
Modélisation de l'éclairage naturel dans les premières étapes d'un projet d'aménagement

R. Nahon¹; B. Beckers²; O. Blanpain³

¹Université de Lille 1, Cité Scientifique 59655 Villeneuve d'Ascq, France, mail : raphael.nahon@ed.univ-lille1.fr

²Université de Technologie de Compiègne (UTC), Rue du Dr Schweitzer, 60200 Compiègne, France, mail : benoit.beckers@utc.fr

³Université de Lille 1, Cité Scientifique 59655 Villeneuve d'Ascq, France, mail : olivier.blanpain@univ-lille1.fr

RÉSUMÉ.

Les principaux volumes, la morphologie d'un projet d'aménagement urbain sont définis dans le plan masse. La connaissance du projet y est encore faible : le positionnement et la forme des fenêtres, le cloisonnement intérieur notamment restent à définir. [NAH 2015] montrent l'impact de ces paramètres sur l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments ; comment donc l'étudier quand la réflexion se porte sur la géométrie extérieure du projet ? L'objectif de cet article est d'établir un lien entre l'ensoleillement de l'enveloppe et les conditions d'éclairage naturel à l'intérieur des locaux afin de permettre la prise en compte de cet aspect dès l'étape du plan masse. [NAB 2005] et [REI 2011] proposent respectivement le 'Useful Daylight Indicator' (UDI) et le 'Daylight Autonomy' (DA) pour la caractérisation des conditions d'éclairage naturel dans un intérieur. Nous tentons d'établir un lien entre l'éclairement des façades et ces deux indicateurs. Nous étudions un immeuble de bureau type dans un environnement dégagé. Nous identifions pour différentes orientations les conditions d'éclairement des façades permettant un niveau d'éclairement suffisant tout en évitant l'éblouissement.

ABSTRACT.

The main volumes of an urban project are represented in the mass plan. At this stage, architectural details such as windows shape and position or walls covering are still to be defined. [NAH 2015] shows the impact of such parameters on the daylight conditions in an interior: how can we take this aspect into consideration when the reflection lays on the exterior layout? In this article, we link the façade illuminances and the daylight conditions in an interior to allow its evaluation as soon as in the mass plan. [NAB 2005] and [REI 2011] propose respectively the 'Useful Daylight Indicator' (UDI) and the 'Daylight Autonomy' (DA) for the evaluation of daylight conditions in an interior. We establish a link between the façade illuminance and those two indicators. We study a typical office building in an open environment. We identify for different orientations the range of exterior luminances which allow achieving a sufficient level of illuminance in an interior while preventing glare.

MOTS-CLÉS : éclairage naturel, aménagement urbain, modèle de ciel.

KEY WORDS: daylighting, urban planning, sky model.

1. Introduction

La lumière naturelle a pour sources principales le soleil (direct) et la voûte céleste (diffus). [BEC 2009] montre comment le *sky factor*, rapport de l'angle solide du ciel visible sur celui de la voûte complète, permet la prise en compte de la lumière diffuse dans la conception architecturale. Un autre indicateur statique, le *daylight factor*, défini comme le rapport des illuminances entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment sous le ciel couvert de la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), reste aujourd'hui le plus utilisé pour la caractérisation de l'accès à la lumière naturelle dans un intérieur.

La lumière n'est cependant pas répartie de façon uniforme sur la voûte céleste et dépend fortement de la position du soleil et du couvert nuageux. [PER 93] proposent un modèle permettant d'estimer pour un lieu donné la luminance des différentes régions du ciel sur un pas de temps horaire. [NAB 2005] et [REI 2011] montrent la nécessité de recourir à des indicateurs dynamiques, s'appuyant sur ces répartitions. Ils proposent respectivement le *Useful Daylight Indicator* (UDI) et le *Daylight Autonomy* (DA), qui ont pour finalité la caractérisation de l'autonomie en éclairage naturel : « le pourcentage des heures de l'année au cours desquelles l'éclairage naturel seul permet un niveau d'éclairement suffisant ». Ces deux indicateurs diffèrent notamment par les seuils de perception et la caractérisation de l'éblouissement.

[REI 2011] s'appuient sur les normes en vigueur pour l'éclairage artificiel et considèrent un seuil de perception de 500 lux. L'éblouissement est pris en compte à travers le calcul du *Daylight Glare Probability* (DGP) sur la zone de travail, qui conditionne l'ouverture et la fermeture des protections solaires. Le DGP traduit la probabilité pour un usager d'être ébloui. Le DA correspond donc au pourcentage d'heures de la journée avec un niveau d'éclairement sur le plan de travail supérieur à 500 lux et un DGP inférieur à 40%. [NAB 2005] retiennent un seuil de 100 lux, considérant que l'être humain tolère des niveaux d'éclairement plus bas en cas de lumière naturelle. L'éblouissement est caractérisé par un niveau d'éclairement supérieur à 2000 lux sur un plan horizontal. L'UDI correspond donc au pourcentage d'heures de la journée avec un niveau d'éclairement sur un plan horizontal compris entre 100 et 2000 lux.

L'IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) s'est inspirée de ces indicateurs pour le développement du *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) et de l'*Annual Sun Exposure* (ASE), repris dans les critères de certification LEEDv4 (Leadership in Energy and Environmental Design, 2013). Le sDA est défini comme le pourcentage de la surface plancher avec un niveau d'éclairement compris entre 300 et 3000 lux au moins 50% de l'année. L'ASE est défini comme le pourcentage de la surface plancher recevant plus de 1000 lux durant au moins 250 heures au cours de l'année. Un bâtiment sera crédité de 2 points si le sDA est obtenu sur au moins 50% de la surface plancher, de 3 points sur 75%. L'ASE doit être limité à 10% de la surface plancher.

Un projet d'aménagement se structure en trois parties, caractérisées chacune par un niveau de détail et de connaissance du projet : le plan guide, le plan masse et le plan d'ilots. Les différents éléments du programme urbain sont répartis en 2D sur la zone d'aménagement dans le plan guide. Les volumes apparaissent avec le plan masse, étape clé au regard des conditions d'accès à l'éclairage naturel. Les détails architecturaux sont introduits au plan d'ilots. Au plan masse, la réflexion se porte sur la géométrie extérieure du projet urbain. La forme et la position des fenêtres, le type de protections solaires, la profondeur des locaux attenants aux façades extérieures restent à définir. [NAH 2015] soulignent l'impact de ces variables de conception sur l'UDI et le DA; il apparaît donc difficile de recourir à ces indicateurs dès le plan masse. La conduite d'entretiens auprès de professionnels des métiers de l'aménagement a toutefois révélé que ces variables sont conditionnées par l'usage et le niveau de performance ciblé des bâtiments du projet. Il est donc possible d'émettre des hypothèses sur l'intérieur d'un bâtiment en fonction de son usage, d'imaginer un local type pour chaque cas.

[MOT 2015] étudient l'influence du positionnement du capteur sur le DGP pour la caractérisation de l'éblouissement ; ils montrent qu'un déplacement de 30cm ou une inclinaison de 30° engendrent un écart de plus de 30% sur le résultat obtenu. A l'étape du plan masse, l'incertitude est grande sur le positionnement de la zone de travail et le recours à un tel indicateur doit donc être écarté. Dans le travail ici présenté, nous considérons 'utiles' des niveaux d'éclairement compris entre 300 lux et 2000 lux, d'une part parce qu'ils correspondent aux arguments les plus convaincants dans les sources précédemment citées, d'autre part parce qu'ils se sont montrés les plus discriminants dans les études que nous avons réalisées. On note $UDI_{300-2000}$ la part d'une année avec un niveau d'éclairement utile.

Nous nous intéressons dans cet article à un immeuble de bureau, du fait de son occupation journalière. Nous construisons un intérieur type propre à cet usage. Nous analysons l'évolution du *facteur de vue du ciel* (SVF) afin d'identifier les plages de luminance permettant un niveau d'éclairement suffisant tout en évitant l'éblouissement. L'idée est ici d'identifier pour un intérieur donné les régions du ciel les plus favorables à

l'éclairage naturel au cours d'une année. L'objectif final est la définition d'un *facteur de ciel utile* depuis les façades, à même de guider les architectes urbanistes dans la recherche de formes urbaines favorables à l'éclairage naturel à l'intérieur des locaux, au moment de la réflexion sur la géométrie extérieure du projet.

2. Répartition de la lumière naturelle sur la voûte céleste

La répartition de la lumière sur la voûte céleste dépend de la position du soleil et du couvert nuageux. Ce dernier varie considérablement au cours d'une année. Nous l'analysons pour la ville de Paris en comparant l'irradiance directe mesurée avec celle théorique par temps clair, calculée suivant le modèle de [LIU 1960] pour une transmittance de l'atmosphère constante de 0,7 (cf. Figure 1). Nous utilisons le fichier de données climatiques de la ville de Paris, disponible sur le site <https://energyplus.net>. Au cours d'une année, 70% du rayonnement direct du soleil est interceptée par les nuages. On en reçoit un minimum de 18% en mars et un maximum de 44% en août.

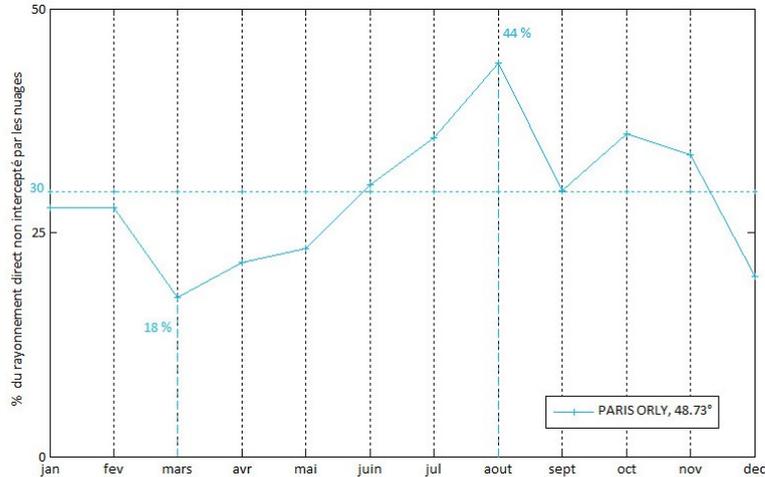


Figure 1. Part du rayonnement direct non-intercepté par les nuages (moyennes mensuelles) – Paris.

Afin de passer des irradiances mesurées [W/m^2] à des niveaux d'éclairement [lux], nous utilisons le modèle d'efficacité lumineuse proposé par [PER 90] qui permet d'estimer un facteur de conversion pour les rayonnements direct et diffus à chaque pas de temps.

Par temps clair, l'essentiel de la lumière est concentré aux alentours du soleil, le reste de la voûte est caractérisé par de faibles luminances et on remarque une bande plus lumineuse à l'horizon. Par temps couvert, la lumière est plus uniformément répartie sur la voûte céleste, avec un gradient fonction de la hauteur zénithale (cf. Figure 2).

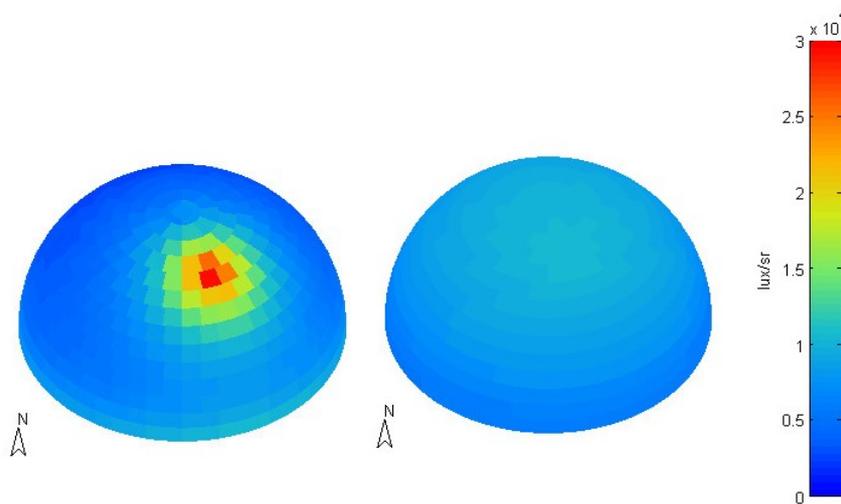


Figure 2. Répartition de la lumière diffuse [lux/sr] sur la voûte céleste par temps clair (gauche) et temps couvert (droite) – Paris (48.73°N), 17 et 25 juin à 13h.

Lorsqu'il est visible, le rayonnement direct est systématiquement source d'éblouissement. Pour la ville de Paris, le soleil n'est visible dans une tuile donnée uniquement pour 1.1% d'une année de travail. Si l'on s'intéresse à la lumière diffuse, on constate une grande disparité dans sa répartition sur la voûte céleste au cours d'une année (cf. Figure 3). La face sud émet considérablement plus de lumière que la face Nord et on note notamment de très fortes luminances le long des trajets solaires. Ces dernières sont souvent sources d'éblouissement, et inversement des luminances trop faibles ne permettent pas d'atteindre un niveau d'éclairage suffisant. Afin d'identifier les régions du ciel les plus favorables à l'éclairage naturel, nous étudions les conditions d'accès à la lumière dans un intérieur.

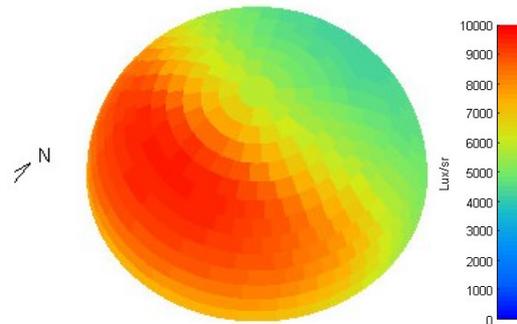


Figure 3. Luminance diffuse moyenne sur les heures de jour de la voûte céleste – Paris (48.73°N).

3. Description du cas d'étude

On choisit d'étudier un intérieur type de bureau individuel, du fait de son occupation journalière et du poids conséquent des consommations d'éclairage pour cet usage. On considère une hauteur sous plafond de 3m, une profondeur de 6 m et une largeur de 3.5 m. Les locaux ont un indice d'ouverture (rapport de la surface vitrée sur la surface plancher) de 25 %, une allège de 1.1 m et une fenêtre de 1.5 m sur toute la largeur du bureau.

La couleur des revêtements intérieurs, le type de protection solaire et le niveau de performance des vitrages influent sur la répartition de la lumière. Afin de limiter l'impact des réflexions intérieures, on considère des coefficients de réflexion standard : 0.2 pour le plancher, 0.7 pour les murs et 0.8 pour les plafonds. Les vitrages ont un facteur de transmission lumineuse de 75%.

Les calculs sont réalisés à partir d'un programme MATLAB développé ad hoc, depuis une grille de capteurs horizontaux placés à 0.8 m du sol, le premier à 25cm de la fenêtre puis espacés de 50 cm (cf. Figure 4).

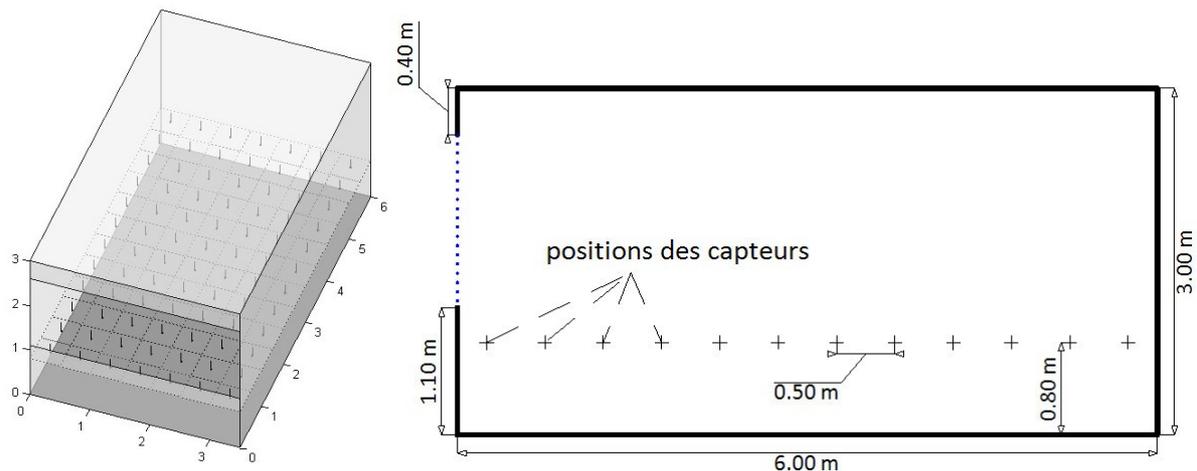


Figure 4. Description du cas d'étude – Bureau individuel.

4. Identification des luminances 'utiles' pour un SVF donné

La voûte céleste est discrétisée en 500 tuiles suivant la méthode de [BEC 2013]. La luminance de chacune d'entre elles est calculée avec un pas de temps de 15 minutes suivant la méthode de [PER 1993]. L'algorithme retenu est basé sur la méthode de la radiosité, les facteurs de formes sont calculés selon la formule de Lambert [BEC 2014].

Nous étudions dans un premier temps l'évolution du SVF à l'intérieur du local (cf. Figure 5). On obtient des valeurs comprises entre 25% à proximité de la fenêtre et 1% au fond du local. La visibilité d'une tuile est établie par un test en son centre : s'il est visible, alors elle l'est entièrement. On note que le SVF diminue rapidement et passe de 25% au bord de la fenêtre à 2.5% à 3.25m de profondeur, puis plus lentement jusqu'à une valeur de 1% au fond du local, avec un comportement plus erratique dû à la discrétisation du ciel.

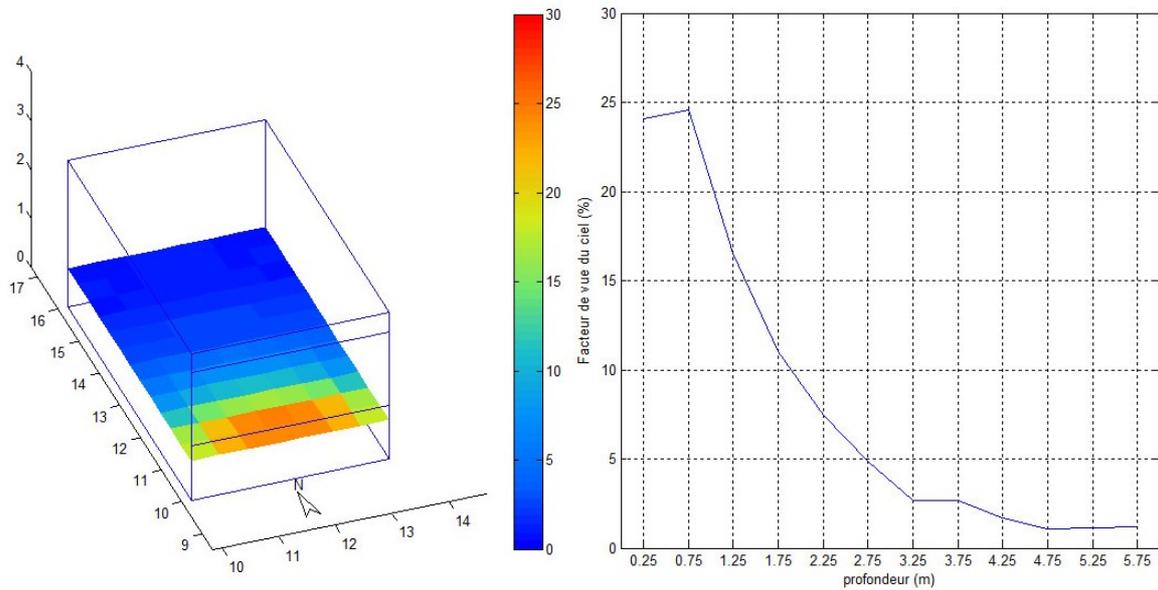


Figure 5. Evolution du SVF, à hauteur du plan de travail et le long de la rangée centrale

Si l'on néglige les réflexions intérieures, le niveau d'éclairage I (lux) sur un point du plan est obtenu suivant la formule [1], avec SVF le facteur de vue du ciel, f_s le facteur de transmission lumineuse du vitrage et L_v la luminance du ciel (lux/sr). On en déduit les valeurs minimales et maximales des luminances permettant un niveau d'éclairage compris entre 300 et 2 000 lux pour un SVF donné.

$$I = SVF \times 2\pi \times f_s \times L_v \quad [1]$$

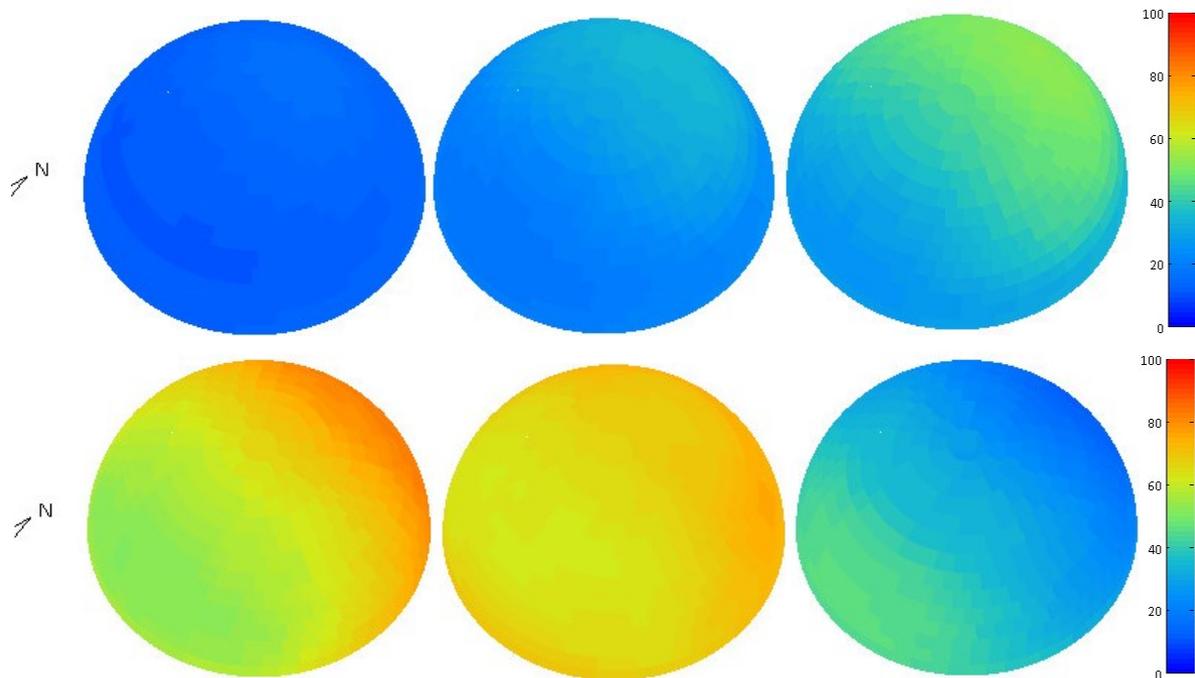


Figure 6. Pourcentage annuel des heures occupées avec une luminance 'utile' pour un SVF donné : en haut, de gauche à droite 25, 15 et 10 % ; en bas, de gauche à droite 5, 3 et 1 %

Nous analysons le pourcentage des heures d'une année de travail, 365 jours par an de 8 à 18h, pour lesquelles les tuiles de ciel ont une luminance favorable pour différents facteurs de vue du ciel (cf. Figure 6). On constate que pour des valeurs supérieures à 10%, l'ensemble de la voûte céleste présente des luminances excessives plus de 50% de l'année, jusqu'à 75% sur sa face Sud; à 5%, les tuiles de ciel ont une luminance utile 80% de l'année au Nord contre 50% au Sud. La face Nord de la voûte céleste, qui émet le moins de lumière au cours d'une année, est donc la plus favorable pour l'éclairage naturel jusqu'à une profondeur de l'ordre de 4 m, soit sur près de deux tiers de la surface plancher. Au fond du local, pour des facteurs de vue du ciel inférieurs à 2.5%, la face Sud permet un niveau d'éclairage suffisant près de 50% du temps contre 25% pour la face Nord.

Nous analysons l' $UDI_{300-2000}$ à hauteur d'un plan de travail à l'intérieur du local (cf. Figure 7) sans prise en compte d'éventuelles protections solaires. Si une orientation Sud permet d'atteindre un niveau d'éclairage de 300 lux plus fréquemment au fond du local, l'écart est négligeable sur près de 75% de la surface plancher. On note par ailleurs un risque d'éblouissement plus de 50% de l'année jusqu'à 2.25 m pour une orientation Sud contre moins de 5% pour une orientation Nord, qui apparaît donc favorable à l'éclairage naturel à l'intérieur du local.

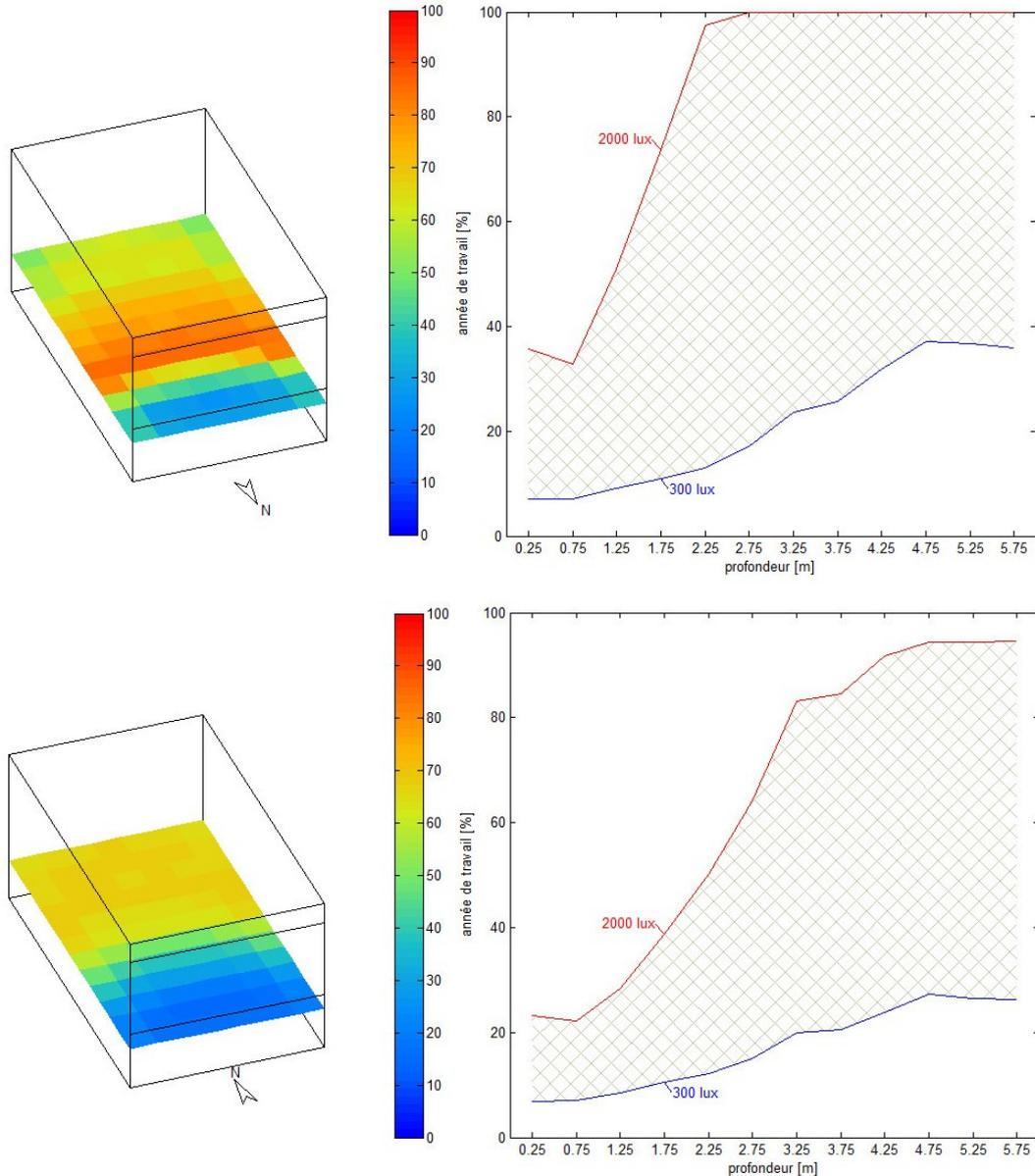


Figure 7. $UDI_{300-2000}$ pour une fenêtre au Nord (en haut) et au Sud (en bas)

Il est donc possible de déterminer de façon qualitative les directions à privilégier pour favoriser l'accès à l'éclairage naturel pour un SVF donné en se basant sur la Figure 6. Afin de véritablement pouvoir guider l'aménageur et l'accompagner dans sa prise de décision, il convient d'établir un lien entre les tuiles de ciel visibles depuis la façade et l' $UDI_{300-2000}$ sur des points stratégiques à l'intérieur du local.

5. Estimation de l' $UDI_{300-2000}$ à l'étape du plan masse

Les locaux tertiaires sont de façon générale découpés en deux bandes de luminaires. Dans la perspective d'études de potentielles économies d'énergie sur l'éclairage artificiel, on découpe donc le local en deux bandes parallèles à la façade extérieure. Dans cette logique, le label LEEDv4 attribue 2 points si les conditions d'éclairage naturel sont jugées satisfaisantes sur 50% de la surface plancher, 3 points sur 75%. On considère des facteurs de vue du ciel de 5 et 2.5% respectivement représentatifs de l'ouverture sur l'extérieur sur 50 et 75% de la surface plancher.

L' $UDI_{300-2000}$ dépend d'une part de la quantité de lumière reçue de l'extérieur, d'autre part des réflexions intérieures. Pour une direction donnée, il est possible d'estimer les tuiles de ciel visibles pour des facteurs de vue du ciel de 5 et 2.5% (cf. Figure 8). On en déduit la contribution de l'extérieur sur 50 et 75% de la surface du local.

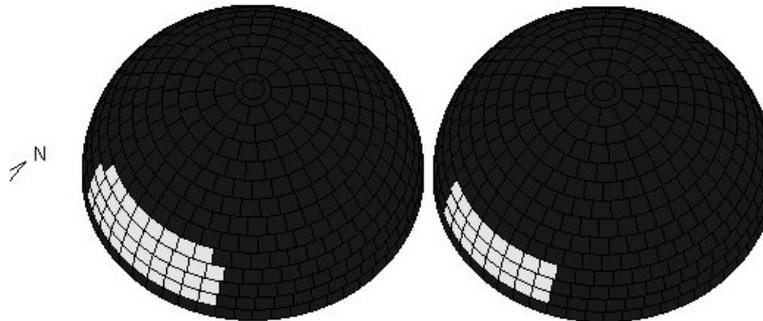


Figure 8. Visibilité des tuiles de ciel pour un SVF de 5% (gauche) et de 2.5% (droite) pour une orientation Sud.

Afin d'estimer la contribution des réflexions intérieures, nous analysons pour des facteurs de vue du ciel de 5 et 2.5% la part d'une année pour laquelle elles permettent d'atteindre le seuil de 300 lux en fonction de l'orientation du local. Cette part dépend notamment de la quantité de lumière qui pénètre à l'intérieur du local à travers la fenêtre et du coefficient de réflexion des parois. Nous avons jusqu'à présent choisi des coefficients de réflexion correspondant à un intérieur standard. Nous étudions l'influence de ce paramètre sur ce résultat. On choisit des intérieurs sombre et clair, tels que définis dans la norme française NBN EN 12464-1 sur la lumière et l'éclairage des lieux de travail (cf. Tableau 1). On étudie pour chacun de ces cas la part d'une année de travail pour laquelle les réflexions intérieures permettent d'atteindre le seuil de 300 lux (cf. Tableau 2).

	Plafond	Murs	Sol
Sombre	0.7	0.5	0.2
Standard	0.8	0.7	0.2
Clair	0.9	0.8	0.4

Tableau 1. Coefficients de réflexions intérieurs des parois, norme NBN EN 12464-1

	Sud		Nord	
SVF	5%	2.5%	5%	2.5%
Sombre	4%	9%	5%	22%
Standard	5%	13%	8%	30%
Clair	8%	17%	11%	37%

Tableau 2. Part d'une année pour laquelle les réflexions intérieures permettent d'atteindre 300 lux

Le type de revêtement intérieur relève du domaine architectural et n'est pas défini au plan masse. L'impact de ce paramètre est cependant déterminant dans l'estimation du poids des réflexions internes sur l'autonomie en éclairage naturel et il est donc difficile de l'estimer dès cette étape. Toutefois, les tests réalisés jusqu'à présent tendent à montrer que le choix de la direction à privilégier n'est pas impacté par les réflexions intérieures et que c'est bien la contribution de l'extérieur qui est déterminante. Afin de fournir une première évaluation de l' $UDI_{300-2000}$ à l'intérieur du local dès l'étape du plan masse, on choisit le cas défavorable pour l'estimation de la contribution des réflexions extérieures, par exemple 4 et 9% respectivement à 5 et 2.5% de vue du ciel pour une façade Sud à Paris.

6. Conclusions et perspectives

Dans cet article, nous montrons qu'il est possible d'identifier les régions du ciel à privilégier pour favoriser l'accès à l'éclairage en des points caractéristiques du local pour un usage donné. Nous montrons notamment que si les réflexions intérieures ont un fort impact sur l'accès à l'éclairage naturel, notamment au fond du local, elles ne sont pas déterminantes dans le choix de l'orientation à privilégier. Il apparaît donc que dans la recherche d'une configuration géométrique de l'urbain optimale au regard de l'accès à la lumière naturelle, la réflexion doit se porter uniquement sur l'environnement extérieur et est donc possible dès l'étape du plan masse.

Les résultats présentés ici sont propres à un usage de bureau ; pour un logement, moins sensible à l'éblouissement, une orientation Sud aurait par exemple été la plus favorable à l'accès à la lumière naturelle. Le recours à des protections solaires a également une influence importante sur les conditions d'éclairage naturel dans un intérieur et il convient de compléter cette étude par une analyse de leur impact sur le résultat obtenu. Le bâtiment est à ce stade placé dans un contexte dégagé. Les auteurs exposeront lors de la présentation orale une étude de l'impact de réflexions extérieures sur les conditions d'accès à l'éclairage naturel dans un intérieur.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'entreprise CDI Technologies qui a en partie financé ces travaux.

8. Références

- [BEC 2009] BECKERS B., 2009. « Geometrical interpretation of sky light in architecture projects ». *Proceedings of CISBAT 2009*, 2-3 septembre 2009, EPFL, Lausanne, Suisse, p. 231-236.
- [BEC 2013] BECKERS, B., BECKERS, P., 2013. « Sky vault partition for computing daylight availability and shortwave energy budget on an urban scale », *Lighting Research & Technology*, vol. 46, 2013, p. 716-728.
- [BEC 2014] BECKERS, B., BECKERS, P., *Reconciliation of Geometry and Perception in Radiation Physics*, London, ISTE WILEY, 2014.
- [LIU 1960] LIU, B., JORDAN, R., « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », *Solar Energy*, vol. 4, 1960, p. 1-19.
- [MOT 2015] MOTAMED, A., DESCHAMPS, L., SCARTEZZINI, J., 2015. « Validation and preliminary experiments of embedded discomfort glare assessment through a novel HDR vision sensor », *Proceedings of CISBAT 2015, Future Buildings and Districts - Sustainability Form Nano to Urban Scale*, 9-11 septembre 2015, EPFL, Lausanne, Suisse, p. 235-240.
- [NAB 2005] NABIL, A., MARDALJEVIC, J., « Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings », *Lighting Research & Technology*, vol. 37, 2005, p. 41-59.
- [NAH 2015] NAHON, R., BESUIEVSKY, G., FERNÁNDEZ, E., BECKERS, B., BLANPAIN, O., 2015. « Exploring metrics on the evaluation of the bioclimatic potential at early stages of urban project », *Proceedings of CISBAT 2015, Future Buildings and Districts - Sustainability Form Nano to Urban Scale*, 9-11 septembre 2015, EPFL, Lausanne, Suisse, p. 883-888.
- [PER 1990] PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J., STEWART, R., « Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance », *Solar Energy*, vol. 44, 1990, p. 271-289.
- [PER 1993] PEREZ, R., SEALS, R., MICHALSKY, J., « To all-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation », *Solar Energy*, vol. 3, 1993, p.235-245.
- [REI 2011] REINHART, C.F., WIENOLD, J., « The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylight spaces ». *Building and Environment*, vol. 46, 2011, p. 86-396.