible à mi-hauteur de la fenêtre.

Cette méthodologie a l'avantage de générer des résultats en un temps de calcul court. En revanche, la manière dont est abordée la participation de la lumière réfléchie à l'intérieur du local (i.e. une valeur

identique en chaque point de calcul) limite considérablement son applicabilité. Les résultats pourront être satisfaisants dans des locaux qui reçoivent une majorité de lumière directe et dans lesquels la composante réfléchie interne est comparativement peu importante. Néanmoins, les résultats ne seront pas représentatifs dans les locaux de forme complexe ou qui présentent des zones qui ne reçoivent pas de lumière directe depuis la voûte céleste. (Reinhart, 2010)

Cette approche, très utilisée dans les années 1980, est désormais remplacée par d'autres méthodologies plus robustes et son utilisation n'est pas recommandée pour la conception. Une utilisation en approche « relative » peut néanmoins fournir des indications utiles en phase esquisse d'un projet.

Cette méthodologie est notamment une des deux options de calcul du logiciel Ecotect^{1 2}, l'autre étant l'utilisation de l'algorithme de lancer de rayons via Radiance.

LA RADIOSITE

L'algorithme de radiosité a été développé pour caractériser les transferts de chaleur radiatifs entre plusieurs surfaces, il se base sur le principe des facteurs de forme. Un facteur de forme entre deux surfaces est défini par la portion de flux radiatif produit par la première surface qui est reçue par la seconde. L'environnement est discrétisé en surfaces de dimensions finies et le flux radiatif total reçu par une surface est la somme des flux émis par les surfaces de l'environnement pondérés par leurs facteurs de forme respectifs. La finesse de la discrétisation est un facteur prépondérant dans la précision des résultats. (Reinhart, 2011)

Depuis les années 80, cette méthodologie a été étendue à l'étude de la propagation de la lumière. Chaque surface est considérée comme parfaitement diffuse et de luminance constante. Par ailleurs, l'algorithme peut être renforcé par un programme qui affine la discrétisation des surfaces dans les zones présentant de forts gradients de luminance (CSTC, 2011). Compte tenu des hypothèses de calcul, il est néanmoins préférable de limiter son utilisation en éclairage naturel à des modèles de ciel simples, comme pour des calculs de facteur de lumière du jour en ciel couvert.

Cet algorithme est notamment utilisé par le logiciel DiaLux³.

LE LANCER DE RAYONS

La méthode de lancer de rayons consiste à suivre la manière dont la propagation d'un rayon lumineux d'un point A à un point B est affectée par la géométrie de l'environnement et les propriétés optiques des matériaux qu'il rencontre sur sa trajectoire. Deux approches sont possibles :

- Le point A est la source de lumière et une série de rayons est lancée depuis cette source. En fonction du nombre de réflexions spécifiées pour les rayons lumineux, certains atteindront le

¹ <http://www.autodesk.fr/adsk/servlet/pc/index?siteID=458335&id=15062033>

² A partir du 20 Mars 2015, les licences Ecotect ne seront plus commercialisées et ses fonctionnalités seront incluses dans les produits Autodesk Revit © (<http://www.autodesk.fr/products/revit-family/overview>)

³ <http://www.dial.de/DIAL/fr/dialux.html>

point de mesure (le point B), d'autres non. Il s'agit du lancer de rayons direct ou *forward raytracing*.

- Le point A est le point de mesure et une série de rayons est lancée depuis ce point. En fonction du nombre de réflexions spécifiées pour les rayons lumineux, leur trajectoire s'arrêtera au point B qui sera soit une source de lumière primaire (le soleil ou le ciel) soit un point d'une surface de l'environnement, surface qui est considérée comme une source de lumière secondaire depuis laquelle sont envoyés des rayons additionnels qui suivent le même processus. La trajectoire d'un rayon est stoppée une fois que le nombre de réflexions spécifiées est atteint, qu'il atteint une source de lumière primaire ou que sa puissance tombe sous un seuil prédéterminé. C'est la méthode de lancer de rayons inverse ou *backward raytracing*.

En lancer de rayons inverse, tous les rayons envoyés depuis le point de mesure participent à son illumination avec un poids variable, aucun rayon n'est perdu. En revanche, en lancer de rayon direct, seul une partie des rayons envoyés depuis la source atteint les points de mesure, certains des rayons sont donc envoyés inutilement ce qui n'optimise pas le temps de calcul.

A l'inverse de la radiosité, l'algorithme de lancer de rayon offre la possibilité de simuler des matériaux spéculaires, ce qui participe considérablement à l'aspect réaliste des images générées. Cette spécificité permet également d'évaluer les situations d'éblouissement générées par des reflets sur les surfaces de l'environnement.

Le lancer de rayon inverse est notamment utilisé par le logiciel Radiance⁴.

LE PHOTON MAPPING

Le processus de *photon mapping* est une combinaison des algorithmes de lancer de rayons direct et inverse. Le calcul est réalisé en deux étapes.

Dans la première étape, un calcul de lancer de rayon direct est effectué. Les quantités de lumière reçues par chaque pixel de la scène lors de ce processus sont stockées dans la *photon map*, elles servent ensuite de base à la seconde étape du calcul qui consiste en un lancer de rayons inverse (CSTC, 2011).

Cette méthodologie robuste offre les résultats les plus réalistes, elle est plutôt utilisée dans l'objectif de produire des images photoréalistes. Cette méthode est actuellement en cours d'implémentation dans le logiciel Radiance.

UTILISATION PRATIQUE DES ALGORITHMES

L'utilisation relativement simple de certains logiciels de simulation d'éclairage naturel peut entraîner un manque de remise en question des résultats par leurs utilisateurs. Si un utilisateur comprend mal la logique derrière une simulation d'éclairage et l'influence des divers paramètres de simulation et de modélisation, cela pourra générer une forte incertitude sur la précision des résultats obtenus.

Les paragraphes suivants s'intéressent aux paramètres de simulation de l'algorithme de lancer de rayons. Ils proposent des indications sur leur influence respective ainsi que des recommandations pour déterminer leur valeur optimale.

⁴ <http://radiance-online.org/>

LES PARAMETRES INFLUANT DANS LES SIMULATIONS NUMERIQUES

Pour limiter au maximum les erreurs et augmenter la fiabilité des résultats obtenus par simulation numérique, il est recommandé de respecter plusieurs consignes.

Concernant la modélisation, il est recommandé de :

- **ne modéliser que les surfaces qui ont un impact sur la propagation de la lumière.** Il faut comprendre que plus il y a de surfaces dans un modèle, plus les risques d'erreur sont grands et plus le temps de calcul sera long. Importer un fichier 3D réalisé par un tiers ne générera pas forcément un gain de temps car dans ce cas, il est essentiel de vérifier le modèle importé pour s'assurer de sa cohérence et supprimer les détails inutiles à la propagation de la lumière.
- **ne pas oublier de modéliser l'environnement extérieur.** Il est recommandé de modéliser les obstructions extérieures de la manière la plus simple possible. De simple parallélépipèdes ou surfaces planes pour représenter les obstructions extérieures peuvent convenir dans la plupart des cas. Pour le sol, une dalle de grandes dimensions permettra de contrôler la quantité de lumière réfléchiée par le sol extérieur,
- **penser à attribuer une épaisseur aux surfaces qui présentent des ouvertures sur l'extérieur.** Dans la plupart des logiciels de modélisation, l'épaisseur des murs est considérée nulle par défaut, notamment lorsque le bâtiment est modélisé dans un outil à visée thermique. Or l'épaisseur d'un mur autour d'une fenêtre constitue une obstruction à la pénétration de la lumière naturelle qui peut avoir un impact considérable. Dans un outil de modélisation, il suffira d'extruder le mur autour de l'ouverture pour lui attribuer une épaisseur physique.
- **prendre en considération la proportion de menuiserie d'une fenêtre.** Dans certains cas, la menuiserie d'une fenêtre peut représenter jusqu'à 30% de la surface de l'ouverture. Ignorer cet aspect du bâtiment conduira à une surestimation de l'éclairage naturel. Une menuiserie peut soit être représentée dans le détail (dans le cas de plusieurs battants par exemple) ou bien en supprimant la surface correspondante de l'ouverture pour ne représenter que la surface de vitrage effective.
- **modéliser les protections solaires fixes** qui ont non seulement un impact sur la pénétration du rayonnement solaire direct mais également sur celle de la lumière naturelle diffuse.

Concernant les matériaux, il est recommandé de :

- **vérifier le coefficient de réflexion lumineuse des matériaux** avant de procéder à la simulation, en particulier lorsque le modèle est exporté depuis un outil de modélisation vers un logiciel de simulation d'éclairage.
- **vérifier les propriétés optiques des vitrages** dans le cas d'importation du modèle. Pour les vitrages clairs, il est important de garder en mémoire que les logiciels utilisant la technologie du lancer de rayons considèrent la transmissivité⁵ des vitrages (facteur qui prend en considération la lumière transmise dans toutes les directions) et non la transmission lumineuse (mesure donnée pour une incidence normale) fournie par les fabricants. La conversion se fait en général automatiquement par les logiciels. Attention également aux vitrages spécifiques qui nécessitent une attention particulière dans leur caractérisation, comme par exemple le vitrage diffusant.
- **attribuer des propriétés optiques réalistes aux matériaux de l'environnement extérieur.** Se référer à (ARENE, 2014) pour des exemples.

Concernant les paramètres météorologiques, il est indispensable de veiller à :

- **choisir le type de ciel adapté à la métrique calculée,**
- **spécifier la localisation géographique.**

⁵ Pour plus d'informations, se référer à : <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/ray.html#Materials>

Concernant les paramètres de simulation

Le lecteur qui a travaillé avec un algorithme de lancer de rayons, en particulier Radiance, a pu souvent être amené à se poser des questions sur la signification et l'influence des divers paramètres de simulation.

La section qui suit a pour ambition de définir les principaux paramètres de simulation utilisés par Radiance.

Les valeurs suggérées sont indicatives. Dans certains cas, une valeur inférieure pourra suffire, dans d'autres il conviendra d'utiliser une valeur supérieure. Il est recommandé de tester l'influence des divers paramètres pour chaque scène afin d'améliorer la précision des résultats et optimiser le temps de calcul. Il n'existe malheureusement pas de combinaison de paramètres qui puisse être optimale dans toutes les configurations.

L'algorithme de lancer de rayons utilise le concept dit de « rayons ambiants » illustré par la figure 5. Les rayons ambiants sont des rayons lumineux qui ne sont pas émis par une source de lumière directe (le soleil ou une source d'éclairage électrique) mais par réflexion sur une surface (Compagnon, 1997).

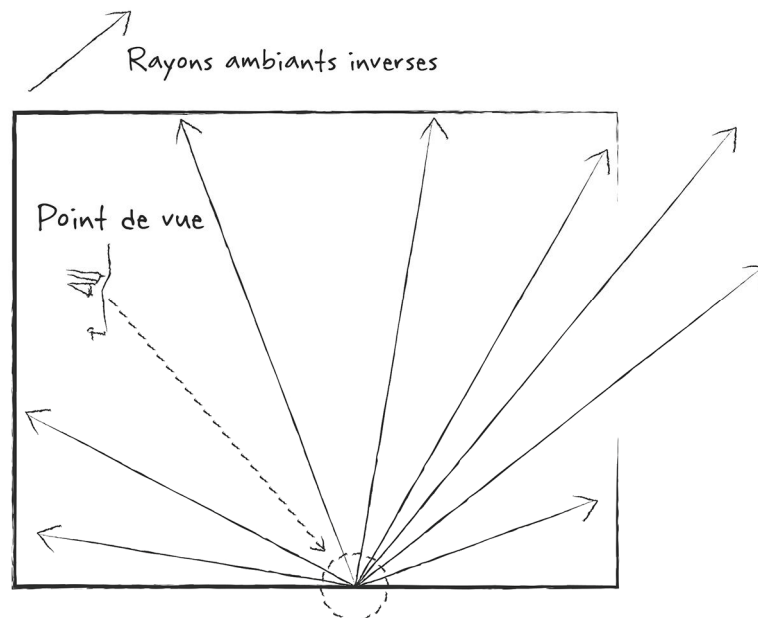


Figure 5 : Rayons ambiants envoyés depuis chaque point de rebond d'un rayon lumineux (source : R. Compagnon)

Paramètre *ab* : *ambient bounces*.

Ce paramètre définit le nombre de rebonds subits par les rayons ambiants.

- $ab = 0$, seul les rayons directs du soleil sont pris en compte. Ces rayons éclairent l'environnement extérieur et certains endroits de l'environnement intérieur.
- $ab = 1$, sont pris en considération la lumière directe du soleil et une réflexion sur l'environnement extérieur ou intérieur ainsi que les rayons provenant de la voûte céleste.
- $ab = 5$, valeur standard spécifiée par défaut dans la plupart des cas. Dans certains cas, comme pour des géométries ou compléments au vitrage complexes, davantage de rebonds pourront être nécessaires pour que chaque rayon inverse atteigne une source de lumière.

Paramètre ad : *ambient divisions*.

Ce paramètre indique le nombre de rayons qui sont envoyés après chaque réflexion d'un rayon ambiant réfléchi (voir Figure 5). Une valeur trop faible peut entraîner des erreurs en fond pièce où les rayons ambiants n'atteindraient pas la source de lumière. Par prudence, une valeur d'au moins $ad = 500$ pourra être spécifiée pour les calculs. Pour les rendus visuels, une valeur supérieure pourra permettre d'obtenir une image plus nette.

Paramètre as : *ambient sampling*

Le paramètre as définit le nombre de rayons ambiants additionnels qui sont envoyés depuis les points situés dans des zones présentant de fortes variations de quantité de lumière. Il est en général recommandé de fixer as à la moitié ou au quart de ad.

Ce paramètre permet d'affiner les résultats dans les zones à fort gradient, par exemple entre la zone d'un local qui reçoit de la lumière directe du ciel et celle qui n'en reçoit pas ou autour d'une ombre créée par un objet. Dans le rendu visuel, ce paramètre a un impact sur la netteté des ombres.

Paramètres ar : *ambient resolution* et aa : *ambient accuracy*

A chaque pixel depuis lequel est envoyé un rayon ambiant, Radiance attache une « sphère d'influence », en d'autres termes une zone d'interpolation. Les points contenus dans ce périmètre sont déterminés par interpolation dans le but de limiter les calculs effectués par l'algorithme. Cette résolution détermine la précision des calculs. Le rayon de chaque sphère d'influence est défini par :

$$R = \text{Max} \times aa / ar$$

Où Max est la plus grande dimension en x, y ou z de la scène

aa et ar sont les valeurs correspondantes de chacun des paramètres.

Lorsque la résolution n'est pas assez fine, trop de valeurs sont déterminées par interpolation ce qui mène souvent à une surestimation des résultats.

Certains lecteurs ont pu être amenés à observer avec frustration que lorsqu'une obstruction de grandes dimensions est ajoutée à une scène, les valeurs du facteur de lumière du jour sont parfois plus élevées que sans obstruction. Ce phénomène est dû au fait que lorsque l'on ajoute une obstruction de grandes dimensions par rapport au local concerné par les calculs, la taille de la sphère d'influence est augmentée et par là même les interpolations. Pour supprimer ce phénomène, il conviendra de réduire aa afin de conserver une taille acceptable de la zone d'interpolation. Cette réduction doit néanmoins se faire dans une certaine limite car diviser aa par deux multiplie par quatre le temps de calcul⁶.

En fonction des détails de la modélisation et du maillage, il semble pertinent de veiller à conserver un rayon de sphère d'influence inférieur à 5 cm pour des locaux de taille standard. Dans des locaux de grandes dimensions, il conviendra de s'assurer que le rayon reste inférieur à la moitié de l'espacement entre les points de la grille de calcul.

Il est recommandé à l'utilisateur novice de tester les paramètres aa et as pour trouver un équilibre entre la précision des résultats et le temps de calcul. Avec l'expérience, la maîtrise de ces paramètres deviendra plus intuitive.

⁶ http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict_options.html

APPRECIATION DE L'INFLUENCE DE CERTAINS PARAMETRES VIA UN EXEMPLE

Etudions à présent une série de tests paramétriques sur un exemple simple. L'objectif est d'apprécier l'effet des hypothèses simplificatrices de modélisation que peut faire un utilisateur ainsi que celui des paramètres de simulation, sur les résultats.

Dans le local de la figure 6 (voir les caractéristiques détaillées en Annexe 1), un utilisateur a pour mission de calculer les indicateurs suivants :

- le facteur de lumière du jour moyen sur un plan de travail situé à 0,7m du sol
- le pourcentage de surface de la grille de calcul où le facteur de lumière du jour est supérieur à 2%,

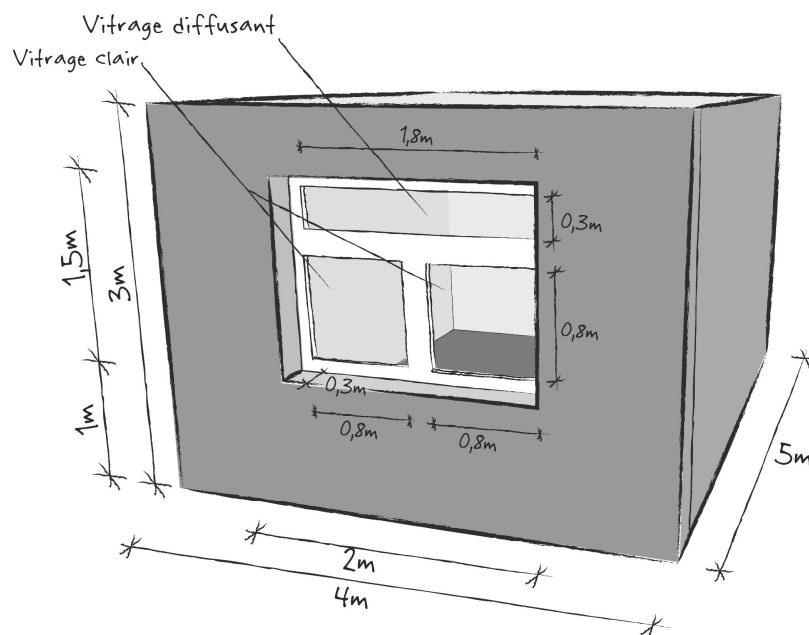


Figure 6 : Local testé

Le local est modélisé avec Ecotect et les simulations d'éclairage sont effectuées avec le programme de lancer de rayons Radiance activé via l'interface DAYSIM⁷. La grille de calcul est de 20cm x 20cm.

INFLUENCE DES PARAMETRES DE MODELISATION

L'utilisateur teste cinq configurations en supprimant une à une les hypothèses simplificatrices de modélisation. Les paramètres de simulation utilisés sont ceux spécifiés par défaut par DAYSIM (voir Annexe 2). Les cinq configurations testées sont les suivantes :

- **Cas 0** : le local est modélisé sans sol extérieur, épaisseur de mur ou menuiserie. Dans un souci de facilité, l'utilisateur choisit d'attribuer au vitrage un coefficient de transmission

⁷ <http://daysim.ning.com/>

lumineuse correspondant à la valeur moyenne pondérée en surface des coefficients de transmission des deux vantaux à vitrage clair (0,8 sur 1,28m²) et de l'imposte à vitrage diffusant (0,5 sur 0,54m²), soit 0,71.

- **Cas 1** : L'utilisateur pose le local du Cas 0 sur une dalle représentant le sol extérieur de dimension 200 m x 200 m et de coefficient de réflexion lumineux égal à 0,2.
- **Cas 2** : L'utilisateur attribue une épaisseur de 30cm au mur de façade du local du Cas 1.
- **Cas 3** : La menuiserie est ajoutée au local du Cas 2 avec son coefficient de réflexion diffuse uniquement.
- **Cas 4** : Les composantes de réflexion spéculaire et de rugosité sont ajoutées à la menuiserie du local du Cas 3.
- **Cas 5** : Les propriétés photométriques des vitrages du Cas 4 sont remplacées par les propriétés réelles. Le vitrage des deux vantaux est modélisé comme clair avec une transmission lumineuse de 0,8 et celui de l'imposte comme diffusant avec une transmission lumineuse de 0,5.

Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau 1.

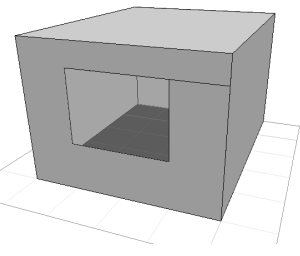
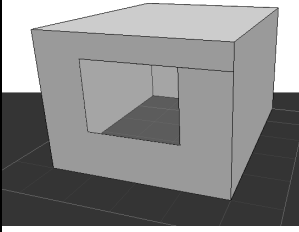
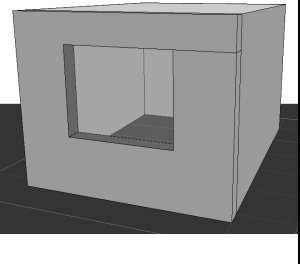
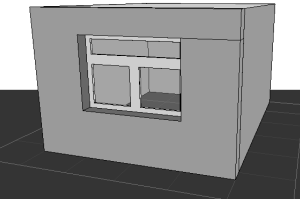
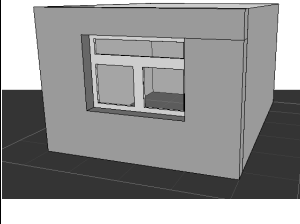
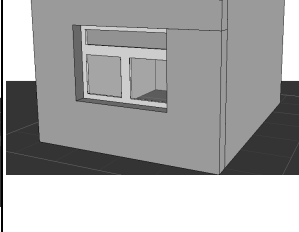
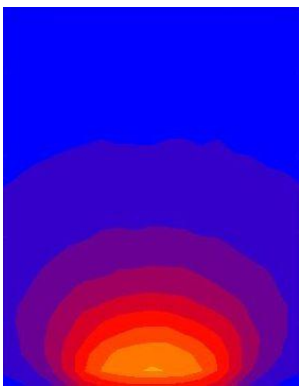
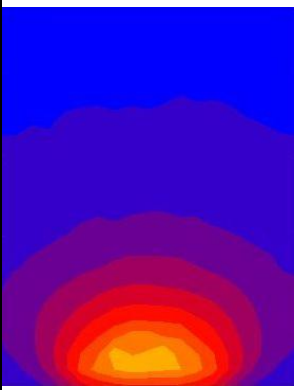
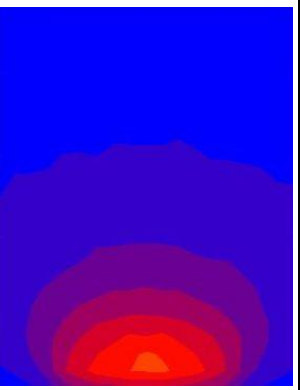
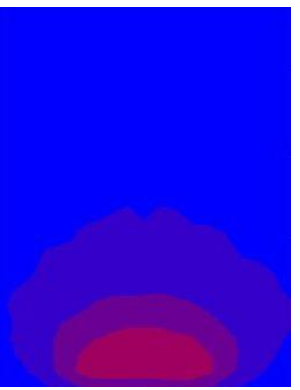
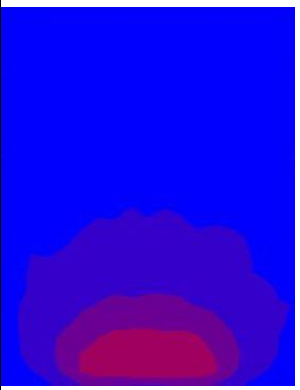
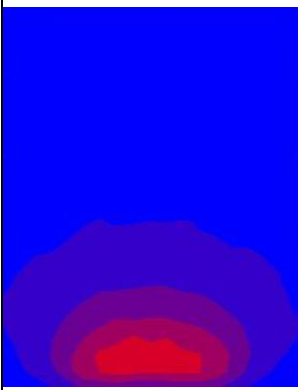
	Cas 0	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Echelle
Modèle							
FLJ							% 20.0+ 18.0 16.0 14.0 12.0 10.0 8.0 6.0 4.0 2.0 0.0
FLJ _{moyen} (%)	3,8	4,3	3,3	2,1	2	2,2	
Pourcentage de surface du plan utile avec FLJ>2% (%)	59,6	78,8	57	33,3	32	33,6	

Tableau 1 : Résultats des simulations pour les cinq cas modélisés

INFLUENCE DES PARAMETRES DE SIMULATION

La modélisation du Cas 5 est à présent proche de la description de départ. L'utilisateur souhaite maintenant tester l'influence des paramètres de simulation sur les résultats en les faisant varier un à un afin de trouver leurs valeurs optimales.

Les résultats sont fournis sous forme de diagramme représentant la répartition du facteur de lumière du jour sur l'axe médian perpendiculaire à la fenêtre en fonction de la distance à la fenêtre.

Paramètre ab

Un test de l'impact du nombre de rebonds des rayons ambiants (ab) fournit les résultats attendus. Plus le nombre de rebonds augmente, plus les valeurs convergent, comme indiqué sur la figure 7. Le temps de calcul est multiplié par deux lorsque l'on double ab⁸.

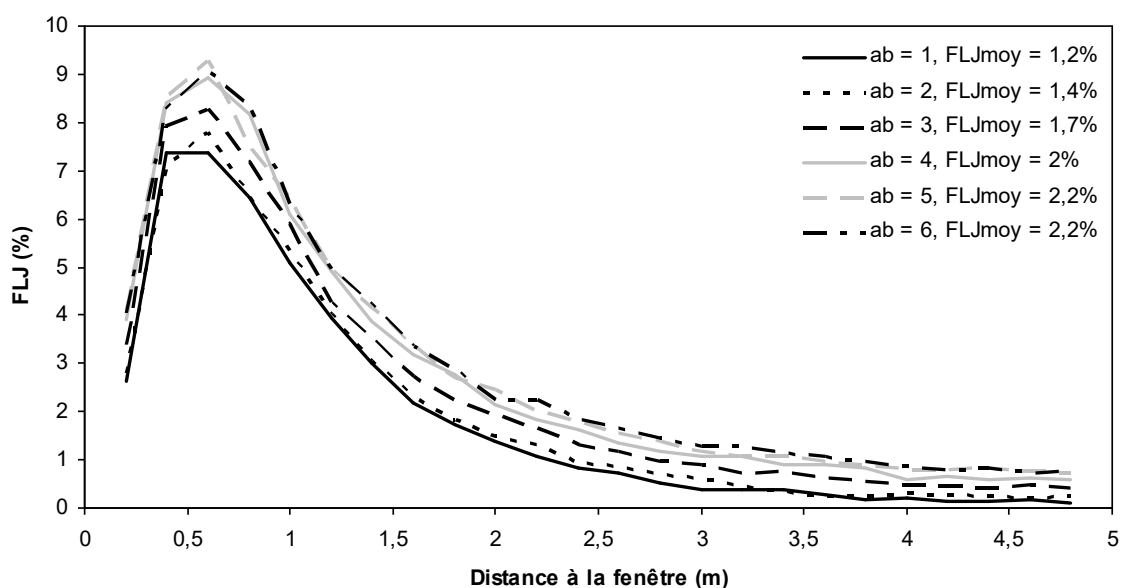


Figure 7 : Impact du nombre de rebonds ambiants sur le facteur de lumière du jour.

Pour notre exemple, les facteurs de lumière du jour convergent à partir de ab = 5. En dessous, le nombre de rebonds est trop restreint et une quantité significative n'atteint pas le ciel avant la fin de leur course. Ce qui amène à une sous-évaluation du facteur de lumière du jour.

Paramètre ad

A la suite du test précédent, l'utilisateur conserve le paramètre ab = 5. Il décide ensuite de tester le paramètre ad, qui dicte le nombre de rayons ambiants qui sont envoyés à chaque rebond. Il réalise les tests présentés sur la figure 8.

⁸ http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict_options.html

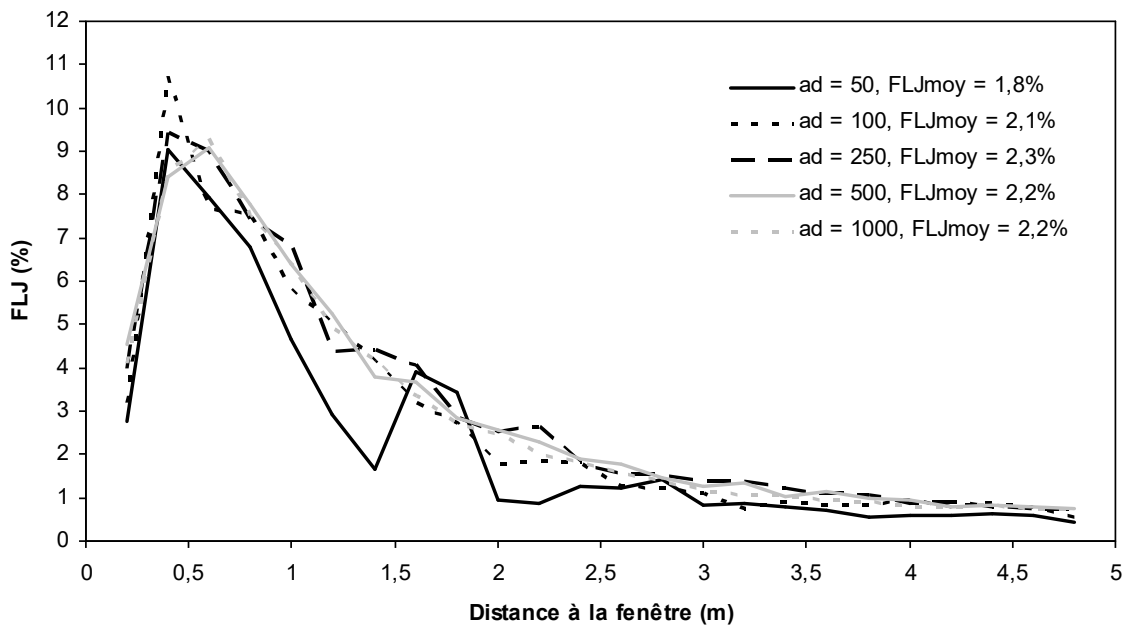


Figure 8 : Impact du nombre de rayons ambiants envoyés à chaque rebond sur le facteur de lumière du jour.

On observe qu'en dessous de $ad = 500$, soit 500 rayons ambiants envoyés à chaque rebond, l'évolution du facteur de lumière du jour subit de fortes discontinuités. Cela est dû au fait qu'en dessous de ce seuil, trop peu de rayons ambiants sont envoyés à chaque rebond pour caractériser efficacement l'éclairement global en chaque point. Par ailleurs, le temps de calcul est doublé lorsque ad est multiplié par deux⁹.

Paramètre as

L'utilisateur décide de conserver la valeur de $ad = 1000$ et teste ensuite l'influence du paramètre as . Il définit le nombre de rayons ambiants supplémentaires qui sont envoyés à chaque rebond dans les zones présentant de fortes variations d'éclairement. Les résultats des tests sont présentés sur la figure 9.

⁹ http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict_options.html

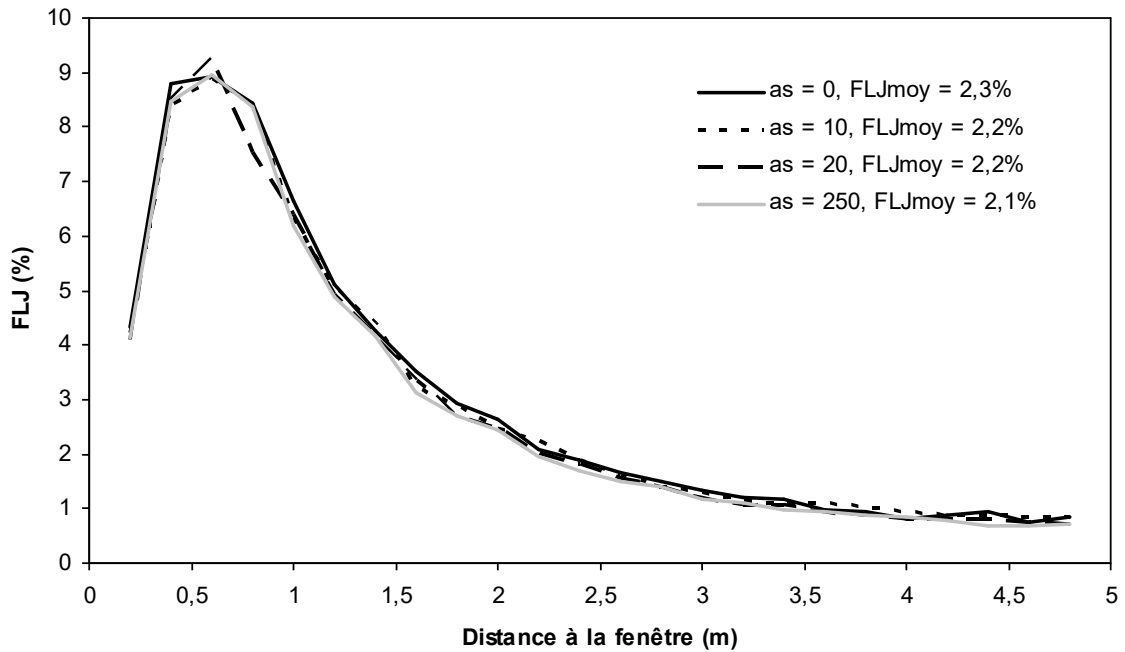


Figure 9 : Impact du paramètre as sur le facteur de lumière du jour

L'utilisateur constate que le paramètre as semble avoir peu d'impact sur le facteur de lumière du jour pour la configuration de local testée et conserve la valeur de $as = 20$, spécifiée par défaut par DAYSIM. Dans un tel exemple où le ciel est couvert, peu de zones nécessitent d'être échantillonnées avec des rayons ambiants supplémentaires, c'est la raison de ce faible impact. En revanche, dans un calcul d'autonomie lumineuse, qui utilise également des ciels ensoleillés qui vont générer de forts gradients d'éclairement autour des taches solaires, ce paramètre aura plus d'influence.

Paramètres aa & ar

L'utilisateur décide ensuite de tester l'impact des paramètres aa et ar . L'utilisateur fait varier aa , les résultats sont présentés sur la figure 10.

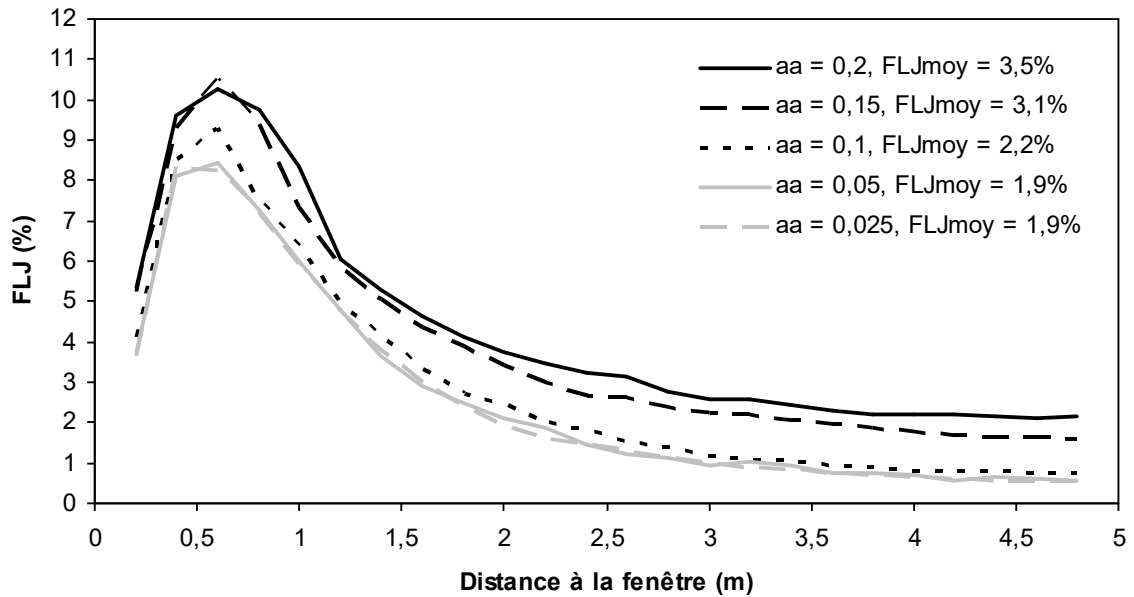


Figure 10 : Influence du paramètre aa sur le facteur de lumière du jour

L'utilisateur constate que plus aa diminue, plus les valeurs du facteur de lumière du jour convergent et plus le temps de calcul augmente considérablement. Rappelons que diviser aa par deux multiplie par quatre le temps de calcul¹⁰. Les valeurs convergent à partir de aa = 0,1 et la variation du facteur de lumière du jour est très similaire pour aa = 0,05 et aa = 0,025. Nous pouvons en déduire que, pour les cinq modélisations testées, la valeur de aa = 0,1 (valeur par défaut de DAYSIM) était un peu trop élevée et les résultats étaient donc légèrement surestimés.

Rappelons que aa et ar sont liés entre eux et déterminent la zone d'interpolation autour de chaque rebond ambiant. Le rayon de la sphère d'interpolation est donné par $\text{Max} \times \text{aa} / \text{ar}$ ou Max est la plus grande dimension de la scène. Dans notre exemple, Max est donné par la diagonale de la dalle de sol extérieur de 200m x 200m, soit Max = 282m. Le rayon R de la sphère d'interpolation est calculé pour chaque valeur de aa (ar reste constant et égal à 300) dans le tableau 2.

aa	R (cm)
0,2	18,8
0,15	14,1
0,1	9,4
0,05	4,7
0,025	2,4

Tableau 2 : variation du rayon de la sphère d'influence en fonction de aa pour ar = 300

¹⁰ http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict_options.html

Suite au test paramétrique et comme le plus petit détail de la scène est de 5cm (épaisseur de la menuiserie), l'utilisateur décide d'attribuer à aa la valeur de 0,05 et de laisser $ar = 300$.

Attardons-nous sur ce phénomène pour lui trouver une explication. Lorsque $aa = 0$, cela signifie qu'il y aura un lancer de rayons ambiants à chaque rebond (au prix d'un temps de calcul très long). Si aa est supérieur à 0, le logiciel cherchera dans un premier temps à faire une interpolation avec les valeurs d'éclairéments ambiants stockés dans le périmètre délimité par la sphère d'influence si ces valeurs ne diffèrent pas trop entre elles. Dans le cas contraire, le programme va quand même lancer des rayons ambiants pour le point de rebond considéré. Le paramètre aa est un indicateur de la différence relative tolérée entre les valeurs d'éclairément ambiant calculées à proximité du point de rebond (i.e. dans le périmètre délimité par la sphère d'influence). Par conséquent, et même si le rayon de la sphère d'influence peut être ajusté en modifiant aa et ar , il est préférable de chercher à diminuer aa plutôt que d'augmenter ar si l'on souhaite privilégier la précision.

MODELISATION ET PARAMETRAGE OPTIMAUX

Des tests paramétriques effectués par notre utilisateur, nous pouvons conclure que pour optimiser les calculs dans le local considéré :

- Une modélisation précise du local est nécessaire, la modélisation optimale est donc celle du cas 5. Les propriétés de specularité et rugosité de la menuiserie (cas 4) n'ont pas d'impact significatif et pourraient être ignorées dans cette configuration.
- Une dalle de sol extérieur de 200m x 200m semble excessive, on modélisera une dalle de 50m x 50m.
- 5 rebonds ambiants peuvent être programmés ($ab = 5$).
- On conservera les valeurs par défaut de DAYSIM : $as = 20$, $ar = 300$ et $ad = 1000$. Notons qu'une valeur de $ad = 500$ fournirait un résultat acceptable dans un temps de calcul réduit de moitié.
- Si l'on diminue la taille de la dalle de sol extérieur, on pourra en faire de même avec aa en le fixant à 0,1, valeur par défaut de DAYSIM.

La répartition des facteurs de lumière du jour correspondante est présentée sur la figure 11.

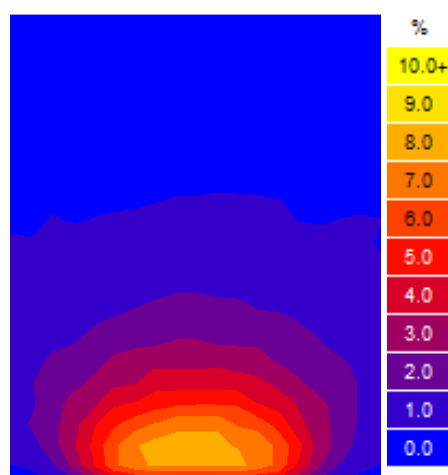


Figure 11 : répartition du facteur de lumière du jour pour les paramètres de modélisation et de simulation optimaux

Le facteur de lumière du jour moyen correspondant est de 1,9% et 27,9% de la surface du plan utile a un facteur de lumière du jour supérieure à 2%.

On constate que la simulation du cas 5 avec les paramètres par défaut de DAYSIM et la dalle de sol extérieur de 200 m x 200 m surestimait les résultats uniquement à cause d'une valeur inadaptée du paramètre aa.

ENSEIGNEMENTS A RETENIR DE CES TESTS PARAMETRIQUES

De manière globale, nous pouvons tirer les enseignements suivants de ces tests paramétriques :

- Omettre de modéliser l'épaisseur de la façade et la menuiserie conduit à une surestimation des résultats, d'environ 50% dans notre exemple
- Quelques tests peuvent être nécessaires avant de trouver la combinaison optimale des paramètres de simulation. L'expérience permettra d'acquérir une approche plus intuitive du paramétrage.
- Veiller à spécifier un nombre de rebonds ambiants (ab) ainsi qu'un nombre de rayons ambiants (ad) suffisants et adaptés à la géométrie du local modélisé.
- Il est essentiel de veiller à ce que la dimension maximale de la scène modélisée (taille maximale du bâtiment, de la dalle de sol extérieur ou d'une obstruction) n'impacte pas de manière importante sur le rayon de la zone d'interpolation en contrôlant les paramètres aa et ar.

Ces quelques conseils pourront guider l'utilisateur dans ses simulations et l'inviter à expérimenter pour se constituer sa propre manière de les aborder. L'auteur souhaite par ailleurs insister sur le fait que les recommandations développées dans ce chapitre sont bien des recommandations et non des règles.

QUID DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Pour effectuer des simulations d'éclairage électrique, les algorithmes de radiosité et lancer de rayons présentés ici sont également utilisés. Dans ce cas, la source d'éclairage sera caractérisée par la répartition spatiale de la lumière qu'elle émet dans toutes les directions, autrement appelée la courbe de répartition des intensités lumineuses.

Les fabricants d'appareils d'éclairage électrique mettent à disposition des fichiers informatiques contenant ces informations. Ces fichiers sont classiquement au format IES (IES, 2008) ou EULUMDAT¹¹ et sont compatibles avec la majorité des logiciels de simulation d'éclairage électrique disponibles sur le marché.

Certains logiciels offrent la possibilité de déterminer les profils d'utilisation de l'éclairage électrique en fonction du mode de contrôle, en prenant en considération les apports d'éclairage naturel. Le contrôle peut être automatisé ou manuel et dans ce cas prendre en considération des profils type d'utilisateurs.

Remerciements

L'auteur remercie Raphaël Compagnon (Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg) ainsi que Sophie Jost et Dominique Dumortier (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat) pour la relecture de ce texte, leurs commentaires et leurs suggestions.

¹¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/EULUMDAT>

RÉFÉRENCES

- (ARENE, 2014) ARENE / ICEB, Guide Bio-Tech Eclairage Naturel, 2014
- (BS, 2008) British Standard, BS 8206-2:2008, Lighting for buildings – Part 2: Code of practice for daylighting
- (Chauvel, 1993) *Evaluation de l'éblouissement dû aux fenêtres, état de la question, 1^{ère} partie*. Chauvel P., Collins J. B., Dogniaux R. LUX, 1983, n°121.
- (CIBSE, 1994) *Code for interior lighting*. CIBSE, London. 1994
- (CIE, 1994) *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, Commission Internationale de l'Eclairage, 1994,
- (CSTC, 2011) Deroisy, B. Deneyer, A. Evaluation de l'éclairage naturel par simulations informatiques, Les Dossiers du CSTC, 2011/3.18
- (Compagnon, 1997) Compagnon R., *RADIANCE: a simulation tool for daylighting systems, Course notes*, University of Cambridge, 1997
- (Hellinga, 2013) Hellinga, H. Daylight and Views, Delft Univeristy, Pays-Bas
- (IES, 2008) Illuminating Engineering Society of America, IESNA Standard File Format for Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information, 2008
- (IES, 2012) Illuminating Engineering Society of America, Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), 2012
- (Leslie, 2012) Leslie RP, et al. Conceptual design metrics for daylighting, Lighting Research & Technology, 2012; 44: 277–290
- [Littlefair, 1986] *Estimating daylight in buildings: Part 2*. Littlefair P.J. BRE Digest 310, 1986.
- (Mardalevic, 2013) Mardalevic, J. and Christoferssen J. *A ROADMAP FOR UPGRADING NATIONAL/EU STANDARDS FOR DAYLIGHT IN BUILDINGS*, CIE Mid-term Meeting, Paris, France 12th–19th April, 2013
- (Moniteur, 2007) *Traité de construction durable*. Bernstein D., Champetier JP., Hamayon L., Mudri L., Traisnel JP., Vidal T. Editions, Le Moniteur, 2007.
- (Moon, 1942) Moon, P & Spencer DE. Illumination from a non-uniform sky, The Illuminating Engineer, 37(10), pp.707-726, 1942.
- (Rea, 1993) *Lighting handbook, reference & application. 8th edition*. New York City: Illuminating Engineering Society of North America, 1993, 989p.
- (Reinhart, 2010) Reinhart, C. Tutorial on the use of Daysim simulations for sustainable design, Harvard University, 2010
- (Reinhart, 2011) Building Performance Simulation for Design and Operation, Daylight Performance Predictions (Chapter 9), Spoon Press, 2011
- (Sutter, 2006) *The use of shading systems in VDU office task office: a pilot study*. Sutter Y., Fontoynt M., Dumortier D. Energy & Building, 2006, 38, pp. 780- 789.

(Tregenza, 1983) Tregenza, PR., Waters, IM. *Daylight Coefficients*, Lighting Research and Technology 15(2): pp. 65-71, 1942.

(Wienold, 2009) *Daylight glare in offices*, Wienold J. Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute, 2009, 136p.

ANNEXE 1

Caractéristiques du local utilisé pour les tests paramétriques

Localisation : Paris, France

Utilisation : 08h – 17h

Orientation : Sud

Profondeur = 5m

Largeur = 4m

Hauteur = 3m

Epaisseur du mur de façade = 30cm

Fenêtre à deux vantaux en vitrage clair et une imposte en vitrage diffusant.

Ouverture en façade : largeur = 2m, hauteur = 1,5m, allège = 1m

Surface de vitrage clair = 2 x 0,8m x 0,8m

Surface de vitrage diffusant = 1,80m x 0,3m

Transmission lumineuse du vitrage clair = 0,8

Transmission lumineuse du vitrage diffusant = 0,5

Largeur de menuiserie autour de chaque partie vitrée = 10cm

Epaisseur de menuiserie = 5cm

Coefficients de réflexion lumineuse diffuse des matériaux :

Sol extérieur = 0,2

Sol intérieur = 0,2

Murs = 0,6

Plafond = 0,8

Dormant de fenêtre = 0,4

Menuiserie en PVC blanc = 0,8 (rugosité = 0,005 et spécularité = 0,05)

ANNEXE 2

Paramètres par défaut de simulation du logiciel DAYSIM

[RADIANCE Simulation Parameters](#)

Please set the RADIANCE Simulation Parameters. The default settings assume a scene complexity of '1' (*see Help >> Tutorial 2.14*).
To reload default values select *Scene Complexity 1*.

ambient bounces (ab)	<input type="text" value="5"/>	specular jitter (sj)	<input type="text" value="1.0000"/>
ambient divisions (ad)	<input type="text" value="1000"/>	limit weight (lw)	<input type="text" value="0.004000"/>
ambient super-samples (as)	<input type="text" value="20"/>	direct jitter (dj)	<input type="text" value="0.0000"/>
ambient resolution (ar)	<input type="text" value="300"/>	direct sampling (ds)	<input type="text" value="0.200"/>
ambient accuracy (aa)	<input type="text" value="0.1"/>	direct relays (dr)	<input type="text" value="2"/>
limit reflection (lr)	<input type="text" value="6"/>	direct pretest density (dp)	<input type="text" value="512"/>
specular threshold (st)	<input type="text" value="0.1500"/>		