

Quantification de la lumière naturelle dans les bâtiments urbains

- StreetRad v1 -

Thibaut Vermeulen & Benoit Beckers

Septembre 2011

Note : ce document reprend le rapport rédigé par Thibaut Vermeulen sous le titre « Création d'un modèle d'évaluation de la radiosité en milieu urbain » dans le cadre de son stage de fin d'étude réalisé au sein de l'équipe Avenues-GSU, sous la direction de Benoit Beckers (printemps 2011).

L'objet de ce stage était de développer un logiciel, StreetRad, qui permette le calcul de l'ensemble des réflexions subies par la lumière naturelle à l'intérieur d'une pièce donnant sur une rue, dans la plus simple des configurations possibles, afin de s'en tenir à des méthodes quasi-analytiques de simulation, rapides et faciles à mettre en œuvre.

Le développement de ce logiciel sera poursuivi par d'autres stagiaires. Ce document en décrit la première version, qui pourra déjà être mise à profit par les étudiants en Génie des Systèmes Urbains, afin de se familiariser avec les méthodes de radiosité appliquées à la quantification de l'éclairement naturel.

SOMMAIRE

Introduction.....	4
I. Etat de l'art et introduction au travail de modélisation.....	5
A. Le rayonnement solaire à l'échelle urbaine.....	5
a) Le rayonnement solaire pour l'énergie.....	5
b) Le rayonnement solaire pour la lumière naturelle.....	5
B. Introduction du modèle et choix constructifs.....	7
II. Réalisation d'un outil de modélisation de la radiosité.....	8
A. Description de l'application.....	8
a) Cas urbain.....	8
b) Etapes successives du calcul.....	10
c) Structure de l'application.....	11
B. Méthodes de calcul et hypothèses.....	13
a) Maillage.....	13
b) Facteurs de forme.....	14
c) Modèle de ciel et soleil.....	16
d) Transmittance du vitrage.....	18
e) Calcul des ombres dans la pièce.....	21
f) Equation de la radiosité.....	22
g) Calcul sur capteurs.....	23
III. Exemple d'étude d'un cas urbain.....	25
A. Choix des paramètres.....	25
B. Calcul de la radiosité sur les parois de la pièce.....	26
C. Variations du rayonnement sur une journée.....	32
D. Variations du rayonnement sur l'année.....	34
a) Calcul à heure fixe.....	35
b) Calcul du nombre d'heures sur une journée représentative de chaque mois.....	36
E. Prise en compte des caractéristiques du climat à latitude égale.....	37
Conclusion et perspectives.....	41
Bibliographie.....	42
ANNEXES.....	44

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Organigramme des fonctions successives dans le déroulement d'une simulation.....	12
Figure 2. Maillage de la pièce	13
Figure 3. Maillage de la façade faisant face à la pièce	14
Figure 4 Facteur de forme	14
Figure 5 Modèle de ciel composé du soleil et d'un ciel uniforme.....	16
Figure 6 Rotation du modèle	18
Figure 7. Angles entre la normale à la fenêtre et les droites séparant le point central d'une maille de chaque coin de la fenêtre	20
Figure 8. Transmittance et réflectance d'un vitrage simple de 6mm d'épaisseur	21
Figure 9. Dimensions de la pièce	26
Figure 10. Diagramme des trajets du soleil à Paris (tracé avec Heliodon2)	26
Figure 11. Tracé de l'ombre.....	27
Figure 12. Exemples de valeurs de facteurs de vue du ciel.....	28
Figure 13.Irradiance des parois intérieures de la pièce depuis le soleil, le ciel et la façade extérieure	29
Figure 14. Réflexion du rayonnement provenant de l'extérieur par les parois intérieures.....	30
Figure 15. Solution de l'équation de la radiosité prenant en compte le rayonnement venu de l'extérieur et les réflexions dans la pièce	31
Figure 16. Composante de la radiosité due aux réflexions à l'intérieur seules.....	31
Figure 17. Position des capteurs.....	32
Figure 18. Illuminance sur trois capteurs le 21 décembre et le 21 mars entre 8h et 16h	33
Figure 19. Hauteur de l'ombre et rayonnement du soleil réfléchi par le mur entre 8h et 16h, le 21 décembre et le 21 mars.....	34
Figure 20. Illuminance à 10h, le jour 1 correspond au 1er janvier.....	35
Figure 21 Variation du rayonnement solaire sur le mur extérieur orienté sud	36
Figure 22. Nombre d'heures sur les jours représentatifs de chaque mois entre 8h et 16h.....	37
Figure 23. Coefficients de pondération mensuels du rayonnement du soleil et du ciel pour Ottawa et Limoges.....	38
Figure 24. Rayonnement du soleil et du ciel pondérés pour Ottawa et Limoges sur une surface horizontale en milieu découvert, à midi.....	38
Figure 25. Nombre d'heure avec une illuminance inférieure à 400 lux sur un capteur.....	39

INTRODUCTION

L'éclairage et le chauffage sont des postes importants d'utilisation de l'énergie dans les bâtiments, pour lesquels le rayonnement du soleil et du ciel se trouvent être des sources remarquables et gratuites. L'accès à ces sources est cependant très variable en fonction de la position géographique, de l'environnement urbain (hauteur et forme des bâtiments, largeur des rues) et du climat local. L'étude du rayonnement solaire prend alors tout son sens dans la conception de villes denses.

Lors du stage réalisé au laboratoire AVENUES du Génie des Systèmes Urbains de l'Université de Technologie de Compiègne, un modèle d'évaluation du rayonnement solaire en ville, baptisé StreetRad, a été développé sous Matlab®. Basé sur la méthode de la radiosité, il permet le calcul des réflexions du rayonnement du ciel et du soleil sur les différentes parois composant une scène urbaine. La conception de ce modèle a été menée avec pour objectif d'effectuer des calculs rapides pour pouvoir être utilisé par des étudiants tout en laissant la possibilité de modifier suffisamment de paramètres pour la réalisation d'études intéressantes.

Dans une première partie de ce rapport, un état de l'art ainsi qu'une introduction au modèle sont présentés. Ensuite, le fonctionnement du modèle développé pendant le stage est décrit, et les fonctions de calcul utilisées sont explicitées. Enfin, le dernier chapitre décrit un exemple de calcul du rayonnement solaire appuyé par des résultats du modèle.

I. ETAT DE L'ART ET INTRODUCTION AU TRAVAIL DE MODELISATION

A. LE RAYONNEMENT SOLAIRE A L'ECHELLE URBAINE

L'étude comme la modélisation du rayonnement solaire se décomposent traditionnellement selon deux approches : l'apport de lumière naturelle et l'apport de chaleur.

a) LE RAYONNEMENT SOLAIRE POUR L'ENERGIE

Historiquement, l'apport énergétique du rayonnement solaire est le premier à avoir été traité, en tant que source importante d'énergie dont il faut savoir profiter en hiver et limiter l'impact en été pour éviter les surchauffes. Auparavant restreinte à l'étude de bâtiments isolés, l'étude du rayonnement solaire étendue à l'échelle urbaine s'est développée à partir de la fin des années 1990 (Kämpf 2009). Dans la réglementation thermique française de 2005, ce contexte urbain est défini par les angles d'obstructions dus aux protections solaires et aux autres bâtiments, qui ne sont alors considérés que comme des masques.

Des modélisations thermiques plus poussées existent, avec une définition plus précise du modèle géométrique de la ville, et une prise en compte des réflexions entre les bâtiments (Hénon, et al. 2011). Des travaux sur l'optimisation de la forme des bâtiments en milieu urbain par rapport au rayonnement solaire ont également été réalisés en utilisant Radiance, un programme basé sur la méthode du lancer de rayons, pour le calcul des réflexions (Kämpf 2009).

Enfin, au delà de l'aspect thermique, la modélisation du potentiel solaire urbain, est utile pour calculer le gisement solaire pour l'implantation de panneaux solaires (Mardaljevic et Rylatt 2003).

b) LE RAYONNEMENT SOLAIRE POUR LA LUMIERE NATURELLE

L'étude de la lumière naturelle vise d'une part à limiter le recours à la lumière artificielle en intérieur, d'autre part à garantir un confort visuel aux occupants d'un local avec un d'éclairage suffisant, tout en évitant l'éblouissement. Contrairement à l'aspect énergétique du rayonnement solaire, pour lequel seul le flux entrant dans le bâtiment compte, l'étude de la lumière naturelle requiert de connaître la répartition spatiale du rayonnement. De plus, des puissances même faibles peuvent être perçues par l'œil humain, alors qu'elles seraient négligeables dans un calcul thermique. Des logiciels ont été développés en incluant le calcul de l'éclairage (Dialux, Ecotect), tandis que d'autres se sont spécialisés dans la modélisation de la lumière naturelle (Daysim), notamment en utilisant Radiance pour calculer les réflexions de la lumière sur les parois d'une scène.

A l'heure actuelle, la caractérisation des conditions satisfaisantes d'éclairage pour le confort des usagers d'un local est un question difficile qui fait l'objet d'études basées sur des mesures (Luther 2011). Dans différents pays, des normes existent pour l'éclairage des locaux ; en France, la norme NF EN 12464-1 préconise par exemple une illuminance de 500 lux pour les travaux de lecture/écriture. De plus, des indicateurs généraux permettent de calculer si un local a un bon accès à la lumière naturelle. Parmi ceux-ci, le facteur de lumière du jour, ou *daylight factor*¹, est le plus connu et est

¹ Le facteur de lumière du jour, est un indicateur de l'accès à la lumière naturelle. Il se calcule comme le rapport entre l'illuminance reçue par un point en intérieur (E_i) et un point en milieu dégagé ayant visibilité sur l'ensemble de la voûte céleste (E_o), dans des conditions de ciel couvert (tel que défini par la Commission Internationale de l'Eclairage, ou CIE) : $DF = E_i/E_o * 100\%$

utilisés dans les référentiels de plusieurs certifications (LEED, BREEAM). Des études sont réalisées pour améliorer ces indicateurs (Mardaljevic et Rylatt 2003) tandis que la modélisation de la lumière naturelle utilisant des modèles de ciel se fait plus précise (Walkenhorst, et al. 2002).

c) ENERGIE, LUMIERE, DEUX APPROCHES LIEES

Si les deux approches sont traitées séparément, le lien entre la puissance et l'illuminance du rayonnement solaire sont liés par l'efficacité lumineuse, valeur qui prend en compte le spectre des longueurs d'onde du rayonnement capté par l'œil humain pour convertir la radiance (W) en luminance (lm). Chaque source lumineuse a sa propre efficacité lumineuse en fonction de la correspondance du spectre du flux émis avec le filtre de l'œil humain. Des études existent pour définir les niveaux d'illuminance de la voûte céleste et du soleil selon une distribution angulaire (Perez, Seals et Michalsky 1993) ou selon la période de l'année (Joshi, Sawhney et Buddhi 2007). De là, des valeurs d'efficacité lumineuses moyennes pour le rayonnement direct, diffus et global peuvent être déterminées (Littlefair 1988) (Vartiainen 1999).

d) POSITIONNEMENT DU MODELE STREETRAD

Le modèle StreetRad permet de calculer le rayonnement solaire sur une scène urbaine, avec des résultats initialement calculés en terme de puissance, auxquels une efficacité lumineuse moyenne est appliquée pour des études sur la lumière. Contrairement à la majorité des logiciels existants, la géométrie étudiée dans StreetRad n'est pas libre et dépend d'un certain nombre de paramètres prédéfinis. En revanche, le recours à des calculs analytiques ainsi qu'au découplage de certains calculs réalisés en plusieurs étapes (découplage rendu possible en réfléchissant sur les ordres de grandeurs des résultats de chaque étape de calcul), permet une vitesse de calcul accrue en comparaison aux logiciels basés sur Radiance (Daysim). La création d'un nouveau modèle a également l'avantage de fournir un résultat transparent dans son fonctionnement (formules utilisées, hypothèses) par rapport à des logiciels commerciaux dont le contenu est parfois difficile à analyser (Ecotect).

B. INTRODUCTION DU MODELE ET CHOIX CONSTRUCTIFS

L'objet du stage a été de réaliser un outil d'évaluation de la radiosité à l'échelle urbaine qui puisse servir à des étudiants dans des cours abordant la thermique urbaine. Ce travail s'est fait dans la continuité d'un projet (UV PR) qui a eu lieu le semestre précédent et qui a posé les bases d'un modèle paramétré représentant un intérieur et un extérieur dans une disposition classique en milieu urbain.

La modélisation du rayonnement est complexe car elle repose sur le calcul d'un équilibre : lorsqu'une source émet un rayonnement, celui-ci touchera des objets. Ces objets réfléchiront à leur tour une partie du flux reçu, et ainsi de suite. Finalement, chaque objet reçoit un rayonnement en provenance de tous les objets qu'il voit et réémet une partie du rayonnement reçu vers ces même objets.

Le calcul de cet équilibre – et les méthodes employées pour y parvenir – est le point crucial de la modélisation : un calcul radiatif sur une scène, prenant en compte des réflexions sur les parois qui la composent, demande très rapidement une puissance de calcul et un temps conséquents. Or seuls des modèles permettant des calculs rapides sont valables à l'échelle d'un cours donné à des étudiants. L'intérêt didactique vient ainsi de la possibilité d'effectuer divers essais afin de pouvoir prendre connaissance du comportement des échanges radiatifs.

Il a alors été important de trouver un compromis dans la création du modèle entre le temps de calcul, la précision des résultats et la liberté donnée dans les paramètres du modèle. A la fin de l'UV PR, le choix s'était porté sur une géométrie urbaine reposant sur un nombre limité de paramètres ; celle-ci représentait une pièce rectangulaire vide possédant une unique fenêtre orientée au nord par laquelle le soleil n'entrait jamais. Face à cette fenêtre, de l'autre côté d'une rue, la façade d'un autre bâtiment réfléchissait une partie de l'énergie du soleil dans la pièce.

Au commencement du stage, il a été nécessaire de définir si le nouveau modèle partirait vers des géométries plus libres (possibilité de « dessiner » son modèle) en gardant certaines méthodes de calcul ou garderait la même base pour être amélioré. C'est vers cette seconde solution que le projet s'est orienté, car il s'est vite avéré que des méthodes numériques permettant des géométries plus libres (comme le lancer de rayon), nécessitent des temps de calculs nettement plus importants. La période du stage a donc été un développement de la base établie précédemment en ajoutant des possibilités géométriques (plus de fenêtres, orientation du modèle), et en approfondissant les méthodes de calcul, de manière à rendre le modèle suffisamment souple pour le rendre utile à des études pertinentes.

La programmation du modèle est faite sous Matlab® qui permet une représentation facile des résultats. Aucune interface n'a été prévue pour l'utilisateur. Au contraire, la saisie des paramètres est située dans le fichier Matlab® qui comporte l'ensemble de la structure du programme. Bien qu'éventuellement moins attrayante (en fonction des goûts), cette présentation a l'avantage de pouvoir incorporer facilement des boucles dans l'application pour balayer une série de valeurs (modification de la géométrie, de la date et de l'heure du calcul, etc.). L'utilisation du modèle nécessitera pour cela une connaissance basique du langage Matlab® par les utilisateurs qui souhaitent aller au-delà d'un simple calcul.

II. REALISATION D'UN OUTIL DE MODELISATION DE LA RADIOSITE

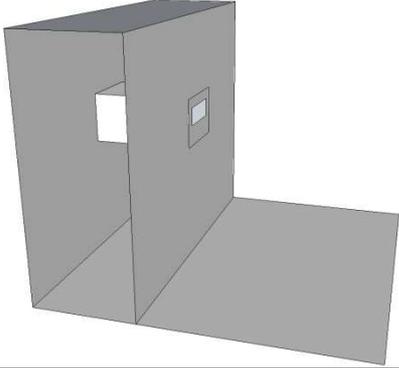
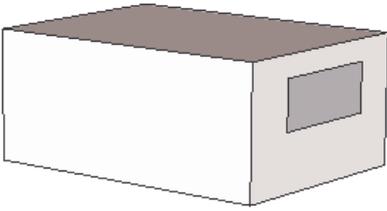
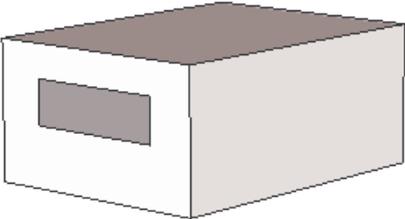
Dans cette partie, le modèle de calcul de la radiosité dans une scène urbaine est présenté. Dans un premier temps les fonctionnalités générales sont définies, puis la structure du programme est décrite avant de finir sur l'explicitation des fonctions de calcul.

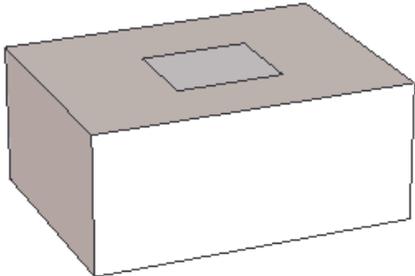
A. DESCRIPTION DE L'APPLICATION

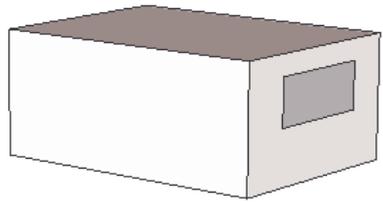
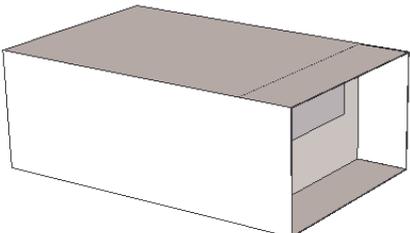
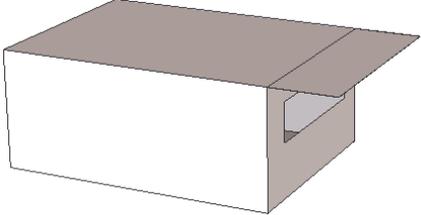
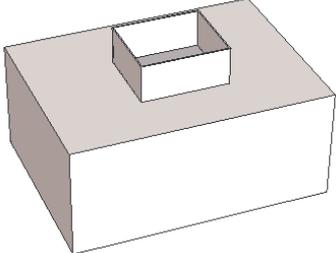
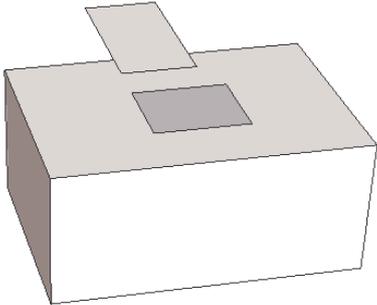
a) CAS URBAIN

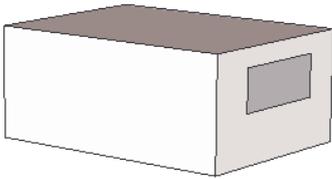
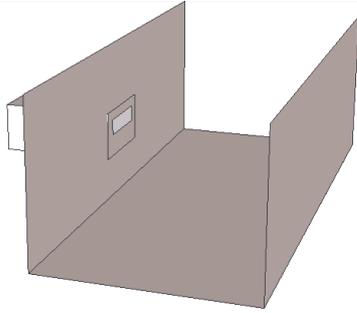
L'application décrit un cas urbain simple composé d'une pièce rectangulaire donnant sur une rue considérée par hypothèse de longueur infinie. Un mur, de l'autre côté de la rue, réfléchit une partie de l'énergie du ciel et du soleil vers l'intérieur de la pièce. Le modèle est entièrement défini par les paramètres de la pièce et de la rue.

Les différentes dispositions possibles pour le modèle sont résumées ci-dessous.

<p>Pièce La pièce se définit comme un pavé vide inclut dans un bâtiment filant le long d'une rue de longueur supposée infinie (barre d'immeuble par exemple).</p>	
<p>Paramètres géométriques :</p> <ul style="list-style-type: none"> - dimensions (largeur, longueur, hauteur) ; - hauteur de la pièce par rapport au sol ; - hauteur de la façade au-dessus du plafond de la pièce. <p>Paramètres géographiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> - latitude - altitude 	
<p>Fenêtres Trois fenêtres sont possibles simultanément : une sur la face nord, une sur la face sud et une sur la face zénithale</p>	
<p>N : Fenêtre au nord</p> <p>Paramètres : dimensions et position sur la face</p>	
<p>S : Fenêtre au sud</p> <p>Paramètres : dimensions et position sur la face</p>	

<p>Z : Fenêtre zénithale</p> <p>Paramètres : dimensions et position sur la face</p>	
---	--

<p>Protections solaires</p> <p>Pour le Nord et le Sud, choix entre une des trois propositions présentées ci-dessous (P0, P1 et P2)</p> <p>Pour la fenêtre zénithale, possibilité de cumul des deux protections PAz1 et PAz2.</p>	
<p>(N, S) P0 : pas de protection solaire</p>	
<p>(N, S) P1 : façade enfoncée dans le bâtiment (réduction de la surface). Induit une protection solaire autour de la face enfoncée de la longueur du décalage.</p> <p>Paramètre : taille du décalage de la façade</p>	
<p>(N, S) P2 : casquette au niveau du plafond de la pièce.</p> <p>La casquette est infinie dans la largeur (filante sur le bâtiment)</p> <p>Paramètre : longueur de la casquette</p>	
<p>(Z) PZ1 : protection solaire de hauteur uniforme autour de la fenêtre.</p> <p>Paramètre : hauteur de la protection</p>	
<p>(Z) PZ2 : protection solaire horizontale au dessus du bâtiment.</p> <p>Paramètres : dimensions et position de la protection.</p>	

Contexte urbain	
Les contextes sont choisis et calculés indépendamment pour les faces nord et sud. Pour chacun des côtés, le choix se fait entre un contexte ouvert (C0) ou une rue (C1).	
(N, S) C0 : contexte ouvert dégagé	
(N, S) C1 : rue de longueur infinie Pas de réflexion entre les façades de la rue et le sol (les faces contenant la fenêtre et le sol sont considérées comme noires). La façade face à la fenêtre réfléchit le rayonnement du ciel et du soleil vers la pièce. Paramètres : largeur de la rue, hauteur du mur, hauteur de la façade contenant la fenêtre, coefficient de réflexion du mur face à la fenêtre	

Il est possible de définir des fenêtres simultanément sur trois faces de la pièce : la face Nord, la face Sud (bien que les faces soient appelées "face nord" et face "sud", une orientation du modèle est possible par la suite, voir II. C) b)), et le plafond (fenêtre zénithale). Le rayonnement reçu depuis l'extérieur à l'intérieur de la pièce est considéré comme la somme des rayonnements entrant par chacune des fenêtres. Dans les calculs, l'hypothèse est faite qu'il n'y a **PAS** d'interférences entre les caractéristiques urbaines et architecturales définies pour chacune des fenêtres (rue, protections solaires). Ceci signifie par exemple qu'un mur au sud de grande hauteur ne fera pas d'ombre au mur nord. De même, les murs de chaque côté de la rue ne constituent pas des masques pour une fenêtre zénithale. Il est possible de justifier ces contraintes par plusieurs raisons :

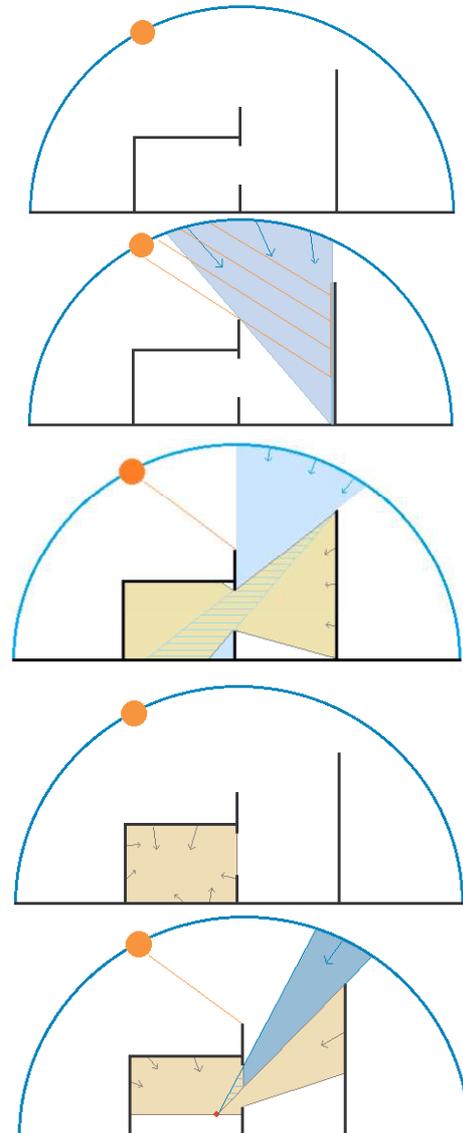
- Dans un contexte urbain dense, les bâtiments sont généralement de taille similaire et deux bâtiments séparés par un troisième ne sont généralement pas une source d'ombrage ou de réflexion lumineuse l'un pour l'autre. Cette remarque est également un conseil d'utilisation de l'application : il est préférable de définir la taille des bâtiments de manière à n'avoir pas d'effets de masque de la scène située d'un côté de la pièce pour l'autre côté de la pièce ;
- Une protection solaire horizontale pour une fenêtre zénithale, serait dans un cas réaliste située au dessus du bâtiment et ne gênerait pas le rayonnement arrivant sur les fenêtres nord et sud. Une telle protection solaire n'est pas non plus considérée comme un masque pour le rayonnement solaire sur vers les rues.

b) ETAPES SUCCESSIVES DU CALCUL

Le développement de l'application StreetRad s'est fait avec l'objectif d'un temps de calcul faible, pour des résultats relativement précis par rapport aux sources de rayonnement du modèle (soleil et ciel uniformes). Les fonctions de calcul sont pour ce faire organisées de manière à limiter au maximum le nombre d'opérations, ce qui en contrepartie contraint les possibilités du modèle.

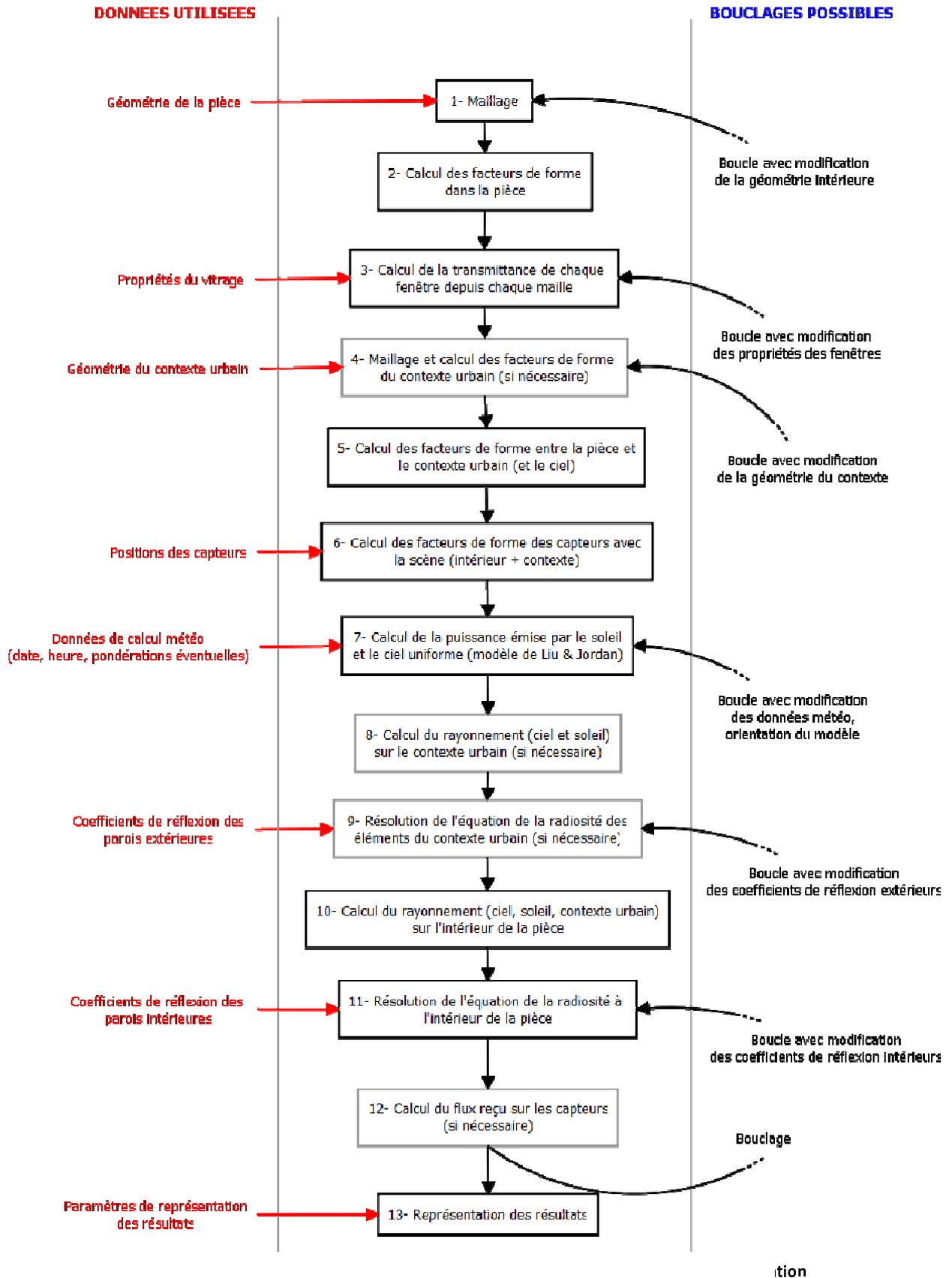
Le calcul de la radiosité à l'intérieur de la pièce est dans le principe réalisé en plusieurs étapes successives pour chaque fenêtre du modèle, en utilisant des hypothèses pour découpler le calcul et en augmenter la simplicité :

1. La puissance du rayonnement du soleil et du ciel est calculée, la position du soleil dans le ciel est déterminée en fonction de la date et de l'heure pour laquelle la modélisation est effectuée.
2. Le rayonnement du soleil et du ciel sur la façade opposée à la fenêtre de la pièce est calculé (si une telle façade est définie dans le calcul).
3. Le rayonnement du soleil, du ciel ainsi que la réflexion de la façade opposée à la pièce vers l'intérieur de la pièce sont calculés. Par hypothèse, l'énergie réfléchie de la pièce vers l'extérieur est négligeable. Le mur extérieur n'est pas pris en compte si le calcul porte sur la fenêtre zénithale.
4. Après avoir additionné les rayonnements entrant par chacune des fenêtres, la radiosité sur le maillage à l'intérieur de la pièce est calculée en utilisant la méthode de la radiosité pour prendre en compte les réflexions multiples.
5. L'irradiance reçue par un capteur plan fictif est calculée en prenant en compte le rayonnement issu du soleil, du ciel, de la façade opposée à la pièce ainsi que de la radiosité à l'intérieur de la pièce.



c) STRUCTURE DE L'APPLICATION

La suite des fonctions, telle qu'elle est organisée actuellement dans l'application, ainsi que les bouclages possibles dans cette configuration sont résumés sur la Figure 1. Les différentes positions de bouclages correspondent à l'endroit où les différents paramètres du modèle sont utilisés pour la première fois dans l'application ; boucler à ces positions permet d'éviter de recalculer des opérations superflues. Par exemple, les facteurs de forme sont calculés avant la puissance du rayonnement émis sur la scène, pour éviter de les recalculer lors de calculs bouclés sur le pas de temps (les facteurs de forme ne dépendant que de la géométrie du modèle).



B. METHODES DE CALCUL ET HYPOTHESES

a) MAILLAGE

On distingue le maillage de la pièce du maillage de la scène urbaine.

Pièce

La pièce est maillée par des carrés de dimensions prédéfinies par l'utilisateur. Les différentes longueurs de la pièce doivent être exprimées en fonction de la taille de la maille choisie par l'utilisateur afin d'arriver à un nombre rond de mailles. Incidemment, plus le maillage est fin, plus les possibilités géométriques sont grandes, mais plus le temps de calcul augmente. Le maillage de la pièce inclut les mailles des fenêtres, celles-ci étant retirées des calculs par la suite.

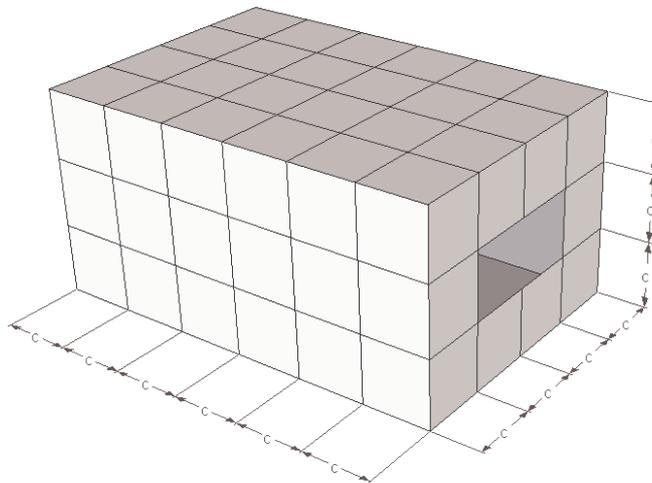


Figure 2. Maillage de la pièce

Protections solaires

Les protections solaires ne sont pas maillées et ne rentrent pas dans le calcul des réflexions. Elles sont considérées uniquement comme des masques empêchant le rayonnement de l'extérieur (ciel, soleil et leur réflexion sur la façade opposée à la fenêtre) d'entrer dans la pièce.

Façade opposée

Dans le cas où une façade face à la pièce serait considérée dans le calcul (contexte urbain de rue infinie), celle-ci serait maillée par deux maillages superposés :

Un maillage vis à vis du rayonnement du ciel : le mur est décomposé en mailles régulières jusqu'au minimum entre la hauteur du mur et la hauteur de la façade contenant la pièce. L'utilisateur définit la taille approximative d'une maille [LmSky] qui est modifiée pour que l'ensemble des mailles correspondent à la hauteur à mailler. Pour chacune, un facteur de vue du ciel est calculé. Si la hauteur du mur est supérieure à la hauteur de la façade contenant la pièce, une unique maille est construite pour l'espace entre ces deux hauteurs. Cette maille a un facteur de vue du ciel de 1/2 (la moitié de la voute céleste est vue).

Un maillage vis à vis du rayonnement du soleil : Le mur est séparé en deux mailles, l'une au soleil, l'autre à l'ombre (puissance du rayonnement solaire incident nulle).

Ce maillage varie en fonction de la hauteur et de l'azimut solaire. Il est calculé pour chaque changement d'heure. La hauteur de l'ombre est définie par :

$$h_{ombre} = \min (0 ; \max (h_{mur} ; h_{tot} + h_{masque} - \frac{d_{mur} \tan(h_{sol})}{\cos(\gamma_z)}) \quad (1)$$

h_{mur}	Hauteur de la façade face à la pièce
h_{tot}	Hauteur du plafond de la pièce par rapport au sol
h_{masque}	Hauteur de la façade contenant la pièce au-dessus de la hauteur du plafond
d_{mur}	Largeur de la rue
h_{sol}	Hauteur solaire (rad)
γ_z	Azimut solaire (rad)

Ceci s'applique aussi bien pour un mur au nord que pour un mur au sud.

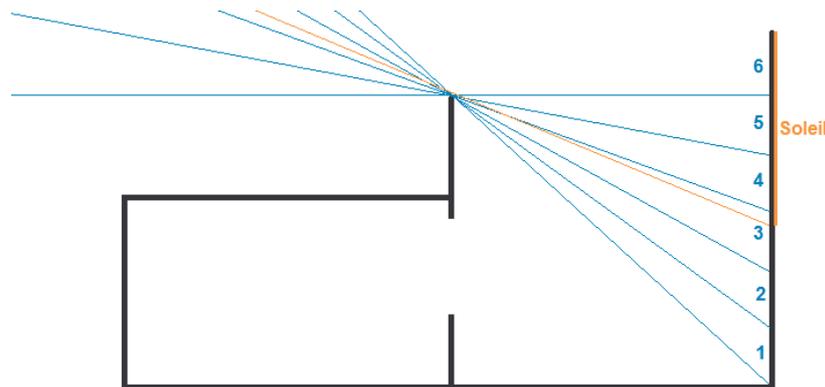


Figure 3. Maillage de la façade faisant face à la pièce (les mailles 1 à 5 de la façade sont définies par leur taille, la maille 6 correspond à la hauteur de la façade au-dessus de la façade qui lui est opposée)

b) FACTEURS DE FORME

Un facteur de forme (ou facteur de vue) est une grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1 qui représente la part de l'énergie quittant une maille A_i qui atteint une maille A_j . Le calcul de la radiosité, en prenant en compte les différentes réflexions entre les surfaces de la scène peut se mettre sous la forme d'une équation basée sur les facteurs de formes entre les différentes mailles préalablement enregistrés dans une matrice.

Les facteurs de formes se définissent par (Sillion et Puech 1994) :

$$F_{ij} = \int_{x \in A_i} \int_{y \in A_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(x, y) dy dx \quad (2)$$

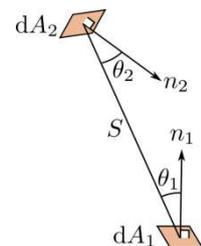


Figure 4 Facteur de forme Pmg/wikipedia.org

θ	Angle entre la normale à la surface A_i et la droite séparant $x \in A_i$ et $y \in A_j$
θ'	Angle entre la normale à la surface A_j et la droite séparant $x \in A_i$ et $y \in A_j$
r	Distance entre le point x et le point y
$V(x, y)$	Fonction de visibilité valant 1 si x voit y , 0 sinon

Des formules analytiques présentes dans la littérature (Howell 2001) permettent d'avoir un résultat sans erreur dans l'évaluation des facteurs de forme. En revanche, dans certains cas de figure, les facteurs de forme d'un plan à un plan sont approximés par des facteurs de forme d'un point à un plan, plus faciles à calculer. La manière dont sont calculés ces différents cas de figure est présentée ci-dessous.

Entre les mailles à l'intérieur de la pièce

Ces facteurs de forme sont calculés avec des formules analytiques de facteurs de forme de plan à plan. La moitié des facteurs de forme sont calculés de cette manière, l'autre moitié découlant directement de la relation de réciprocité des facteurs de forme :

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3)$$

avec A_i et A_j les surfaces des mailles i et j . Or $A_i = A_j$, on a donc directement $F_{ij} = F_{ji}$.

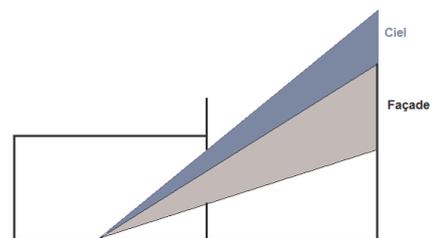
Les facteurs de forme entre les mailles de la pièce sont calculés dans un premier temps sans tenir compte des fenêtres, puis les lignes et colonnes correspondants aux emplacements des fenêtres sont retirées de la matrice des facteurs de forme.

Des mailles de la pièce vers les sources extérieures (ciel et façade opposée si elle existe)

On considère dans ce cas de figure le centre de chaque maille comme un point moyen pour le facteur de forme de la maille. Le facteur de forme pour l'ensemble de la maille vers une maille cible est donc considéré comme le facteur de forme de ce point central vers cette maille cible. L'erreur commise est relativement faible pour un maillage de la pièce suffisamment fin.

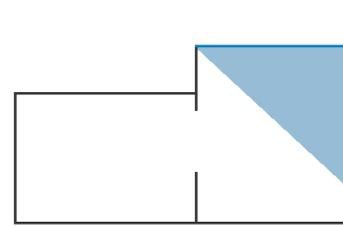
Afin de déterminer la surface de la façade extérieure ou du ciel qui est vue depuis le point central d'une maille donnée, une projection de la fenêtre sur le plan contenant le mur est réalisée dans un premier temps. Du rectangle obtenu, sont déduits :

- Les surfaces correspondantes au maillage de la façade pour le ciel vu depuis le point ;
- La surface de façade ensoleillée vue depuis le point ;
- Le ciel vu depuis le point, considéré comme la partie du rectangle située au dessus du mur.



De la façade extérieure vers le ciel

La réflexion du rayonnement du ciel par la façade extérieure est une fonction des facteurs de forme entre chaque maille de la façade et le ciel (ou facteur de vue du ciel). Le ciel est représenté comme le rectangle fermant le haut du canyon (voir schéma ci-contre). Le facteur de forme entre chaque maille de la façade et le ciel est calculé analytiquement par des formules plan/plan. Si la



façade opposée à la pièce est plus haute que la façade contenant la fenêtre, la dernière maille a un facteur de vue du ciel de 1/2. Ceci nécessite la contrainte déjà citée en II. A) a). Dans le cas d'une pièce comportant une fenêtre sud et une fenêtre nord débouchant des deux côtés sur une rue, au moins une des deux façades opposées à la pièce ne dépasse pas la hauteur des façades contenant la pièce.

c) MODELE DE CIEL ET SOLEIL

Publications de références : (Liu et Jordan 1960) (Campbell et Norman 1998) (Duffie et Beckman 2006) (Beckers et Beckers 2011)

Le modèle StreetRad utilise un modèle de ciel simplifié composé d'un soleil et d'un ciel uniforme selon Liu & Jordan tel que cité par (Campbell et Norman 1998) (la puissance du rayonnement de la voûte céleste est la même quelle que soit la direction considérée). Ce modèle permet de calculer la position du soleil, afin de déterminer la position des ombres sur la scène. Des coefficients mensuels peuvent être ajoutés au programme afin de prendre en compte les spécificités climatiques d'une ville en pondérant le rayonnement émis par le ciel et le soleil.

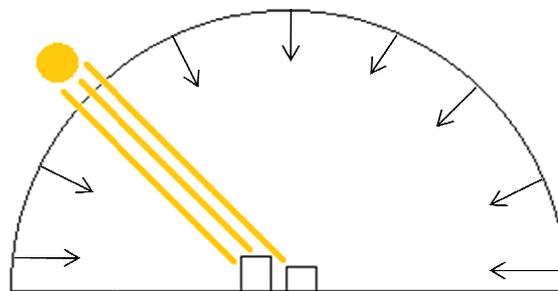


Figure 5 Modèle de ciel composé du soleil et d'un ciel uniforme

Position du soleil et puissance du rayonnement solaire direct

La position du soleil dans le ciel est caractérisée par l'angle zénithal, soit l'angle que fait le soleil par rapport au zénith, et par l'azimut solaire, soit l'angle que fait le rayon de soleil rapporté sur le plan horizontal avec le sud. La position du soleil dépend du jour j de l'année et de l'heure h considérée, ainsi que de la latitude ϕ à laquelle est situé le modèle. La puissance du rayonnement est une fonction de l'angle zénithal (Liu et Jordan 1960).

La méthode de calcul de la position du soleil est la suivante (Duffie et Beckman 2006) :

On calcule dans un premier temps la déclinaison solaire δ (angle en degrés que fait le soleil avec le plan équatorial) et la déviation horaire du soleil ω (en degrés):

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360(284 + j)}{365} \right) \quad (4)$$

$$\omega = 15(h - 12) \quad (5)$$

Ceci permet de calculer l'angle zénithal θ_z (degrés) et la hauteur solaire h_{sol} (angle complémentaire de θ_z) ainsi que l'azimut solaire γ_z (degrés) :

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) \quad (6)$$

$$h_{sol} = \frac{\pi}{2} - \theta_z \quad (7)$$

$$\gamma_z = \text{sgn}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\theta_z) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) \cos(\phi)} \right) \right| \quad (8)$$

Une fois la position du soleil déterminée, il est possible de calculer la puissance du rayonnement direct sur une paroi perpendiculaire aux rayons de soleil. Celle-ci dépend, en plus de l'azimut solaire, de l'altitude du modèle par rapport au niveau de la mer ψ (m), de la puissance du rayonnement extra-atmosphérique G_{sc} (puissance solaire sur un plan perpendiculaire au rayon de soleil situé en dehors de l'atmosphère, en W/m^2) et de la transmittance atmosphérique τ , grandeur sans dimension qui caractérise l'affaiblissement du rayonnement solaire par l'atmosphère.

Dans StreetRad, sont fixées les valeurs $G_{sc} = 1367 W/m^2$ et $\tau = 0,7$ (Campbell et Norman 1998). Un premier calcul permet d'obtenir le nombre de masse optique de la couche d'air traversée par les rayons du soleil (Beckers et Beckers 2011):

$$m = \sec(\theta_z) e^{\frac{-\psi}{8200}} \quad (9)$$

Il est ensuite possible d'obtenir la puissance du rayonnement solaire incident sur un plan perpendiculaire aux rayons de soleil I_s (W/m^2).

$$I_{s0} = G_{sc} \cdot \tau^m \quad (10)$$

La valeur du rayonnement solaire sur une paroi orientée avec un angle α par rapport aux rayons du soleil ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) est donnée par la relation :

$$I_{s\alpha} = I_{s0} \cos \alpha \quad (11)$$

Il est également possible de calculer la puissance rayonnante de la voute céleste E_{ciel} (W/m^2) sur un plan horizontal en milieu dégagé.

$$E_{ciel} = 0,3 G_{sc} (1 - \tau^m) \cos \theta_z \quad (12)$$

La valeur du rayonnement émis par le ciel reçu par une paroi inclinée ou dans un milieu comportant des obstacles à la visibilité du ciel dépend ensuite du facteur de vue du ciel FVC de cette paroi :

$$I_{ciel} = FVC \cdot E_{ciel} \quad (13)$$

Prise en compte des données météorologiques

Le modèle présenté plus haut est un modèle de ciel clair (Liu et Jordan 1960) (Campbell et Norman 1998). Il peut cependant être intéressant de prendre en compte le couvert nuageux moyen. Pour cela, il est possible d'associer à StreetRad un fichier contenant des coefficients mensuels à appliquer au rayonnement du soleil et du ciel. Ces pondérations s'appliquent aux valeurs I_{s0} et E_{ciel} une fois celles-ci calculées.

Calcul des résultats sur le spectre visible (lux)

Les valeurs de rayonnement calculées par la méthode de Liu et Jordan sont exprimées en termes de puissances surfaciques (W/m^2). Pour avoir un raisonnement axé sur l'accès à la lumière du jour, il est possible de convertir ces valeurs en illuminance (lux), afin de réduire le domaine radiatif d'intérêt au spectre du visible. La conversion se fait de manière approximative en appliquant le coefficient d'efficacité lumineuse de $1W/m^2 = 110$ lux, cette valeur étant citée comme une valeur moyenne entre l'efficacité lumineuse du rayonnement solaire direct et celle du ciel (Littlefair 1988) (Vartiainen 1999).

Orientation du modèle

L'orientation du modèle revient à effectuer un changement de repère en modifiant l'azimut solaire γ_z . La rotation du modèle n'influe que sur le tracé des ombres sur la scène et dans la pièce. La rotation se fait dans le sens trigonométrique.

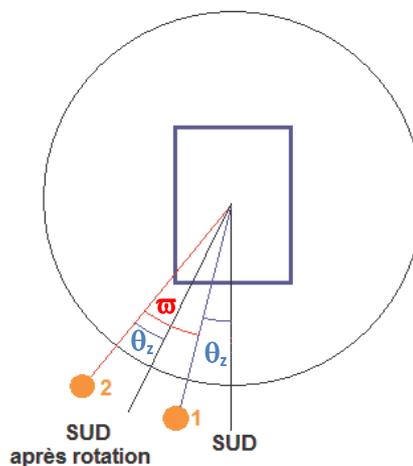


Figure 6 Rotation du modèle. Ajouter un angle ϖ à l'azimut solaire déplace le sud de ϖ (sens anti-trigonométrique), ce qui équivaut à une rotation de ϖ (sens trigonométrique) du modèle

d) TRANSMITTANCE DU VITRAGE

La transmittance du vitrage est la fraction du rayonnement que transmet un vitrage. C'est une caractéristique du type de vitrage et de son épaisseur. La transmittance dépend également de la longueur d'onde du rayonnement incident et de son angle d'incidence. Ainsi, on peut distinguer une valeur de transmittance moyenne pour le spectre du visible (lumière), ou pour le spectre solaire. Le logiciel Optics 5 développé à l'université de Berkeley propose une bibliothèque de vitrages et leurs valeurs de transmittances moyennes sur le spectre solaire et sur le spectre visible, pour des rayons lumineux incidents perpendiculaires au vitrage.

StreetRad permet de prendre en compte les caractéristiques du vitrage, avec le choix entre une transmittance constante indépendante de l'angle d'incidence d'un rayon, ou une transmittance dépendante de cet angle d'incidence. La méthodologie utilisée dans ce cas provient de l'article (Furler 1991) et est résumée plus bas. Les autres caractéristiques du vitrage (absorptance, réflectance) ne sont pas prises en compte.

La transmittance s'applique sur le rayonnement entrant dans la pièce. On distingue dans l'application deux cas de figure : la transmittance pour le rayonnement solaire direct, et la transmittance pour le rayonnement diffus (ciel, réflexion de la rue). Dans ces deux cas de figure, il est nécessaire d'avoir comme donnée de base une valeur de transmittance normale au vitrage, et, pour calculer une transmittance dépendante de l'angle du rayon incident, de la réflectance pour un rayon normal au vitrage (données que l'on peut trouver dans Optics 5). Dans le cas d'une étude énergétique (résultats en W/m²), on considèrera la transmittance solaire moyenne du vitrage ; dans le cas d'une étude sur la lumière (résultats en lux), on préférera une transmittance sur le spectre visible.

Transmittance pour le rayonnement direct (soleil)

Le rayonnement solaire se fait selon des rayons parallèles. L'angle d'incidence avec le vitrage est donc constant sur la surface d'un vitrage, pour une orientation de vitrage. En revanche, cet angle change avec la position du soleil dans le ciel, le calcul de la transmittance dépendant de l'angle d'incidence est alors à refaire pour chaque nouvelle position solaire.

Transmittance pour le rayonnement diffus

L'angle d'incidence d'un rayon issu du rayonnement diffus (ciel, scène extérieure) sur le vitrage dépend de la géométrie de la scène : la rue comme le ciel tels que vus depuis un point de la pièce ont une position fixe dans le temps. L'angle d'incidence des rayons arrivant sur une maille dépend alors de la manière dont cette maille voit la fenêtre.

Dans StreetRad, une valeur de transmittance du vitrage est calculée pour chaque maille de la pièce, vers chaque face où une fenêtre peut exister. Ceci donne lieu à une matrice Nx3 où N est le nombre de mailles de la pièce. Dans le cas d'une transmittance ne variant pas avec l'angle d'incidence, toutes les valeurs de la matrice sont identiques.

Dans le cas d'une transmittance dépendante de l'angle d'incidence des rayons, un angle moyen de vue de la fenêtre θ_{moy} est calculé en faisant la moyenne des angles θ_i que font la normale à la fenêtre \vec{n} avec la droite séparant le centre de la maille considérée de chaque point de la fenêtre (dont les dimensions utiles sont réduites par des protections solaires éventuelles, voir II. 3) b)), de vecteur directeur \vec{v}_i (Figure 7) :

$$\theta_{moy} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \theta_i = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \cos^{-1} \left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{v}_i}{\|\vec{v}_i\| \|\vec{n}\|} \right) \quad (14)$$

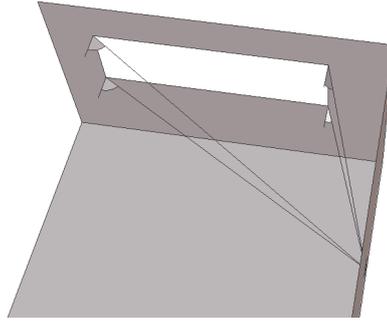


Figure 7. Angles entre la normale à la fenêtre et les droites séparant le point central d'une maille de chaque coin de la fenêtre

Méthode de calcul de la transmittance en fonction de l'angle, tirée de (Furler 1991)

On a, en entrées, la transmittance (T_0) et la réflectance (R_0) pour un rayon normal au vitrage, l'épaisseur (d) du vitrage et l'angle d'incidence (θ) du rayon.

Il est nécessaire d'avoir $0 < T_0 < 1$; $0 < R_0 < 1$; et $0 < R_0 + T_0 \leq 1$

On calcule la variable de calcul β :

$$\beta = T_0^2 - R_0^2 + 2R_0 + 1 \quad (15)$$

De là, on calcule la réflectivité (caractéristique du matériau qui ne prend pas en compte l'épaisseur du vitrage) pour un rayon perpendiculaire au vitrage :

$$r_0 = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_0)R_0}}{2(2 - R_0)} \quad (16)$$

Puis l'indice d'extinction du vitrage :

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln \left(\frac{R_0 - r_0}{r_0 T_0} \right) \quad (17)$$

Ici, λ correspond à la longueur d'onde moyenne sur le spectre considéré. Les valeurs prises dans StreetRad sont $\lambda=575.10^{-9}$ pour le spectre visible (calcul sur la lumière), ou $\lambda=898.10^{-9}$ pour le spectre solaire (calcul énergétique) (Furler 1991).

Est également calculé l'indice de réfraction du vitrage :

$$n = \frac{1 + \sqrt{r_0}}{1 - \sqrt{r_0}} \quad (18)$$

ce qui permet le calcul de l'angle réfracté à l'intérieur du vitrage en utilisant la relation de Snell-Descartes (on considère pour l'air un indice de réfraction $n=1$) :

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{n} \right) \quad (19)$$

On calcule ensuite la réflexivité angulaire $r(\theta)$ et la transmittivité angulaire $t(\theta)$ du vitrage :

$$r(\theta) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sin(\theta - \phi)}{\sin(\theta + \phi)} \right)^2 + \left(\frac{\tan(\theta - \phi)}{\tan(\theta + \phi)} \right)^2 \right) \quad (20)$$

$$t(\theta) = 1 - r(\theta) \quad (21)$$

Ainsi que le coefficient d'absorption du vitrage (λ a la même valeur que dans (17)).

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (22)$$

D'où on déduit la transmittance recherchée par la formule :

$$T(\theta) = \frac{t(\theta)^2 e^{-\alpha d / \cos(\phi)}}{1 - r(\theta)^2 e^{-\alpha d / \cos(\phi)}} \quad (23)$$

La validation réalisée de cette méthode de calcul (Furler 1991) montre de bons résultats (erreur inférieure à 1,5% pour un rayon lumineux). En revanche, bien que ce calcul permette de visualiser grossièrement le comportement du vitrage, l'approximation faite d'une transmittance constante sur la surface de la vitre, moyennée par rapport aux angles d'incidence extrêmes des rayons touchant la maille, peut être assez forte pour plusieurs raisons :

- l'évolution de la transmittance avec l'angle d'incidence d'un rayon est non linéaire. En effet, celle-ci est relativement stable jusqu'à 40°, puis décroît rapidement jusqu'à une transmittance de 0 pour un rayon quasiment parallèle au vitrage (Figure 8). Effectuer le calcul de la transmittance avec les angles moyennés ne donne ainsi pas un résultat moyen pour le vitrage ;
- Moyenner les angles basés sur les coins extrêmes de la fenêtre implique que ces quatre points ont la même importance dans le calcul du rayonnement entrant. Or, les facteurs de forme autour de ces quatre points depuis la maille ont des valeurs différentes, et il n'est pas certain que les rayons traversant les points en ces 4 points soient d'une puissance identique (si ce rayon vient de la façade opposée, ou du ciel).

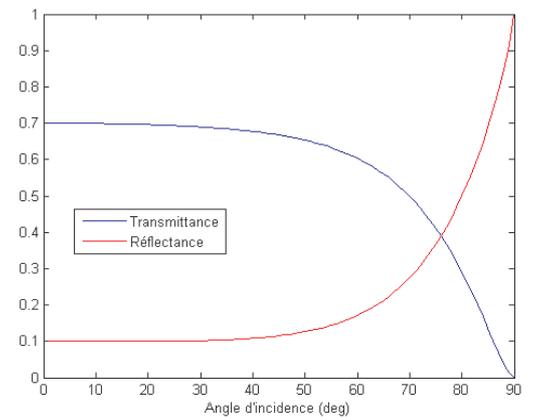


Figure 8. Transmittance et réflectance d'un vitrage simple de 6mm d'épaisseur

e) CALCUL DES OMBRES DANS LA PIECE

Dans la pièce, on effectue le calcul de l'impact du soleil : du fait de la configuration géométrique (position des fenêtres, protections solaires), un calcul statistique a été préféré à un calcul de projection analytique.

La méthode générale est la suivante :

- Pour chaque maille, un certain nombre de rayons (dépendant de la précision présente dans le programme) est lancé vers le soleil.
- Un premier test d'intersection de chacun de ces rayons est ensuite effectué avec les fenêtres. Si une fenêtre est touchée, un test d'intersection est effectué avec les protections solaires.
- Si aucune protection solaire n'est touchée, alors le point origine du rayon voit le soleil.

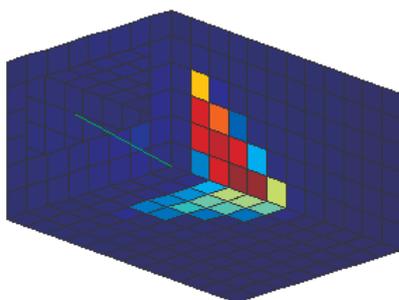
Afin de réduire le temps de calcul, on procède par étapes :

1. Le produit scalaire entre un rayon de soleil (pris dans le sens inverse, du point d'impact vers le soleil), et la normale à chacune des faces est calculé. Si pour une face, le produit scalaire est négatif ou nul, les rayons du soleil sont parallèles à celle-ci ou derrière elle. Les mailles de cette face ne sont pas l'objet de tests de visibilité du soleil.
2. Le contour de chaque maille restante est discrétisé par des points **espacés de 10 cm**. Pour chacun de ces points, un test de visibilité du soleil est effectué, si le soleil est touché par l'un de ces points, on passe à l'étape suivante. Cette simplification peut être faite car la fenêtre a une taille minimale égale à une maille de la pièce, l'impact solaire ne peut donc pas être confiné à une maille sans en toucher les contours. Les chances qu'une maille ne soit pas touchée alors qu'elle le devrait sont dès lors minimales et ne représentent pas une erreur importante.
3. Les mailles dont le soleil touche le contour sont associées à une grille de n points **espacés de 2cm** dans les deux directions (**4cm** si la surface de parois de la pièce est supérieure à 150 m², afin de limiter le temps de calcul). Un test de visibilité du soleil est effectué pour des rayons partant de chacun de ces points. La proportion de point touchant le soleil détermine la proportion de surface de la maille touchée par le soleil.

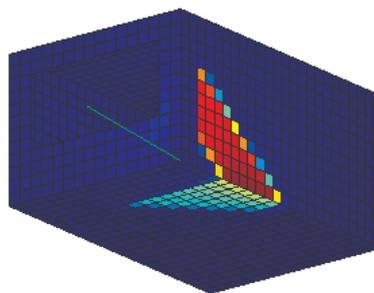
$$I_{i,soleil} = I_{s\alpha_i} * \frac{n_{touchés}}{n_{lancés}} \quad (24)$$

Avec $I_{s\alpha_i}$ la puissance solaire pour l'angle α_i que fait le soleil avec la maille i .

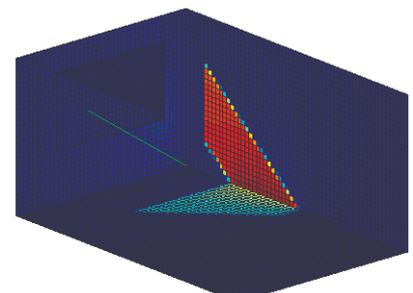
A l'intérieur de la pièce, le maillage est unique, que ce soit pour le soleil ou pour le rayonnement diffus. Par conséquent le rayonnement solaire touchant une maille est supposé constant sur cet élément de surface. La précision du tracé de l'ombre dépend donc de la finesse du maillage tandis que la quantité d'énergie solaire entrante est la même quel que soit le maillage choisi.



Taille de maille : 50cm



Taille de maille : 25cm



Taille de maille : 10cm

Le calcul de visibilité du soleil est relativement long, mais il est important d'avoir pour celui-ci une précision suffisante, car lorsque le soleil pénètre dans la pièce, il devient immédiatement la source principale la plus importante, le rayonnement diffus du ciel et de la scène étant beaucoup moins puissants.

f) EQUATION DE LA RADIOSITE

Le calcul de la radiosité (puissance surfacique émise par une paroi) se fait en plusieurs étapes :

1. La puissance reçue et réémise par la façade opposée à la pièce, au nord (et/ou au sud) est calculée. Celle-ci dépend de la hauteur de l'ombre sur ce mur et de la position du soleil, ainsi

que des facteurs de forme entre le maillage du mur et le ciel. Les valeurs de puissance reçues (irradiance) sont multipliées par le coefficient de réflexion du mur pour passer à une puissance émise (radiosité).

Par hypothèse, on considère que le contexte urbain ne réémet pas vers l'atmosphère.

2. La radiosité à l'intérieur de la pièce est ensuite calculée, en utilisant la formule générale :

$$B_i = \rho_i \left(\sum_{j=1}^N F_{ij} B_j + \sum_{k=1}^{N_{ext}} F_{ik} B_k + F_{i,ciel} E_{ciel} + I_{i,soleil} \right) \quad (25)$$

Avec :

B_i	Radiosité de la maille i (maille à l'intérieur de la pièce)
ρ_i	Coefficient de réflexion de la maille i
N	Nombre de mailles de la pièce
F_{ij}	Facteur de forme entre les mailles i et j
N_{ext}	Nombre de mailles de la scène extérieure (façade(s) opposée(s))
$F_{i,ciel}$	Facteur de forme de la maille i au ciel
E_{ciel}	Puissance émise par le ciel
$I_{i,soleil}$	Puissance du rayonnement direct reçu sur la maille i

On considère les hypothèses suivantes :

- La pièce ne réémet pas vers l'atmosphère ;
- Le rayonnement des parois intérieures de la pièce vers la façade extérieure est négligeable, et n'est pas pris en compte.

g) CALCUL SUR CAPTEURS

Il est possible de calculer des résultats sur des capteurs placés dans la pièce. Ces capteurs sont considérés dans les calculs comme des surfaces différentielles fictives orientées vers le haut (comme un plan de travail fictif), ils n'entrent pas en compte dans le calcul de la radiosité (ni en tant que masques, ni comme surfaces réfléchissantes).

La position des capteurs doit tenir compte du maillage de la pièce, les facteurs de forme entre les capteurs et la pièce n'étant calculables dans StreetRad que pour des positions exprimées en nombre rond de mailles dans les trois directions.

Les facteurs de forme entre les capteurs et les mailles de la pièce ainsi que les facteurs de forme entre les capteurs et le ciel et les éventuelles parois extérieures sont calculés par des formules analytiques surface différentielle/plan. La visibilité du soleil est calculée par un lancer de rayon et des tests successifs, de la même manière que pour les mailles à l'intérieur de la pièce (voir II. B. e).

Les résultats obtenus à l'issue des calculs sur capteurs sont exprimés en puissance incidente, donnée par la formule générale suivante (formule analogue au calcul de la radiosité pour les mailles en II. B. f).

$$I_{capt} = \sum_{j=1}^N F_{capt,j} B_j + \sum_{k=1}^{N_{ext}} F_{capt,k} B_k + F_{capt,ciel} E_{ciel} + I_{capt,soleil} \quad (26)$$

Avec :

I_{capt}	L'irradiance sur le capteur
$F_{capt,j}$	Le facteur de forme entre le capteur et la maille j
$F_{capt,ciel}$	Le facteur de forme entre le capteur et le ciel
$I_{capt,soleil}$	La valeur de l'irradiation solaire sur le capteur (0 si le capteur n'est pas touché, $I_{s\alpha_{capt}}$ s'il est touché)

III. EXEMPLE D'ETUDE D'UN CAS URBAIN

Cette partie a pour vocation de montrer quelques exemples de réflexions qu'il est possible d'avoir par rapport à l'accès au rayonnement solaire en milieu urbain. Chaque problème sera illustré par des résultats issus de StreetRad.

A. CHOIX DES PARAMETRES

On se base sur le cas d'une pièce de bureau dans un tissu urbain dense, à la latitude de Paris. La pièce est rectangulaire et présente 24 m² de surface (voir Figure 9). Une fenêtre est présente sur sa face nord, sans protections solaires. La fenêtre donne sur une rue, et un immeuble de 4 étages fait face à la pièce (12m de haut). La pièce se situe au rez-de-chaussée d'un immeuble de 4 étages également. La rue a une largeur de 10 m. A la latitude de Paris, le soleil ne passe jamais au nord entre 8h et 16h (Figure 10), horaires d'une journée de travail. Cette disposition permet d'étudier les composantes diffuses du rayonnement (réflexion de la façade opposé, ciel), en évitant d'avoir un soleil direct dans la pièce, qui deviendrait alors prédominant sur toutes les autres sources de rayonnement.



Un résumé des paramètres est présenté ci-dessous. Certains de ces paramètres seront amenés à être modifiés pour comparaison, auxquels cas les différentes nouvelles valeurs choisies seront explicitées.

Grandeur	Symbole	Valeur
Emplacement géographique (Paris)		
Latitude	ϕ	48° 52'
Altitude	ψ	50 m
Pièce		
Longueur	L	6 m
Largeur	l	4 m
Hauteur entre le plancher et le plafond de la pièce	h	3 m
Hauteur du plancher de la pièce par rapport au sol	h_{floor}	0 m
Hauteur du plafond de la pièce par rapport au sol	h_{tot}	3+0 =3 m
Hauteur de la fenêtre		1,5 m
Hauteur de la position de la fenêtre		1 m
Largeur de la fenêtre		3 m
Position de la fenêtre par rapport au côté de la pièce		1 m
Transmittance du vitrage (fixe)		1
Coefficient de réflexion du plancher		0,4
Coefficient de réflexion des murs et du plafond		0,7

Contexte urbain		
Largeur de la rue	d_{mur}	10 m
Hauteur de la façade face à la pièce au dessus de la pièce	h_{masque}	9 m
Hauteur de la façade contenant la pièce	h_{mur}	12 m
Coefficient de réflexion de la façade	R_{mur}	0,4
Définition du maillage		
Taille d'une maille de la pièce (pour les calculs)		0,25 cm

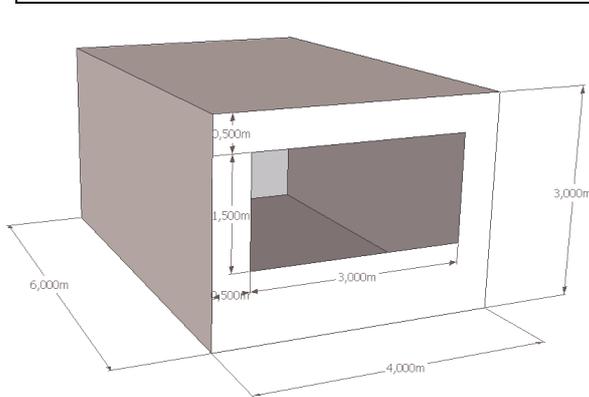


Figure 9. Dimensions de la pièce

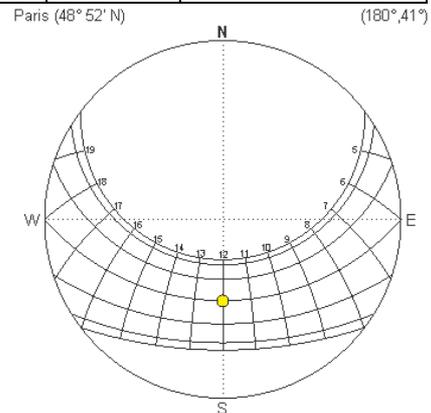


Figure 10. Diagramme des trajets du soleil à Paris (tracé avec Heliodon2) : le soleil reste dans la moitié sud entre les lignes de 8h et 16h, heures solaires (correspond à environ 9h-17h heure d'hiver et 10h-18h heure d'été)

Note : une valeur de transmittance du vitrage de 1 (pas de vitre) est choisie pour ne pas cumuler les coefficients multiplicateurs qui pourraient rendre plus difficile l'analyse des résultats. Il faut donc compter que des résultats prenant en compte une valeur de transmittance inférieure à 1 (cas réaliste) seront plus faibles que ceux présentés dans la suite du rapport (la transmittance moyenne d'un vitrage varie selon sa composition, son épaisseur, sa propreté, et selon qu'il s'agit de simple ou double vitrage).

B. CALCUL DE LA RADIOSITE SUR LES PAROIS DE LA PIECE

L'objectif est ici de suivre les différentes étapes d'un calcul dans le cas pratique de la configuration présentée ci-dessus, pour la date du 21 février à 10 h. La démarche suivie est présentée en II.) c) :

1. Calcul de la position du soleil et de la puissance des sources (soleil, voute céleste)

Dans un premier temps, il est nécessaire de calculer la position du soleil à partir des données météorologiques, la puissance du rayonnement du soleil ainsi que de la voute céleste dépendant de la hauteur solaire.

Calcul de la déclinaison solaire (4) :

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + j)}{365}\right) = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + 52)}{365}\right) = -11^{\circ} 23'$$

Calcul la déviation horaire du soleil (5) : $\omega = 15(h - 12) = 15(10 - 12) = -30^{\circ}$

On déduit de δ et ϖ l'angle zénithal θ_z (6) et l'azimut solaire γ_z (8) :

$$\begin{aligned}\theta_z &= \cos^{-1}(\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) \\ &= \cos^{-1}(\cos(48,52) \cos(-11,23) \cos(-30) + \sin(48,52) \sin(-11,23)) = \mathbf{65^\circ 37'}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_z &= \operatorname{sgn}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\theta_z) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) \cos(\phi)} \right) \right| \\ &= \operatorname{sgn}(-30) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos(65,37) \sin(48,52) - \sin(-11,23)}{\sin(65,37) \cos(48,52)} \right) \right| = \mathbf{-32^\circ 65'}\end{aligned}$$

L'angle θ_z permet de calculer le nombre de masse optique m (9) qui caractérise l'épaisseur de la couche d'air que traversent les rayons du soleil avant d'atteindre le modèle :

$$m = \sec(\theta_z) e^{\frac{-\psi}{8200}} = \sec(65,37) e^{\frac{-50}{8200}} = \mathbf{2,38}$$

Le rayonnement solaire sur une surface perpendiculaire aux rayons est calculé en utilisant dans (10) cette dernière valeur, une valeur de transmittance atmosphérique considérée constante et valant $\tau=0,7$ (Campbell et Norman 1998), et la constante de rayonnement extra-atmosphère $G_{sc}=1367$ W/m² :

$$I_{s0} = G_{sc} \cdot \tau^m = 1367 * 0,7^{2,38} = \mathbf{585 W/m^2}$$

Il est également possible de calculer le rayonnement émis par le ciel sur une surface horizontale en milieu dégagé en utilisant (12) :

$$E_{ciel} = 0,3G_{sc}(1 - \tau^m) \cos \theta_z = 0,3 * 1367 * (1 - 0,7^{2,38}) \cos(65,37) = \mathbf{97,8 W/m^2}$$

2. Calcul du rayonnement du soleil et du ciel sur la façade face à la fenêtre

Le rayonnement sur la façade extérieure est ensuite calculé en deux parties : une, par rapport au rayonnement direct du soleil, et l'autre, par rapport au rayonnement de la voûte céleste.

On sait dans notre cas que le soleil touche le mur considéré (on peut le vérifier en calculant le signe du produit scalaire entre un rayon de soleil et la normale au mur). La hauteur de l'ombre est calculée à partir de la formule (1) :

$$\begin{aligned}h_{ombre} &= \min \left(0 ; \max \left(h_{mur} ; h_{tot} + h_{masque} - \frac{d_{mur} \tan(h_{sol})}{\cos(\gamma_z)} \right) \right) \\ &= \min \left(0 ; \max \left(12 ; 3 + 9 - \frac{10 \cdot \tan(90 - 65,37)}{\cos(-32,65)} \right) \right) \\ &= \mathbf{6,88 m}\end{aligned}$$

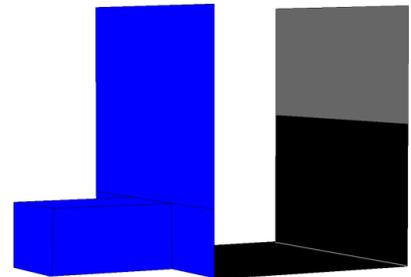


Figure 11. Tracé de l'ombre

La puissance du rayonnement solaire sur la surface éclairée du mur dépend du cosinus de l'angle θ que font les rayons du soleil incidents (de vecteur directeur \vec{v}) avec la normale au mur \vec{n} .

Dans notre cas, $\vec{v} = \begin{pmatrix} -\cos(\gamma_z) \sin(\theta_z) \\ \sin(\gamma_z) \sin(\theta_z) \\ \cos(\theta_z) \end{pmatrix}$, et $\vec{n} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

$$\cos(\theta) = \frac{\vec{v} \cdot \vec{n}}{\|\vec{v}\| \cdot \|\vec{n}\|} = \cos(\gamma_z) \sin(\theta_z) = \mathbf{0,765}$$

Le rayonnement reçu sur la partie éclairée du mur vaut donc (11):

$$I_{s,mur} = I_{s0} \cdot \cos(\theta) = \mathbf{448 \text{ W/m}^2}$$

Le rayonnement reçu par le mur en provenance de la voûte céleste dépend du facteur de forme entre chaque point du mur et le ciel (ou facteur de vue du ciel). Dans notre cas, le maillage est composé de mailles de 25 cm de haut sur toute la hauteur du mur, de longueur infinie. Quelques valeurs de facteurs de vue du ciel sont présentées sur la Figure 12. On vérifie sur celui-ci que ces facteurs de vue du ciel augmente avec la hauteur sur le mur, et tend vers 0,5 en haut du mur, soit la moitié de la voûte céleste.

A partir de ces facteurs de vue, l'irradiance du mur due au rayonnement du ciel est calculée par la formule (13) :

$$I_{ciel,mur} = FVC \cdot E_{ciel}$$

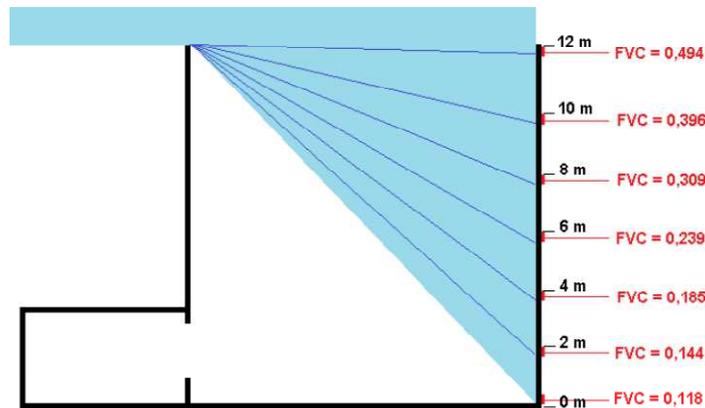


Figure 12. Exemples de valeurs de facteurs de vue du ciel

Pour passer des valeurs d'irradiance (puissance reçue par le mur $I_{ciel,mur}$ et $I_{s,mur}$) à des valeurs de radiosité (puissance émise par le mur $B_{ciel,mur}$ et $B_{s,mur}$), il convient de multiplier I_{ciel} et $I_{s\theta}$ par le coefficient de réflexion du mur, ici, 0,4. Cela donne, par exemple, pour la réflexion du rayonnement du soleil :

$$B_{s,mur} = I_{s,mur} \cdot 0,4 = \mathbf{179 \text{ W/m}^2}$$

Il est possible de calculer pour s'en donner une idée l'ordre d'importance des puissances des différentes sources de rayonnement diffus pour la pièce. Il apparaît que le mur extérieur éclairé par le soleil émet le plus (179 W/m^2), puis le ciel vu directement ($97,8 \text{ W/m}^2$), et enfin la réflexion du ciel sur le mur extérieur ($0,4 \text{ FVC}_k * 97,8 \text{ W/m}^2$, pour chaque maille k du mur). Bien sûr, ces valeurs ne

peuvent pas être interprétées comme des généralités car elles dépendent des facteurs de forme entre les mailles de la pièce et les différentes sources, et donc sont fortement liées à la géométrie du modèle et à la position du soleil.

3. Calcul du rayonnement du soleil, du ciel et de la réflexion du mur à l'intérieur de la pièce

Cette étape consiste à déterminer si le soleil touche ces mailles (et, le cas échéant, dans quelle proportion) et à calculer pour chaque maille de la pièce les facteurs de vue avec le ciel et les différentes mailles du mur.

La pièce a été paramétrée de telle manière que le soleil n'entre pas dans la pièce. Les tests de visibilité du soleil de chaque maille sont effectués comme décrit en II. B. e), avec un résultat négatif à chaque fois.

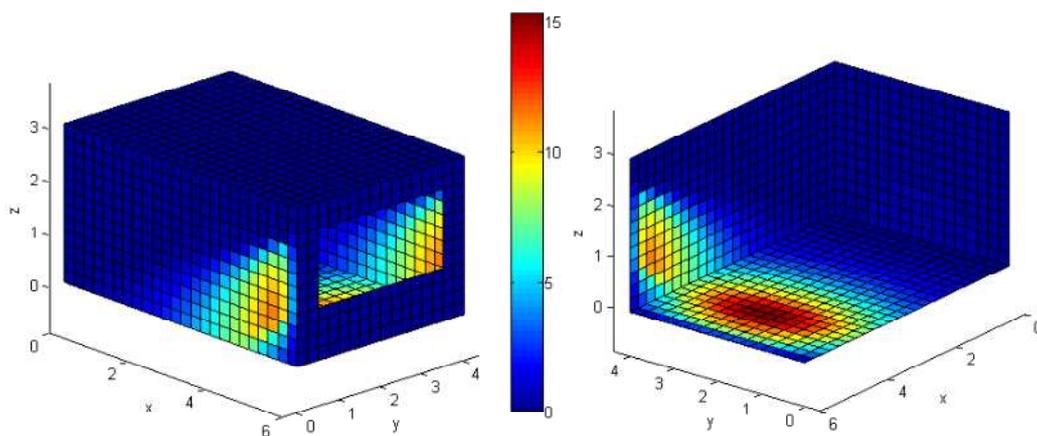


Figure 13. Irradiance des parois intérieures de la pièce depuis le soleil, le ciel et la façade extérieure (le contexte urbain n'est pas représenté, les valeurs représentent la radiosité sur les surfaces à l'intérieures de la pièce)

Sur la Figure 13, trois « taches » où le rayonnement reçu est particulièrement élevé sont identifiables : deux sur les faces latérales, au niveau du bas de la fenêtre, entre 50 cm et 1 m de la face contenant la fenêtre ; et une sur la face du bas de la fenêtre. Ces trois zones sont celles dont les mailles ont les plus grands facteurs de forme avec la fenêtre, et de là avec les sources extérieures de rayonnement.

A ces valeurs de rayonnement provenant de l'extérieur sont appliqués les coefficients de réflexion des parois de la pièce : 0,4 pour le plancher, 0,7 pour les murs et le plafond (voir Figure 14). A partir de ces nouvelles valeurs, les réflexions des ondes radiatives entre les surfaces à l'intérieur de la pièce sont calculées.

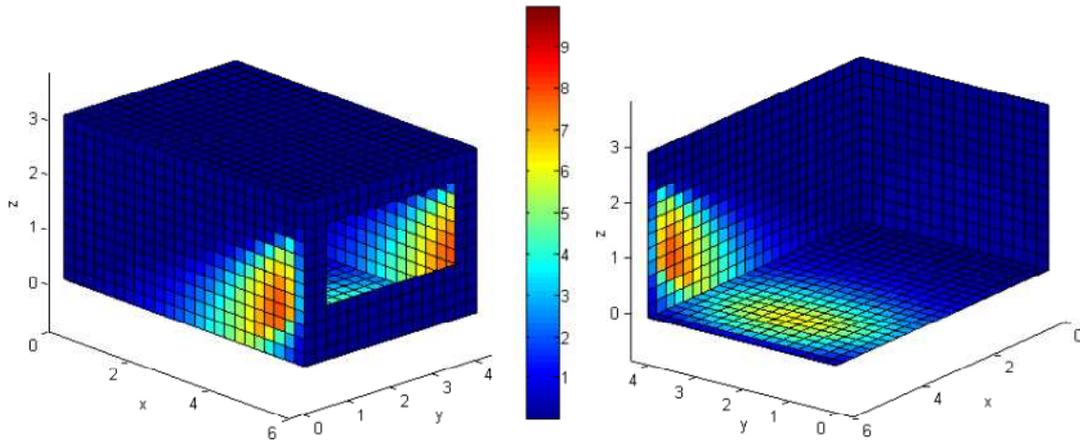


Figure 14. Réflexion du rayonnement provenant de l'extérieur par les parois intérieures (échelle modifiée par rapport à la Figure 13)

4. Calcul des réflexions entre les surfaces à l'intérieur de la pièce

On ne se préoccupe plus désormais du contexte à l'extérieur de la pièce. On reprend la formule (25) qui permet de calculer la radiosité sur les surfaces à l'intérieur de la pièce :

$$B_i = \rho_i \left(\sum_{j=1}^N F_{ij} B_j + \sum_{k=1}^{N_{ext}} F_{ik} B_k + F_{i,ciel} E_{ciel} + I_{i,soleil} \right)$$

En posant C comme la quantité calculée à l'étape 3. :

$$C_i = \rho_i \left(\sum_{k=1}^{N_{ext}} F_{ik} B_k + F_{i,ciel} E_{ciel} + I_{i,soleil} \right)$$

on obtient :

$$B_i = \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j + C_i$$

Cette dernière expression permet d'obtenir la solution de la radiosité sur les surfaces à l'intérieur de la pièce, en prenant en compte les réflexions entre les surfaces à l'intérieur. Les valeurs obtenues sont présentées sur la Figure 15. Les surfaces présentant les plus fortes valeurs de radiosité demeurent celles de la Figure 14. En revanche, l'ensemble des surfaces de la pièce ont désormais une valeur de radiosité non-nulle. Globalement, on observe des valeurs de radiosité à l'intérieur inférieures d'un facteur 20 à 100 aux puissances émises par les sources extérieures.

La Figure 16 montre la composante de la radiosité due aux réflexions entre les parois de la pièce (construite en calculant $B - C$). La valeur moyenne sur l'ensemble de la pièce est de $1,4 \text{ W/m}^2$, les plus fortes valeurs, autour de 3 W/m^2 sont situées sur le contour bas de la fenêtre, où les mailles ont des facteurs de formes importants avec les zones présentant une radiosité importante sur les faces latérales, ainsi qu'au plancher.

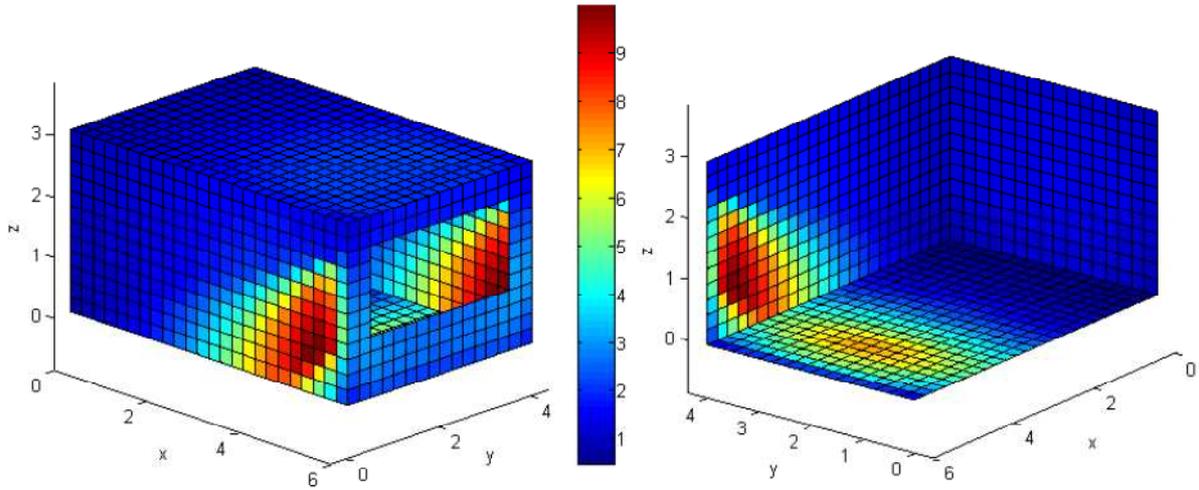


Figure 15. Solution de l'équation de la radiosité prenant en compte le rayonnement venu de l'extérieur et les réflexions dans la pièce

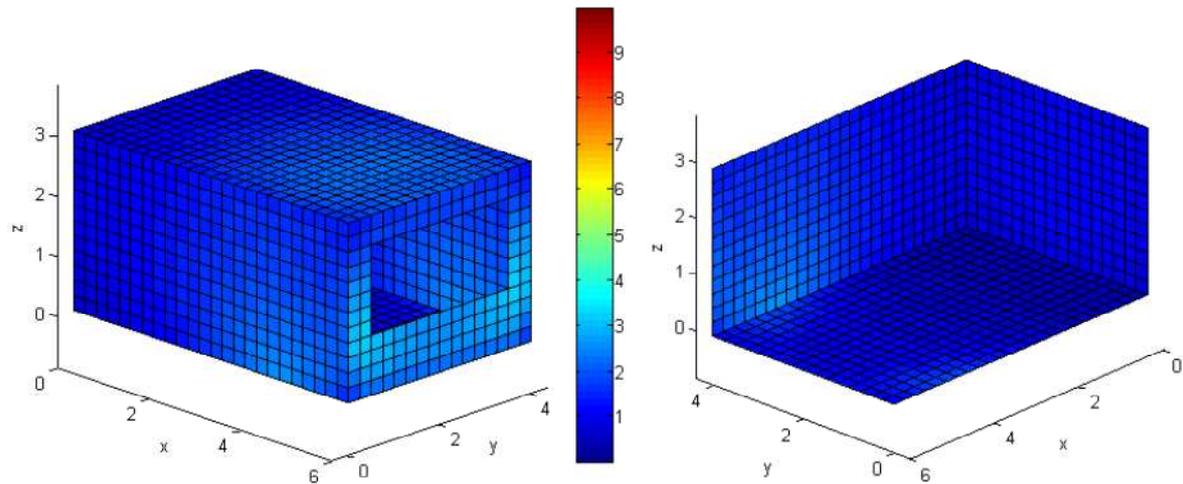


Figure 16. Composante de la radiosité due aux réflexions à l'intérieur seules (= Figure 15 - Figure 14)

5. Calcul de l'irradiance sur un capteur

Il est enfin possible de calculer le rayonnement reçu sur un capteur représenté par un plan orienté vers le haut. On place un capteur au centre de la pièce, à 1 m de hauteur. Le calcul se fait en utilisant la formule (26) :

$$I_{capt} = \sum_{j=1}^N F_{capt,j} B_j + \sum_{k=1}^{N_{ext}} F_{capt,k} B_k + F_{capt,ciel} E_{ciel} + I_{capt,soleil}$$

Il est possible d'identifier les différentes composantes du rayonnement incident sur ce capteur afin d'identifier la part d'importance en fonction des objets émettant. Pour la position de capteur choisie, ces résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Formulation	Composante	Valeur
$\sum_{j=1}^N F_{capt,j} B_j$	Réflexions sur les surfaces de la pièce	1,148 W/m ²
$\sum_{k=1}^{N_{ext}} F_{capt,k} B_k$	Réflexion sur le mur extérieur (ciel)	0,244 W/m ²
	Réflexion sur le mur extérieur (soleil)	1,674 W/m ²
$F_{capt,ciel} E_{ciel}$	Ciel direct	0 W/m ²
$I_{capt,soleil}$	Soleil direct	0 W/m ²
	TOTAL	3,066 W/m²

Le capteur ne voit pas directement ni le ciel, ni le soleil, ce qui explique les valeurs de rayonnement reçus par ces sources. Les sources les plus importantes pour ce capteur sont les parois intérieures de la pièce et le soleil réfléchi sur le mur extérieur.

Pour pouvoir analyser ce résultat, il est possible de le convertir en lux, en considérant l'approximation $1 \text{ W/m}^2 = 110 \text{ lux}$ (Littlefair 1988) (Vartiainen 1999), ce qui mène à une illumination du capteur de 337 lux, ce qui est inférieur à 400 lux (valeur qui garantit un confort minimum pour le travail de bureau). Dans le cas de figure que nous venons d'étudier (21 février à 10h), la lumière naturelle reçue sur le plan peut être insuffisante, et requérir un apport en lumière artificielle.

C. VARIATIONS DU RAYONNEMENT SUR UNE JOURNEE

Pour aller plus loin dans l'étude du rayonnement sur une pièce en milieu urbain, il devient intéressant de faire varier les différents paramètres du modèle. Un calcul sur une période de temps est notamment possible en bouclant sur l'heure ou la date du calcul, afin d'étudier les variations de radiosité.

Un changement de la date et de l'heure modifie la position du soleil dans le ciel, ce qui induit une variation de la puissance du rayonnement du soleil et du ciel, ainsi que la délimitation des surfaces éclairées par le soleil.

Dans le but d'étudier les variations d'importance des différents éléments émetteurs ou réfléchissants (soleil, ciel, réflexion sur le mur extérieur, réflexion sur les surfaces de la pièce) sur des capteurs à l'intérieur de la pièce, on se propose d'effectuer un calcul sur la durée d'une journée de travail (8h-16h) avec un pas de temps de 15 minutes, en choisissant le 21 décembre (journée la plus défavorable) et le 21 mars (trajet solaire moyen). Le modèle de ciel comporte le soleil et un ciel clair (sans nuages). L'illuminance est calculée sur trois capteurs (voir positions sur la Figure 17).

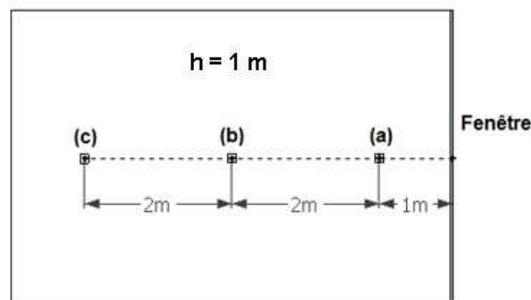


Figure 17. Position des capteurs

Les résultats présentés sur la Figure 18 sont exprimés en lux, c'est-à-dire en une valeur d'illuminance qui correspond à la lumière perçue par l'œil humain ; on utilise pour cela le facteur de conversion $1\text{W/m}^2 = 110\text{ lux}$. La valeur de 400 lux est représentée par une ligne, et peut être considérée comme un seuil de confort visuel pour le travail de bureau.

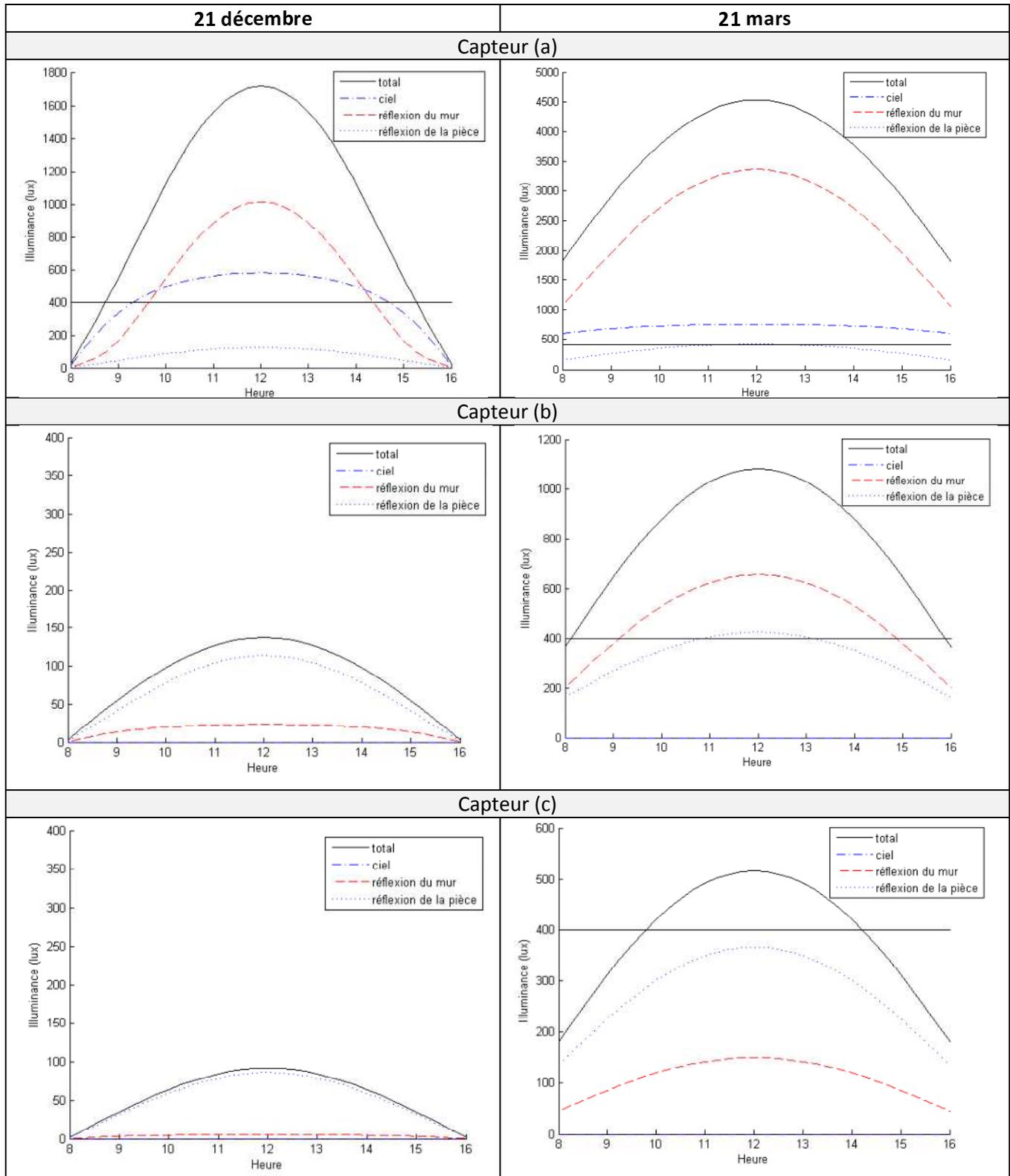


Figure 18. Illuminance sur trois capteurs le 21 décembre et le 21 mars entre 8h et 16h

Les résultats montrent que l'ensemble de la pièce est très insuffisamment éclairé le 21 décembre, sauf à proximité de la fenêtre, tandis qu'elle est suffisamment éclairée durant l'ensemble de la journée du 21 mars au milieu de la pièce (capteur (b)), et durant la moitié de la journée au fond de la pièce (capteur (c)).

La première remarque qui ressort des résultats provient de la grande différence observée entre un capteur à 1 m de la fenêtre (capteur (a)) et des capteurs plus éloignés de la fenêtre. Ce constat montre qu'un capteur situé à proximité de la fenêtre n'est pas un bon indicateur de la lumière entrant dans la pièce, celui-ci étant, contrairement au reste de la pièce, la plupart du temps suffisamment éclairé dans les conditions de ciel clair prises pour le calcul.

L'importance relative de chaque objet rayonnant vers les capteurs est très variable en fonction de la position de ces derniers ainsi que des conditions de calcul. On peut identifier les comportements suivants pour ces différentes sources :

- le rayonnement du ciel vu directement depuis les capteurs n'entre en compte que pour les capteurs situés près de la fenêtre ; en effet, la rue représentée dans le modèle ne permet en effet pas d'avoir une visibilité du ciel sur l'ensemble de la surface de la pièce ;
- l'importance de la réflexion du mur extérieur dépend largement de la visibilité ou non depuis le capteur d'une surface éclairée par le soleil. En effet, on peut voir sur la Figure 19 que la hauteur de l'ombre le 21 décembre est très haute sur le mur si bien que les capteurs (b) et (c) ne voient pas la partie ensoleillée du mur. Le 21 mars, en revanche, la hauteur de l'ombre est relativement constante à 3,5 m, et les trois capteurs peuvent voir une part plus ou moins grande de la partie ensoleillée du mur ;
- le rayonnement réfléchi par les parois de la pièce qui touchent les capteurs est relativement constant par rapport à la position de ces derniers (environ 100 lux reçus sur les capteurs le 21 décembre, environ 400 lux le 21 mars).

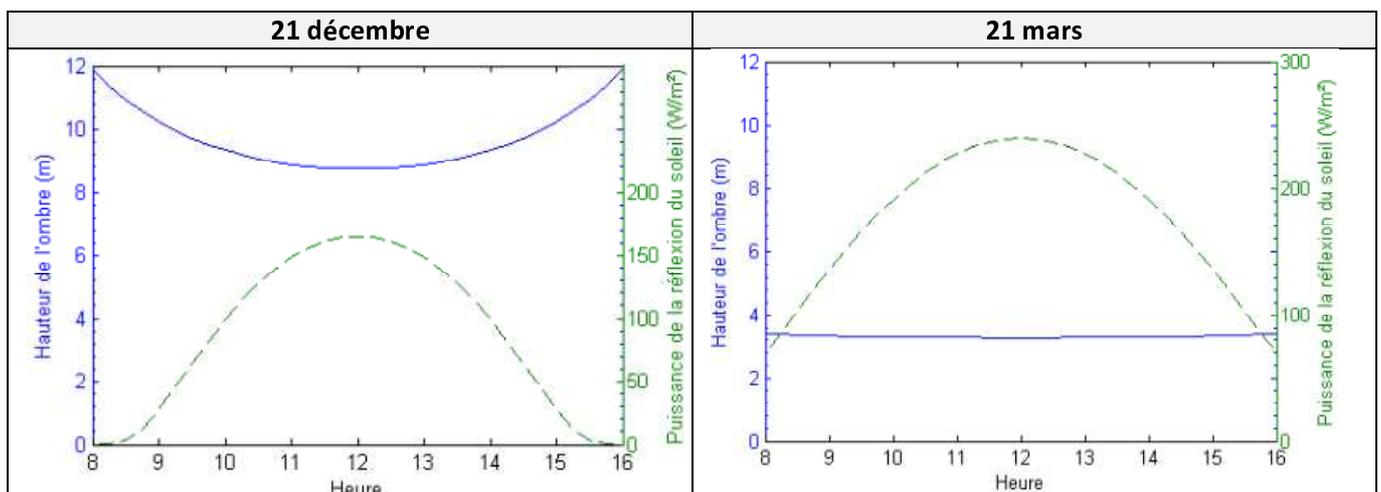


Figure 19. Hauteur de l'ombre et rayonnement du soleil réfléchi par le mur entre 8h et 16h, le 21 décembre et le 21 mars

D. VARIATIONS DU RAYONNEMENT SUR L'ANNEE

Pour aller plus loin dans l'étude du rayonnement sur la pièce en fonction du temps, il est possible d'effectuer des calculs sur l'année, avec différents angles d'analyse possibles. Seront présentés ici un calcul pour une heure de la journée fixe tout au long de l'année, avec des calculs effectués avec un

pas d'une journée, ainsi qu'un calcul du nombre d'heures par jour au dessus de 400 lux avec des calculs effectués sur un jour représentatif de chaque mois. On reprendra dans cette partie les trois capteurs définis dans la partie précédente ; les sources de rayonnement comportent le soleil et un ciel clair.

a) CALCUL A HEURE FIXE

Pour réaliser ce calcul, l'heure est arbitrairement fixée à 10h. Pour chaque jour de l'année, un calcul de la radiosité est effectué. Les résultats pour les trois capteurs sont présentés sur la Figure 20.

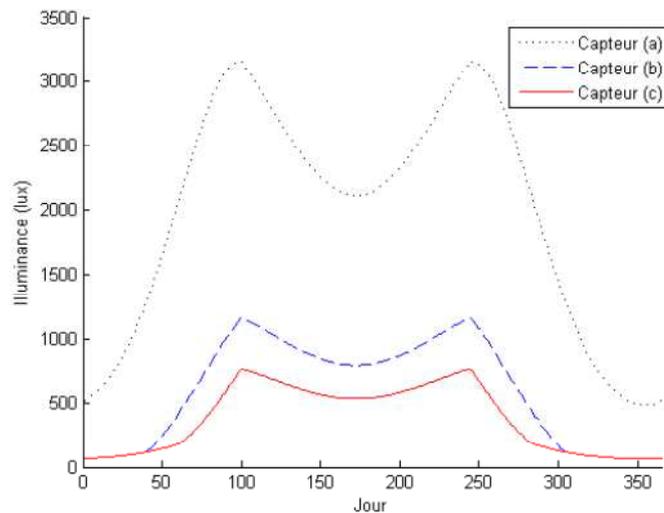


Figure 20. Illuminance à 10h, le jour 1 correspond au 1er janvier

On constate encore une fois que le capteur situé à proximité de la fenêtre (capteur (a)) est celui qui reçoit le rayonnement le plus important. Les capteurs (b) et (c) reçoivent pendant la période hivernale (jours 1 à 40 et 300 à 365) une quantité de lumière relativement proche. On vérifie bien sur chacune des courbes la symétrie par rapport au 21 juin (jour 172) ou par rapport au 21 décembre (jour 355), ce qui est logique considérant que le soleil a une hauteur dans le ciel symétrique par rapport aux solstices.

La remarque principale qui ressort des résultats présentés sur la Figure 20 est que l'illumination maximum dans l'année pour une heure donnée, dans des conditions de ciel clair, apparaît à une date variable qui ne correspond pas nécessairement au solstice d'été. En l'occurrence, ce maximum apparaît une première fois entre les mois de mars-avril, et une seconde fois – symétrie oblige – entre les mois d'août-septembre. Cette date n'est pas fixe, et varie selon l'heure du jour choisie pour les calculs. Ceci s'explique par le comportement du soleil dans le contexte urbain étudié.

Une variation de la journée, à heure fixe, revient à une modification de la position du soleil dans le ciel, et incidemment de la puissance du rayonnement émis par le ciel et le soleil. Nous avons vu plus haut que le soleil réfléchi sur le mur est une source majeure de rayonnement dans la pièce par ciel clair. L'importance de rayonnement solaire réfléchi dépend de trois paramètres : la hauteur solaire, qui caractérise la puissance du soleil sur une paroi perpendiculaire aux rayons de soleil, l'angle que font les rayons de soleil avec le mur (fonction de la hauteur et de l'azimut solaire), et la hauteur de l'ombre sur le mur (fonction de la hauteur et de l'azimut solaire).

Une hauteur solaire importante implique une puissance solaire forte mais un angle d'incidence grand, ce qui diminue la puissance du rayonnement incident. La multiplication donne un maximum pour une hauteur solaire d'environ 40°, avec un azimut proche de 0° (Figure 21 a). Parallèlement, la hauteur de l'ombre sur le mur diminue avec l'azimut solaire et avec la hauteur solaire. Pour que le mur tel qu'il a été défini soit totalement ensoleillé avec un azimut de 0°, la hauteur solaire doit être au minimum d'environ 50° (Figure 21 b). En combinant ces deux points, il vient qu'un soleil positionné avec un azimut autour de 0° et une hauteur solaire entre 40° et 50° permet d'avoir les meilleures conditions de réflexion du soleil. Le diagramme solaire pour Paris (Figure 10) montre que cette zone correspond à un soleil de midi entre mars et avril (ou août et septembre).

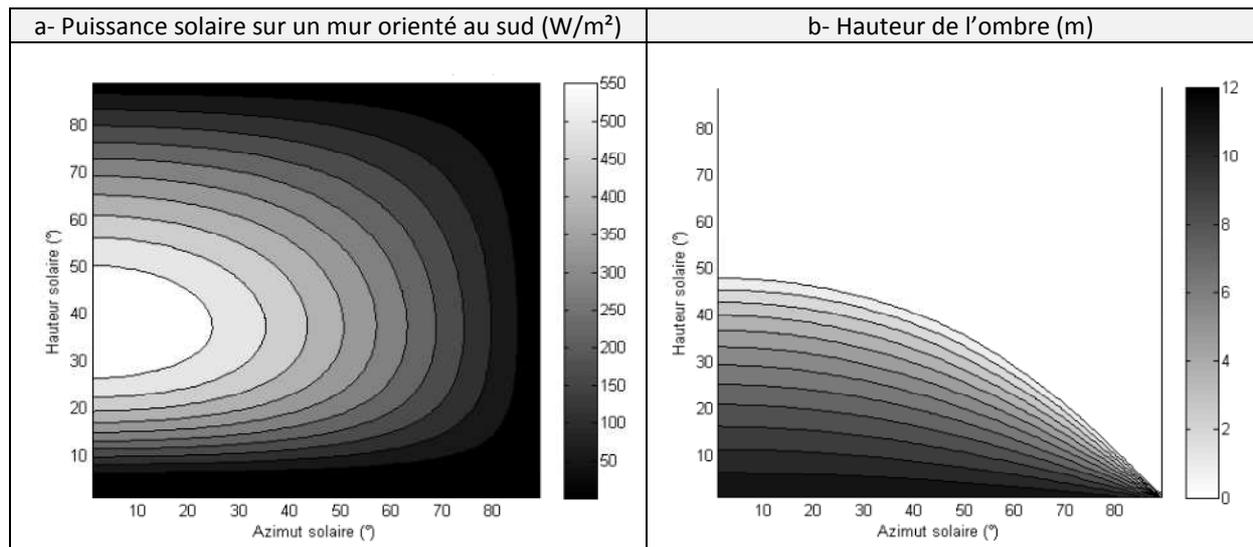


Figure 21 Variation du rayonnement solaire sur le mur extérieur orienté sud

b) CALCUL DU NOMBRE D'HEURES SUR UNE JOURNEE REPRESENTATIVE DE CHAQUE MOIS

Un calcul sur une heure fixe ne représente pas les variations au long de la journée. Les résultats présentés sur la Figure 22 correspondent aux nombres d'heures pour lesquelles une illuminance de 400 lux est reçue sur chacun des trois capteurs pour un jour représentatif de chaque mois. Ces jours représentatifs sont ceux publiés par (Klein 1977) et correspondent au jour moyen de chaque mois par rapport au rayonnement solaire sur une surface horizontale en milieu ouvert. Ces jour moyens ne sont pas valables de manière générale pour l'illuminance prise dans un intérieur en milieu urbain, mais ils sont relativement proches des jours moyens dans notre cas de géométrie.

Le calcul est réalisé par dichotomie pour chercher l'heure sur la plage 8h-12h pour laquelle l'illuminance passe sous 400 lux, en utilisant une propriété vue en III. B. : les courbes d'illuminance sont symétriques par rapport à 12h, et, sur la période 8h – 12h, l'illuminance reçue par chacun des trois capteurs est strictement croissante (cette propriété se vérifie globalement quelque soit le jour de l'année dans notre cas de géométrie) ; l'heure correspondant à une valeur d'illuminance de 400 lux sur un capteur est ainsi facile à calculer car atteinte au plus une fois sur cette période.

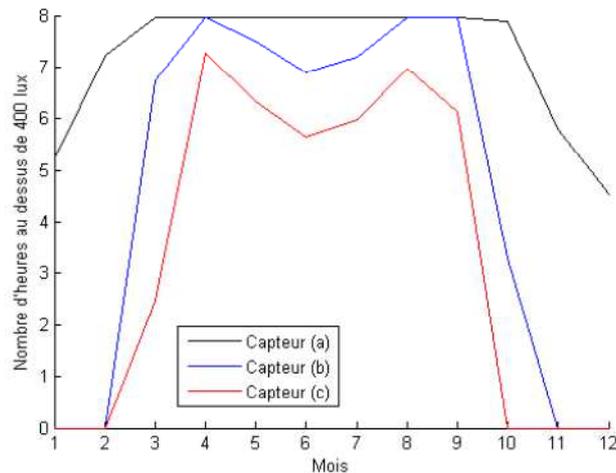


Figure 22. Nombre d'heures sur les jours représentatifs de chaque mois entre 8h et 16h pour trois capteurs

Les résultats en Figure 22 confirment les tendances vues dans le début du chapitre :

- l'illuminance est supérieure à 400 lux sur le capteur (a) proche de la fenêtre. Celui-ci ne représente pas la tendance globale d'illuminance dans le reste de la pièce ;
- le nombre d'heures avec une illuminance à 400 lux est sensiblement la même que l'on considère un capteur à 3 m ou à 5 m de la fenêtre, hormis pour les mois de mars et d'octobre ;
- le nombre d'heures au dessus de 400 lux, est inférieur au cœur de l'été par rapport aux mois d'avril et septembre (les pics d'illuminance ne sont pas en été, mais proche des équinoxes).

E. PRISE EN COMPTE DES CARACTERISTIQUES DU CLIMAT A LATITUDE EGALE

Jusqu'à maintenant, la modélisation a pris comme source de rayonnement un ciel clair, sans nuages. Un tel modèle ne nécessite que la latitude pour calculer la puissance rayonnante du ciel et du soleil. Deux villes à une même latitude peuvent cependant avoir des conditions climatiques moyennes très différentes au long de l'année. C'est ce que l'on observe par exemple entre les villes d'Ottawa (Canada) et Limoges (France), la première ayant un ciel plus dégagé en hiver que la seconde, et un été légèrement plus couvert.

Pour modéliser ces différences, on utilise des coefficients mensuels permettant de pondérer le rayonnement du soleil et du ciel par ciel clair, pour les deux cas de villes. Ces coefficients sont construits en faisant le rapport entre des données mesurées de rayonnement direct (soleil) et de rayonnement global (direct du soleil et diffus du ciel) provenant des bases de données de la NASA (NASA 2011), et les valeurs du modèle par ciel clair de Liu & Jordan (Vermeulen, Merino et Beckers 2011) (voir annexe A2). La Figure 23 présente ces coefficients pour Limoges et Ottawa et on observe bien des coefficients plus forts pour Ottawa durant la période hivernale, que ce soit pour le rayonnement du ciel ou du soleil, et des coefficients légèrement plus forts pour Limoges en été.

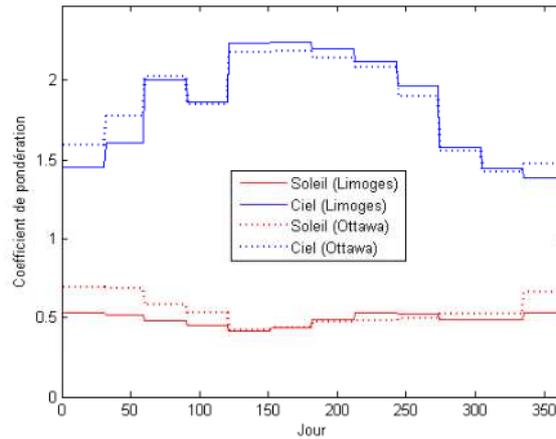


Figure 23. Coefficients de pondération mensuels du rayonnement du soleil et du ciel pour Ottawa et Limoges

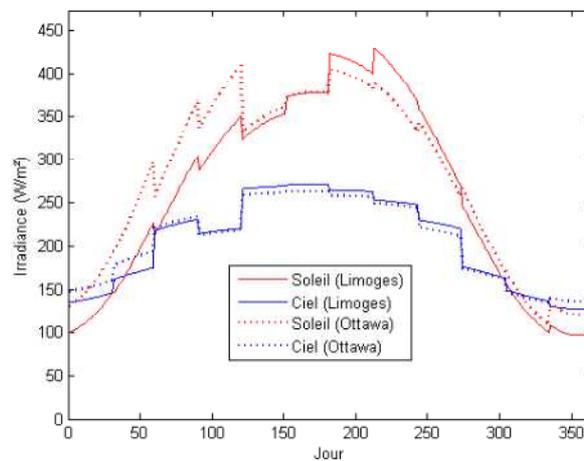


Figure 24. Rayonnement du soleil et du ciel pondérés pour Ottawa et Limoges sur une surface horizontale en milieu découvert, à midi

Les coefficients pour le rayonnement solaire sont en moyenne autour de 0,5 ; ceux concernant le rayonnement du ciel autour de 2. L'importance relative des différentes sources de rayonnement est de ce fait modifiée, et la visibilité du ciel devient une composante de premier plan dans l'illumination en intérieur, comme le montre la Figure 24.

Afin d'avoir une idée des différences que peuvent induire la prise en compte du climat, on reprend la méthode utilisée en III. D. b) pour calculer le nombre d'heures de chaque mois pour lesquelles l'illuminance sur un capteur à 3 m de la fenêtre (capteur (b)) est inférieure à 400 lux (les calculs sont effectués pour la période 8h-16h, heure solaire). Ce nombre d'heures, qui peut être interprété comme la durée pendant laquelle les lampes seront allumées, faute d'un éclairage naturel satisfaisant est calculée par la relation :

$$H_m(L < 400) = H_j(L < 400) * N_{jour}(m) \quad (27)$$

H_m	Nombre d'heures par mois sous un palier
$N_{jour}(m)$	Nombre de jours par mois (pour le mois m)
H_j	Nombre d'heures sur une journée représentative
L	Illuminance sur le capteur (lux)

La Figure 25 présente ces valeurs pour les villes de Limoges et Ottawa. La différence relative moyenne de Limoges par rapport à Ottawa est de 6,3%, avec des différences variables selon les mois ; par exemple, pour le mois de février temps nécessitant un éclairage artificiel est 50% plus important à Limoges qu'à Ottawa, où le ciel est plus dégagé.

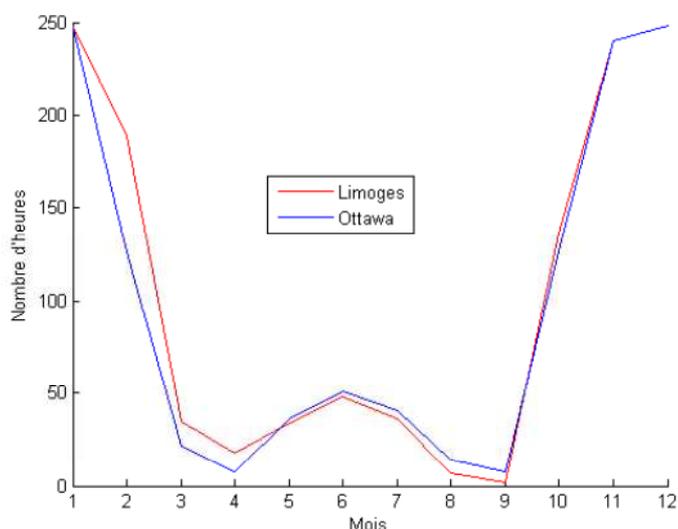


Figure 25. Nombre d'heures avec une illuminance inférieure à 400 lux sur le capteur (b)

Le rapport d'aspect (RA) se caractérise comme le rapport entre la hauteur h des bâtiments d'une rue, et la largeur d de la rue (annexe A1) (Oke 2004). L'étude réalisée pour Limoges et Ottawa précédemment est répétée pour différents rapports d'aspect (en modifiant la largeur de la rue ou la hauteur des bâtiments). Les résultats présentés sont l'illuminance moyenne sur l'année à 10h (I_{10h}), l'illuminance moyenne sur l'année à 12h (I_{12h}) et le nombre d'heures par an nécessitant la lumière artificielle sur l'année (nh_{lum}) ; ces valeurs sont calculées pour le capteur au centre de la pièce (capteur (b)), avec un pas de temps de calcul d'une journée. Pour chaque résultat, la différence relative entre Limoges par rapport à Ottawa est calculée.

Tableau 1. Illuminance et période nécessitant un éclairage artificiel en fonction du rapport d'aspect à Limoges et Ottawa

		I_{10h} (lux)	I_{12h} (lux)	nh_{lum} (h)
RA = 2,5 $h = 32,5$ m $d = 15$ m	Limoges	176	198	2509
	Ottawa	211	237	2354
	Δ (Limoges/Ottawa)	-16,6 %	-16,5 %	6,6 % , 155 h
RA = 2 $h = 25$ m $d = 12,5$ m	Limoges	210	243	2377
	Ottawa	250	292	2211
	Δ (Limoges/Ottawa)	-16 %	-16,8 %	7,5 % , 166 h
RA = 1,5 $h = 15$ m $d = 10$ m	Limoges	336	407	1875
	Ottawa	400	488	1687
	Δ (Limoges/Ottawa)	-16 %	-16,6 %	11,1 % , 188 h
RA = 1 $h = 10$ m $d = 10$ m	Limoges	523	649	1056
	Ottawa	618	774	897
	Δ (Limoges/Ottawa)	-15,4 %	-16,1 %	17,7 % , 159 h
RA = 0,5 $h = 6$ m $d = 12$ m	Limoges	738	868	233
	Ottawa	847	1004	194
	Δ (Limoges/Ottawa)	-12,9 %	-13,5 %	20,1 % , 39 h

Les résultats montrent une illuminance moyenne sur l'année à Limoges inférieure de 16 % à celle d'Ottawa au niveau du capteur (b). La différence entre les deux positions est sensiblement la même, que les valeurs soient calculées à 10h ou à 12h. La différence du besoin d'éclairage sur l'année, sur le créneau 8h-16h, est comprise entre 150h et 200h par an, représentant entre 5% et 7% du total d'heures considérées sur l'année.

Dans la réflexion relative à l'accès à la lumière naturelle par rapport au rapport d'aspect, plusieurs remarques sont possibles :

- un rapport d'aspect faible, correspondant à une plus grande visibilité du ciel, augmente de manière importante l'illuminance dans la pièce et diminue de ce fait le nombre d'heures nécessitant un éclairage artificiel. Le ciel est donc un élément prépondérant dans le cas d'une pièce orientée au Nord, lorsque les caractéristiques climatiques locales sont prises en compte (via les coefficients appliqués au rayonnement du soleil et du ciel) ;
- les différences relatives d'illuminance entre Limoges et Ottawa ne varient pas avec le rapport d'aspect, et restent autour de -15% ;
- La différence absolue du besoin d'éclairage sur l'année entre les deux villes est peu variable avec le rapport d'aspect avec une valeur comprise entre 150h et 200h (hormis pour un rapport d'aspect de 0,5 qui est proche d'un cas limite, avec des besoins en éclairage très faibles). On remarque également que le besoin d'éclairage à Ottawa pour un rapport d'aspect de 2,5 correspond environ au besoin d'éclairage à Limoges pour un rapport d'aspect de 2.

Pour conclure sur cette partie, les résultats en termes d'illuminance en fonction du rapport d'aspect montrent l'importance de la composante diffuse du ciel dans l'éclairage naturel d'une pièce orientée au nord. En revanche, la densité d'une ville étant souvent recherchée, il est possible, à besoin d'éclairage artificiel égal, d'avoir un rapport d'aspect, et donc une densité, plus grande à Ottawa qu'à Limoges, du fait d'un ciel hivernal plus dégagé.

Ces résultats restent à considérer avec un regard critique, les coefficients définis plus haut ne prenant en compte qu'un climat mensuel moyen, gommant les conditions extrêmes, notamment de ciel couvert, sans soleil, cas de figure où l'éclairage artificiel est systématique. La quantification de ces périodes avec des conditions météorologiques particulières apporterait une information supplémentaire qui préciserait les résultats de cette étude en distinguant par exemple un ciel constamment semi-couvert d'un ciel complètement couvert la moitié du temps.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le rayonnement naturel sur une ville est un phénomène à la fois complexe et sensible aux variations des différents paramètres qui caractérisent l'environnement urbain (disposition des bâtiments, couleur des murs, position géographique). La simulation d'un tel phénomène ne peut se faire sans une simplification géométrique et physique du contexte urbain, du soleil et du ciel.

Durant ce stage, le modèle StreetRad a été développé sous Matlab®. Il a pour but d'effectuer un calcul de l'irradiation naturelle dans une pièce intérieure placée dans un contexte urbain simple. Ce modèle, qui repose sur l'utilisation de la méthode de la radiativité, prend en compte les différentes réflexions du rayonnement entre la rue et la pièce et à l'intérieur de cette dernière.

Un exemple de calcul pour une pièce contenant une fenêtre orientée au nord faisant face à un autre bâtiment a été présenté. Il montre qu'au-delà des effets de masques, les bâtiments présents dans un contexte urbain peuvent jouer un rôle significatif dans l'apport de lumière en réfléchissant une partie du rayonnement solaire. Il a également été observé que les valeurs d'irradiation les plus fortes de l'année dans un intérieur apparaissent à des dates variables, autour des mois de mars-avril et août-septembre. On a enfin vu que la prise en compte des spécificités locales de couverts nuageux induit des variations notables entre un modèle de ciel clair et un ciel moyen ainsi qu'entre des ciels moyens pour des villes de même latitude. Ces remarques peuvent avoir un intérêt dans la conception architecturale, afin d'éviter les surchauffes en se protégeant des forts rayonnements, et pour profiter de l'énergie solaire dans la période de chauffage.

A l'heure de ce rapport, certains résultats de StreetRad (notamment les facteurs de forme) ont été validés en les comparant à d'autres logiciels comme Héliodon2®. La concordance des résultats avec des données mesurées (sur maquette ou taille réelle) n'a en revanche pas été testée. Aussi, le modèle peut servir pour comparer différents cas de figure et avoir une idée des ordres de grandeur en jeu, mais les valeurs finales sont à considérer avec un œil critique. Une comparaison avec d'autres logiciels (Daysim, Solène) en prenant les mêmes paramètres de modélisation permettrait de vérifier la concordance (ou les différences) entre les résultats obtenus, premier pas vers la validation du modèle.

L'application a été réalisée en privilégiant des temps de calcul courts qui rendent possibles les bouclages dans le temps, ce qui a conduit à limiter les possibilités du modèle à un certain nombre de paramètres (il n'est pas possible de « dessiner » sa propre scène). Une poursuite de la construction de l'application est possible en ajoutant de nouveaux paramètres tels que différents types de rues, ciel non uniforme, etc.

BIBLIOGRAPHIE

Beckers, B., et P. Beckers. «Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère.» *Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère*. 02 2011. www.heliodon.net.

«BREEAM v1/93.» Building Research Establishment Environmental Assessment Method, 1993.

Campbell, G., et J. Norman. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York: Springer, 1998.

Cross, S., et L. Wald. «Survey of the main databases providing solar radiation data at the ground level.» *23rd EARSeI Annual Symposium Remote sensing in transition*. Belgium, 2003.

Duffie, J.A., et W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc, 2006.

Dumortier, D., et ENTPE. «Description of solar resource products summary of benchmarking results examples of use.» MESOR project, 2009.

F. X. Sillion, C. Puech. *Radiosity & Global illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1994.

Furler, R.A. «Angular Dependence of Optical Properties of Homogeneous Glasses.» *ASHRAE Transactions* 97, n° 2 (1991).

Gates, D.M. *Biophysical Ecology*. 1st edition. Mineola: Dover Publications, 2003.

Hénon, A., P. Mestayer, D. Groleau, et J. Voogt. «High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign.» *Building and Environment*, 2011: 1747-1764.

Howell, J.R. *Thermal radiation heat transfert*. 2001. <http://www.me.utexas.edu/~howell/index.html>.

Joshi, M., R. L. Sawhney, et D. Buddhi. «Estimation of luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indore city in Mid Western India.» *Renewable energy*, 2007: 1363-1378.

Kämpf, J. *On the modeling and Optimisation of Urban Energy Fluxes, PhD thesis*. Lausanne, 2009.

Klein, S.A. «Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, solar energy laboratory.» *Solar Energy* 19 (1977): 325-329.

«LEED v.2.1.» *The Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*. U.S. Green Building Council, 2002.

Levinson, R., et H. Akbari. «Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete.» *Cement and Concrete Research* 32, n° 2002 (2002): 1679 – 1698.

Littlefair, P.J. «Measurements of the luminous efficacy of daylight.» *Lighting Research and Technology* 20, n° 4 (1988): 177-188.

Liu, B.Y.H., et R.C. Jordan. «The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.» *Solar Energy* 4, n° 3 (1960): 1-19.

Luther, Mark B. «Lighting instrumentation, measurement and performance reporting of Mabel - Australia.» *ISES Solar World Congress*. Kassel, 2011.

Mardaljevic, J., et M. Rylatt. «Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach.» *Energy and Buildings* 35 (2003): 27-35.

Merino, L., E. Antaluca, B. Akinoglu, et B. Beckers. «Solar energy inputs estimation for urban scales applications.» *SSB*. 2010.

METEOTEST. «METEONORM Version 6.x.» 2010.

NASA. 01 2011. <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/register.cgi>.

Oke, T. R. *Urban Observations*. Instruments and Methods of Observation Programme, IOM Report, Geneva: in press, 2004.

Page, J., M. Albuissou, et L. Wald. «The European solar radiation atlas : a valuable digital tool.» *Solar Energy* 71 (2001).

Perez, R., R. Seals, et J. Michalsky. «All-weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation.» *Solar Energy*, 1993: 235-245.

Sillion, F. X., et C. Puech. *Radiosity & Global illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1994.

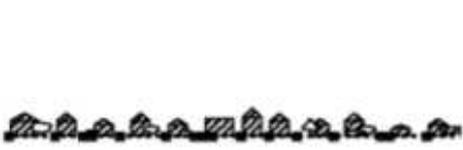
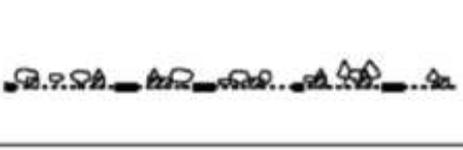
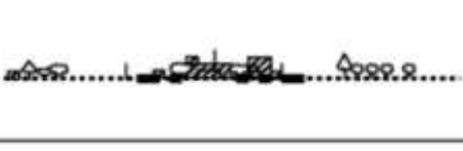
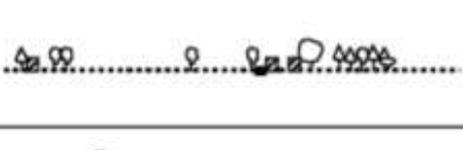
Vartiainen, E. «A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements.» *Renewable Energy* 20 (1999): 265-277.

Vermeulen, T., L. Merino, et B. Beckers. «Analysis of cloud distribution effect on daylighting in urban environment.» *ICSSC 2011*. Shanghai, 2011.

Walkenhorst, O., J. Luthier, C. Reinhart, et Timmer J. «Dynamic annual daylight simulations based on one-hour and one-minute means of irradiance data.» *Solar Energy* 72, n° 5 (2002): 385-395.

ANNEXES

A1. Classification des formes urbaines rangées dans l'ordre décroissant approximatif de leur capacité à impacter le climat local (vent, température, humidité). Source : (Oke 2004)

Urban Climate Zone, UCZ¹	Image	Roughness class²	Aspect ratio³	% Built (impermeable)⁴
1. Intensely developed urban with detached close-set high-rise buildings with cladding, e.g. downtown towers		8	> 2	> 90
2. Intensely developed high density urban with 2 – 5 storey, attached or very close-set buildings often of brick or stone, e.g. old city core		7	1.2 – 2.5	> 85
3. Highly developed, medium density urban with row or detached but close-set houses, stores & apartments e.g. urban housing		7	0.5 – 1.5	70
4. Highly developed, low density urban with large low buildings & paved parking, e.g. shopping mall, warehouses		5	0.05 – 0.2	75 - 95
5. Medium development, low density suburban with 1 or 2 storey houses, e.g. suburban housing		6	0.2 – 0.5, up to > 1 With tall trees	35 - 65
6. Mixed use with large buildings in open landscape, e.g. institutions such as hospital, university, airport		5	0.1 – 0.5, depends on trees	< 40
7. Semi-rural development with scattered houses in natural or agri-cultural area, e.g. farms, estates		4	> 0.05, depends on trees	< 10

Key to image symbols:  buildings;  vegetation;  impervious ground;  pervious ground

¹ A simplified set of classes that includes aspects of the scheme of Ellefsen (1990/91) plus physical measures relating to wind, thermal and moisture controls (columns at right).

² Effective terrain roughness according to the Davenport classification (Davenport et al., 2000).

³ Aspect ratio = z_p/W - related to flow regime types and thermal controls (solar shading and longwave screening). Tall trees increase this measure significantly.

⁴ Av. fraction of ground covered by built features (buildings, roads, paved and other impervious areas) the rest of the area is occupied by pervious cover. Permeability affects the ability to store moisture and hence the moisture status of the ground.