

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/350005713>

Développement d'une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain

Thesis · December 2020

CITATIONS

0

READS

107

1 author:



Antoine Bugeat

Strabag

6 PUBLICATIONS 35 CITATIONS

SEE PROFILE

Urban Physics Joint Laboratory
Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE RADIOSITÉ POUR L'ÉTUDE DU RAYONNEMENT SOLAIRE EN MILIEU URBAIN

Thèse de doctorat
Présentée et soutenue par

Antoine Bugeat

Le 8 décembre 2020 à Université de Pau et des Pays de l'Adour
Anglet, France

Membres du jury :

Christophe Le Niliot - Rapporteur
IUSTI UMR CNRS 7343
Université Aix Marseille, France

Daniel Meneveau - Rapporteur
XLIM UMR CNRS 7252
Université de Poitiers, France

Christophe Ménézo
LOCIE UMR CNRS 5271 - FédEsol CNRS 3344
Université Savoie Mont Blanc, France

Christian La Borderie
SIAME
Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

Benoit Beckers – Directeur de thèse
Urban Physics Joint Laboratory
Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

Eduardo Fernández – Codirecteur de thèse
Instituto de Computación
Universidad de la República, Uruguay

Table des matières

Résumé	vii
Introduction générale	xiii
Chapitre 1 - État de l'art	
Le Rayonnement Solaire dans l'Environnement Bâti	1
Résumé du chapitre	2
1.1. Rayonnement solaire et lumière naturelle : Concepts et définitions	3
1.2. Modèles de ciel	14
1.3. Les caractéristiques de l'environnement bâti	19
1.4. État de l'art des méthodes de calcul du rayonnement	30
1.5. Evaluation de l'éclairage naturel en architecture et urbanisme	42
1.6. Prise en compte des apports solaires en architecture et urbanisme	47
1.7. Conclusion	50
Chapitre 2 - Méthode	
Extension de la Radiosité Appliquée à l'Architecture et à l'Urbanisme	51
Résumé du chapitre	52
2.1. Modélisation des différents éléments de l'environnement	53
2.2. Calcul des facteurs de vue par lancer de rayons	68
2.3. Calcul des facteurs de vue étendus pour la prise en compte des échanges non-diffus	76
2.4. Système d'équations des irradiances	84
2.5. Conclusion	91
Chapitre 3 - Application	
Amélioration des Puits de Jour par Réflexion et Redirection de la Lumière Naturelle	93
Résumé du chapitre	94
3.1. Introduction	95
3.2. Méthode	98
3.3. Influence des propriétés des surfaces	104
3.4. Performances des systèmes de redirection des rayons du soleil	111
3.5. Variations avec différentes géométries et sous différents climats	116
3.6. Validation et comparaison des résultats avec RADIANCE	120
3.7. Conclusion	131
Chapitre 4 - Application	
Analyse de la Partie Réfléchie du Rayonnement Solaire dans la Ville de Cordoue	133
Résumé du chapitre	134
4.1. Introduction	135
4.2. Méthode	136
4.3. Échelle du quartier : simulations du rayonnement solaire	143
4.4. Échelle du quartier : résultats	148
4.5. Échelle de la rue : simulation du rayonnement solaire	151
4.6. Échelle de la rue : résultats	156
4.7. Discussion et Conclusion	163
Conclusions et perspectives	165
Bibliographie	169
Annexe	183
Listes des figures et tableaux	187
Nomenclature, acronymes et expressions courantes	195

Remerciements

Je souhaite par ces quelques mots, adresser mes remerciements aux personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse financée par la Communauté d'Agglomération du Pays Basque et réalisée au sein de la chaire « Architecture et Physique Urbaine ».

J'adresse tout d'abord mes remerciements à M. Christophe Ménézo, d'avoir accepté d'être le président de mon jury ainsi que M. Christophe Le Niliot et M. Daniel Meneveaux d'avoir accepté d'être rapporteurs de ces travaux. Je remercie également M. Christian La Borderie d'avoir accepté d'être membre du jury.

Mes profonds remerciements vont à mon directeur de thèse, Benoit Beckers, pour m'avoir offert la possibilité de réaliser ce travail passionnant. Un grand merci à mon co-directeur de thèse, Eduardo Fernandez, pour les compétences que tu as su me transmettre. Je vous remercie de m'avoir accueilli dans vos équipes. Merci également pour votre confiance, votre disponibilité, nos discussions et votre ouverture qui m'ont été un guide précieux à toutes les étapes.

Je remercie chaleureusement mes collègues et amis d'Anglet : Elena, Raphaël, Jairo, Nicolas, Urtza et Inès. Et de Montevideo : José, Ignacio et Jaime Roos. Merci pour votre aide, votre sympathie, et pour tous ces moments passés ensemble. Merci également aux membres de l'ISABTP et de Nobatek/INEF4 que j'ai pu côtoyer.

Je souhaite remercier tous mes amis qui m'ont accompagné et soutenu, de près ou de loin, durant ces trois années, notamment Youssef pour ta bonne humeur quotidienne sans faille. Une mention spéciale revient à Natalia pour ta patience et ton aide.

Enfin, je ne pourrais finir ces remerciements sans penser à ma famille dont l'affection et le soutien constants m'ont été d'un grand réconfort, comme toujours.

Résumé

Dans cette thèse, nous proposons une méthode de simulation performante du rayonnement solaire basée sur la méthode de radiosité. L'objectif est d'évaluer avec précision l'éclairage naturel et les apports solaires dans des milieux urbains denses pour guider la conception architecturale. Dans ce type d'environnement, les échanges par réflexion entre les différentes surfaces jouent un rôle prépondérant sur la distribution du rayonnement.

La méthode de radiosité est particulièrement adaptée dans ce contexte car elle prend directement en compte la totalité des inter-réflexions et le rayonnement sur l'ensemble de la scène. Cependant, elle n'est valable que pour des échanges diffus. Dans cette thèse, nous avons développé le concept de facteurs de vue étendus pour pouvoir considérer les réflexions spéculaires et les transmissions directes. Cet apport permet d'utiliser des modèles avec des niveaux de détail de matériaux plus élevés comprenant des vitrages, des miroirs ou tout autre élément avec des modèles de réflexions et de transmission autres que parfaitement diffus.

Un des problèmes les plus courants dans les milieux urbains denses est le manque de lumière naturelle. Le puits de jour est un concept architectural répandu dont le but est de permettre à la lumière de parvenir jusqu'au cœur des bâtiments d'habitation. Les améliorations des performances en éclairage naturel obtenues grâce à des interventions légères sont étudiées, notamment l'utilisation de matériaux avec une réflectance diffuse élevée et la mise en place de miroir. Les résultats montrent des bénéfices conséquents sur les quantités de lumière perçues avec l'emploi de ce type de matériaux. Des conditions d'éclairement satisfaisantes tout au long de l'année sont obtenues grâce à la redirection des rayons du soleil même pour des climats nuageux, comme à Bilbao, et à des hautes latitudes, comme à Stockholm.

Dans les environnements urbains, les bâtiments interagissent entre eux en bloquant et en refléchissant le rayonnement solaire, affectant ainsi leur comportement thermique. L'effet des propriétés des surfaces et la mise en place de dispositif d'ombrage sur la quantité et la distribution des apports solaires est étudié dans le centre-ville de Cordoue. Les résultats soulignent à la fois l'importance de la partie réfléchie du rayonnement solaire et la sensibilité de sa distribution vis-à-vis des propriétés des matériaux.

Grâce au concept des facteurs de vue étendus et à l'utilisation d'algorithme de lancer de rayons performants pour leur calcul, les principales barrières qui bloquaient l'utilisation de la méthode de radiosité dans le contexte de l'architecture sont levées. La précision et les avantages qu'offre la méthode développée pour l'étude du rayonnement solaire sont développés tout au long du document.

Resumen

En esta tesis, proponemos un método de simulación de la radiación solar basado en la radiosidad. El objetivo es desarrollar una herramienta que permita evaluar con precisión la luz natural y los aportes solares en entornos urbanos densos para guiar el diseño arquitectónico. En los entornos densos, las reflexiones entre las diferentes superficies desempeñan un papel clave en la distribución de la radiación.

El método de radiosidad resulta particularmente adecuado en este contexto porque permite calcular la radiación en una escena de forma global y teniendo en cuenta directamente la infinidad de reflexiones. Sin embargo, sólo tiene en cuenta los intercambios difusos. En esta tesis se desarrolla el concepto de factores de vista extendidos para poder incluir en el cálculo la reflexión especular y la transmisión directa. Esto permite el uso de modelos con un mayor nivel de detalle desde el punto de vista material, incluyendo vidrios, espejos o cualquier otro tipo de superficie con patrones de reflexión y transmisión no perfectamente difusos.

Uno de los problemas más comunes en los entornos urbanos densos es la falta de luz natural. Los patios de luz son un recurso arquitectónico habitual para aumentar la cantidad luz que llega al interior de edificios residenciales. Esta tesis investiga el potencial de mejora en la iluminación natural de estos edificios que puede lograrse con intervenciones ligeras en el patio de luz, tales como el uso de acabados de alta reflectancia difusa y la instalación de espejos. Las simulaciones muestran que ambos materiales aumentan de manera significativa la cantidad de luz recibida en los interiores. Gracias al uso de espejos inclinados, se obtienen condiciones de iluminación satisfactorias durante todo el año incluso en climas nublados, como Bilbao, y en altas latitudes, como Estocolmo.

En los entornos urbanos, los edificios interactúan entre sí bloqueando y reflejando la radiación solar, lo que afecta a su comportamiento térmico. Tomando como caso de estudio el centro de la ciudad de Córdoba, se investiga el impacto de las propiedades de las superficies y del uso de protecciones solares a escala urbana en la cantidad y distribución de las ganancias solares. Los resultados destacan la importancia de la componente reflejada de la radiación solar y la sensibilidad de su distribución a las propiedades de los materiales.

Esta tesis muestra que las principales barreras que bloqueaban el uso del método de la radiosidad en el contexto de la arquitectura pueden superarse gracias al concepto de factores de vista extendidos y el uso de algoritmos de alto rendimiento para el de lanzado de rayos para su cálculo. La precisión y las ventajas que ofrece el método desarrollado para el estudio de la radiación solar se desarrollan a lo largo del documento.

x

Abstract

In this thesis, we propose an efficient simulation method of solar radiation based on the radiosity method. The objective is to assess accurately daylighting and solar gains in dense urban environments to orient architectural design. In this type of environment, the exchanges by reflection between the different surfaces play a major role on the distribution of radiation.

The radiosity method is specially adapted in this context because it directly considers all the inter-reflections and radiation over the entire scene. However, it is only valid for diffuse exchanges. In this thesis, we have developed the concept of extended view factors to be able to consider specular reflections and direct transmissions. This contribution allows the use of models with higher levels of detail of materials including glazing, mirrors or any other element with reflections and transmission patterns other than perfectly diffuse.

One of the most typical problems in dense urban environments is the lack of daylight. Light wells are a common architectural concept that is designed to allow light to reach the core of residential buildings. Improvements in daylighting performance achieved through light interventions are being studied, including the use of materials with high diffuse reflectance and the installation of mirrors. The results show significant benefits on the amount of light perceived with the use of such materials. Satisfactory lighting conditions throughout the year are obtained thanks to the redirection of the sun's rays even in cloudy climates, as in Bilbao, and at high latitudes, as in Stockholm.

In urban environments, buildings interact with each other by blocking and reflecting solar radiation, thus affecting their thermal behavior. The effect of surface properties and shading devices on the amount and distribution of solar gain is studied in the city center of Cordoba. The results underline both the importance of the reflected part of solar radiation and the sensitivity of its distribution to material properties.

Thanks to the concept of extended view factors and the use of efficient ray-tracing algorithms for their calculation, the main barriers that blocked the use of the radiosity method in the context of architecture are removed. The accuracy and advantages offered by the method developed for the study of solar radiation are developed along the document.

Introduction générale

Contexte

Avec l'augmentation de la population et la croissance des zones urbanisées dans le monde, le modèle de « *Compact City* », ou ville dense, est reconnu comme une stratégie de développement durable nécessaire par plusieurs institutions majeures [Commission européenne 2007, Nations unies 2012]. La ville dense permet de limiter les conséquences néfastes de l'expansion urbaine sur l'environnement en préservant les terres agricoles et les forêts, en protégeant la biodiversité, et en réduisant les besoins de transport. Les villes denses ont également des effets positifs sur les aspects sociaux en réduisant la segmentation sociale et en offrant un meilleur accès aux infrastructures publiques [Burton 2000, Mouratidis 2019]. Une bonne gestion et un contrôle de l'urbanisation est un enjeu crucial pour le développement durable et la santé des populations [Frumkin 2002].

Le rayonnement solaire est une source d'énergie qui apporte à la fois lumière naturelle et chaleur dans les villes. Concevoir ou repenser les espaces urbains de manière dense et durable en tenant compte de ces deux aspects du rayonnement solaire est donc primordial.

L'un des problèmes majeurs rencontré dans les villes denses est l'accès réduit à la lumière naturelle [Compagnon 2004]. Or, recevoir un minimum de lumière naturelle est capital : cela permet la réduction de la consommation d'électricité liée à l'utilisation de l'éclairage artificiel [Mardaljevic 2009] et la lumière a des effets sur la santé en agissant sur le système circadien [Brown 2011, Aries 2013]. Certains concepts architecturaux traditionnels, comme les puits de jour, permettent de faire pénétrer la lumière naturelle au cœur des bâtiments pour y améliorer les conditions de vie [Kristl 1999].

La quantité de rayonnement solaire reçue à l'intérieur des villes joue un rôle direct sur leur comportement thermique impactant leurs besoins de chauffage ou de refroidissement et également leur potentiel solaire photovoltaïque [Beckers 2013, Compagnon 2004]. Pour contrôler et améliorer leur performance énergétique, il est d'abord nécessaire de comprendre leur comportement thermique par la mesure [Acuña Paz y Miño 2020, Garcia-Nevado 2020] ou la simulation [Aguerre 2019]. Ce problème implique un ensemble de phénomènes physiques où le rayonnement solaire joue un rôle clé. La façon dont se propage le rayonnement solaire dans la ville dépend à la fois de sa géométrie et des matériaux qui la composent [Strømann-Andersen 2011].

Le calcul du rayonnement solaire à l'intérieur d'une scène implique un modèle physique cohérent : la définition des sources, en l'occurrence le soleil et le ciel [Tregenza 1983, Perez 1993] ; les modes de réflexion et de transmission des éléments qui composent la scène [Nicodemus 1965] ; et enfin les méthodes pour calculer la propagation du rayonnement dans la scène. Ces dernières ont bénéficié des développements réalisés dans les domaines de la thermique, de l'infographie et de l'éclairage. On peut les regrouper en deux grandes familles : les méthodes basées sur une approche *indépendante du point de vue*, principalement représentées par la méthode de radiosité, et celles basées sur une approche *dépendante du point de vue*.

La méthode de radiosité est la plus ancienne. Elle se base sur deux hypothèses : l'environnement est discrétré en éléments de surfaces où les grandeurs sont constantes ; en second lieu, les émissions et les réflexions se produisent uniquement de manière diffuse. Un système linéaire peut être établi reliant le rayonnement sortant, ou radiosité, de chaque élément en fonction de leurs facteurs de vue réciproques. Cette approche a permis de calculer les échanges radiatifs pour des applications thermiques dans des cas géométriques simples à une époque où les outils informatiques n'étaient pas encore développés [Hottel 1933, Gebhart 1961]. Par la suite, elle a été utilisée dans le domaine de l'infographie et de l'éclairage [Goral 1984]. La méthode de radiosité trouve encore tout son intérêt pour des calculs radiatifs dans des bandes spectrales infrarouges où elle a la faculté de pouvoir considérer sans difficulté la totalité de l'environnement comme source émettrice [Talatizi 2020].

Dans le domaine de l'infographie et de l'éclairage, la radiosité a progressivement laissé place aux méthodes *dépendantes du point de vue* à la fin des années 1990 notamment grâce aux progrès informatiques. Elles consistent principalement à retracer les trajectoires empruntées par la lumière entre les sources et les points d'intérêt (point de vue ou capteur) en tenant compte des propriétés des surfaces qui composent la scène. C'est parce qu'elles traitent le problème depuis chaque point d'intérêt qu'elles sont dites *dépendantes du point de vue*. Parmi les plus connues d'entre elles, on retrouve le *path tracing* avec Monte-Carlo [Kajiya 1986, Dutré 1993], le *photon mapping* [Jensen 2001] et le *metropolis light transport* [Veach 1997]. La force de ces méthodes plus gourmandes en puissance de calcul réside dans le fait qu'elles n'ont pas de restriction sur les modes de réflexion et de transmission et qu'elles peuvent être utilisées dans des environnements géométriques complexes. Elles permettent de prendre en compte n'importe quel type d'effet optique et produisent des rendus réalistes de haute qualité.

La communauté de l'éclairage naturel s'est dirigée au fil du temps vers cette approche. Le programme RADIANCE, aujourd'hui référence dans le domaine et implanté dans la majorité des logiciels commerciaux [Ayoub 2020], repose sur ces méthodes. Elles offrent la possibilité d'étudier des cas où une précision importante de la distribution spatiale de la lumière est requise comme pour l'évaluation des performances de fenêtrages complexes [McNeil 2013, Schregle 2015] ou l'estimation des risques d'éblouissements [Jones 2017].

Motivations

Dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, les aspects lumineux et thermiques du rayonnement solaire sont considérés séparément à la fois du point de vue réglementaire et du point de vue calculatoire bien que les mêmes phénomènes physiques soient impliqués.

Le but général de cette thèse est de rassembler ces deux aspects du rayonnement solaire au sein d'une même méthode de calcul pour aider la conception architecturale.

Notre choix s'est porté vers le développement d'une méthode de radiosité. En effet, sa formulation classique possède plusieurs atouts fondamentaux pour les applications architecturales d'éclairage naturel et de thermique étudiées dans cette thèse :

La première application a pour objectif de trouver des systèmes permettant d'améliorer les performances d'éclairage naturel dans les puits de jour comme l'utilisation de matériaux réfléchissants et la mise en place d'un miroir. Dans ce contexte typique des environnements

urbains denses, l'essentiel de la lumière parvient dans les espaces intérieurs après de multiples réflexions. La méthode de radiosité se présente comme une solution performante pour cette étude impliquant des géométries simples. Son approche par discréétisation de l'environnement offre la possibilité de calculer sans surcoût les inter-réflexions diffuses entre les surfaces sur la totalité de la scène.

La deuxième application consiste à étudier le comportement thermique des bâtiments d'une rue selon les propriétés optiques des éléments qui la composent. Le calcul thermique multi-physique complet est effectué par la méthode des éléments finis. Dans ce contexte, plusieurs points viennent justifier l'usage de la méthode de radiosité pour le calcul du rayonnement solaire.

- Premièrement, le fait de travailler à partir d'un maillage la rend parfaitement adaptée. Les densités de flux solaire absorbées sont calculées directement sur la peau du maillage volumique.
- Deuxièmement, même si la géométrie des modèles étudiés est d'une complexité modérée, ce type d'application implique le calcul du rayonnement sur la totalité de la scène pouvant représenter un nombre de points d'intérêt important. L'utilisation de méthodes basées sur une approche *dépendante du point de vue* nécessiterait un calcul local pour chaque point d'intérêt, les rendant ainsi moins appropriées à ce type d'application. Grâce à l'approche de résolution globale *indépendante du point de vue* de la radiosité, le rayonnement est calculé directement sur la totalité des éléments de surface qui composent la scène.
- Troisièmement, le calcul thermique complet nécessite aussi le calcul du rayonnement dans le spectre infrarouge où la méthode de radiosité est particulièrement performante grâce à sa capacité de considérer la totalité de l'environnement comme source émettrice. Utiliser également la méthode de radiosité pour le rayonnement solaire permet d'avoir un environnement de calcul radiatif identique dans une démarche cohérente. Ainsi, les mêmes facteurs de vue peuvent être utilisés pour les deux calculs.

Cependant, le fait de ne pouvoir considérer que les réflexions diffuses limite la portée de la méthode de radiosité. Des éléments fondamentaux pour les questions d'éclairage naturel tels que les vitrages et les miroirs ne peuvent être pris en compte dans sa formulation classique. L'objectif de ce travail est de lever cette limitation en permettant la prise en compte des réflexions spéculaires et des transmissions directes. Initialement conçu pour des applications de rendu réaliste, le concept des facteurs de vue étendus proposé par [Sillion 1989, 1994] est utilisé. Les échanges par réflexions ou transmissions autres que diffuses sont abordés au moyen des facteurs de vue étendus calculés avec des techniques de lancer de rayons.

Structure de la thèse

Cette thèse est organisée en quatre chapitres :

- Le *chapitre 1* présente les différents concepts théoriques et dresse un état de l'art des modèles impliqués dans le processus de calcul du rayonnement solaire et d'évaluation de l'éclairage naturel et des apports solaires dans l'environnement bâti.

- Le *chapitre 2* présente la méthode de radiosité appliquée à l'architecture et à l'urbanisme. Les points suivants sont décrits en détail : la modélisation des éléments de l'environnement, le calcul des facteurs de vue étendus par lancer de rayons, et la résolution du système des irradiances.
- Le *chapitre 3* constitue la première application de la méthode en éclairage naturel dans le contexte particulier du puits de jour. L'objectif est d'améliorer les conditions d'éclairage naturel des espaces intérieurs grâce à l'utilisation de matériaux réfléchissants et la mise en place de miroirs à l'intérieur des puits de jour.
- Le *chapitre 4* constitue la seconde application. Le but est d'étudier l'impact de la partie réfléchie du rayonnement sur le potentiel solaire à l'échelle d'un quartier ainsi que sur les performances en éclairage naturel et le comportement thermique à l'échelle d'une rue. La méthode est combinée à un calcul thermique par éléments finis pour l'obtention des températures de surfaces et d'air intérieur.

Chapitre 1 – État de l'art

Le Rayonnement Solaire dans l'Environnement Bâti

1.1.	Rayonnement solaire et lumière naturelle : Concepts et définitions	3
1.1.1.	Grandeurs géométriques et radiatives	3
1.1.2.	Caractéristiques optiques	8
1.2.	Modèles de ciel	14
1.2.1.	Modèles de distribution des luminances et radiances du ciel	14
1.2.2.	Modèle « All-Weather » de [Perez 1993]	15
1.2.3.	Données météorologiques d'entrée	17
1.2.4.	Modèles d'efficacités lumineuses de [Perez 1990]	17
1.3.	Les caractéristiques de l'environnement bâti	19
1.3.1.	Éléments opaques diffus	19
1.3.2.	Éléments opaques spéculaires	20
1.3.3.	Les vitrages : réflexion spéculaire & transmission directe	22
1.3.4.	Les textiles : réflexion diffuse & transmission directe et diffuse	28
1.4.	État de l'art des méthodes de calcul du rayonnement	30
1.4.1.	L'équation du rendu	30
1.4.2.	« Path-tracing » avec Monte-Carlo	31
1.4.3.	Radiosité	35
1.5.	Evaluation de l'éclairage naturel en architecture et urbanisme	42
1.5.1.	Indicateurs statiques	42
1.5.2.	Indicateurs dynamiques	42
1.5.3.	A propos des seuils d'éclairement	43
1.6.	Prise en compte des apports solaires en architecture et urbanisme	47
1.6.1.	Méthodes statiques et réglementations thermiques	47
1.6.2.	Simulations Thermiques Dynamiques et méthodes nodales avec EnergyPlus	47
1.6.3.	L'approche éléments-finis	48
1.7.	Conclusions	50

Résumé du chapitre

Le calcul de l'éclairage naturel et des apports solaires nécessite l'utilisation d'un ensemble de modèles et de méthodes provenant de différents domaines. Ce chapitre dresse un état de l'art des principaux concepts impliqués dans le processus :

- La section 1.1 présente les grandeurs géométriques et radiatives, ainsi que les caractéristiques optiques des matériaux utilisés tout au long du document.
- La section 1.2 présente les modèles de ciel, les données météorologiques d'entrée nécessaires à leur définition et les modèles d'efficacité lumineuse. Le modèle de ciel « All-weather » de [Perez 1993] et les modèles d'efficacité lumineuse de [Perez 1990] sont expliqués en détail.
- La section 1.3 présente les principales caractéristiques optiques des éléments rencontrés dans l'environnement bâti ainsi que les différents modèles de réflexion et de transmission existants.
- La section 1.4 présente les deux principales méthodes de calcul numérique du rayonnement : les méthodes basées sur le lancer de rayon, plus précisément le *path-tracing* avec Monte Carlo utilisé par le moteur de calcul RADIANCE, et la méthode de la radiosité, développée dans cette thèse.
- La section 1.5 concerne les méthodes d'évaluation de l'éclairage naturel. Les différents indicateurs servant à évaluer les performances d'un espace sont présentés. Une analyse est faite sur les seuils d'éclairement à considérer.
- La section 1.6 présente les différents travaux mettant en avant l'influence du rayonnement solaire sur l'équilibre thermique des bâtiments et plus particulièrement au sein des environnements urbains.

I.I. Rayonnement solaire et lumière naturelle : Concepts et définitions

L'objectif de cette section est de définir les notions physiques utilisées pour quantifier les phénomènes radiatifs. Toutes les dénominations et les notations sont basées sur la terminologie de la Commission Internationale de l'Éclairage [CIE 2016].

I.I.I. Grandesurs géométriques et radiatives

Angle solide

$$\omega \quad [\text{sr}]$$

Un angle solide ω formé par un objet (Figure 1.1), depuis un point P , correspond à l'aire de la projection de cet objet sur une sphère de rayon unitaire et de centre P . L'aire totale d'une sphère de rayon unitaire est égale à 4π , un angle solide est donc compris entre 0 sr et 4π sr.

Pour la surface contenant le point P , l'hémisphère supérieur Ω^+ désigne l'hémisphère situé dans la direction de la normale de cette surface, c'est-à-dire côté *recto*, et l'hémisphère inférieur Ω^- désigne l'autre hémisphère.

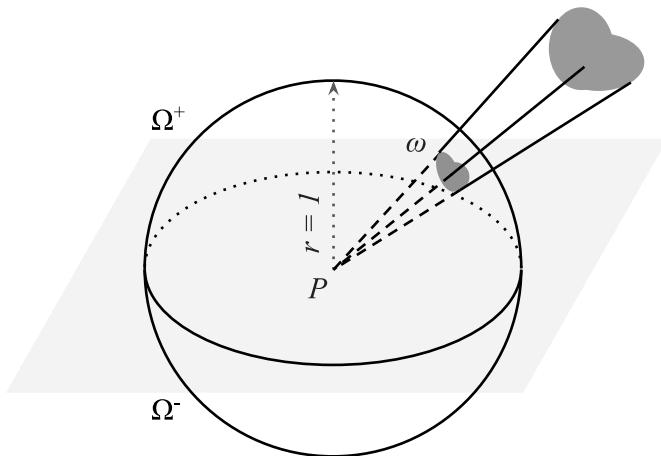


Figure 1.1: Représentations de l'angle solide d'un objet quelconque depuis le point P d'une surface et des deux hémisphères supérieur Ω^+ et inférieur Ω^- .

$$d\omega \quad \text{Angle solide différentiel}$$

Les coordonnées sphériques sont utilisées pour la définition des grandeurs radiométriques. L'*angle solide différentiel* $d\omega$ (Éq. 1.1) est défini dans une direction identifiée par la colatitude θ (ou angle polaire, ou angle zénithal), et la longitude φ (ou azimuth) (Figure 1.2). L'*angle solide différentiel* $d\omega$ correspond à son aire sur la sphère de rayon unitaire qui est égale à :

$$d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi \quad 1.1$$

La projection de cet angle solide différentiel sur le plan tangent à la surface contenant le point P est égale à $\cos\theta d\omega$. La projection d'un hémisphère sur sa base Ω' (Éq. 1.2) est égale à :

$$\begin{aligned}\Omega' &= \int_{\Omega} \cos\theta d\omega \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta d\omega \\ &= \pi\end{aligned}\tag{1.2}$$

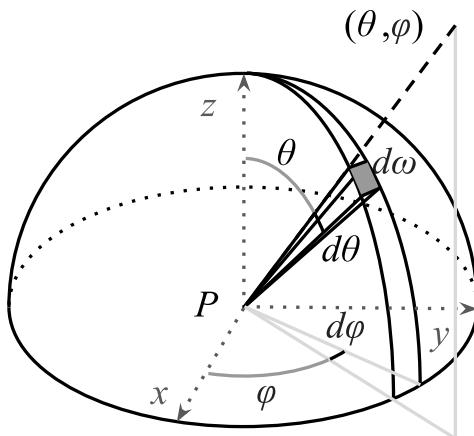


Figure 1.2 : Représentation d'un angle solide différentiel $d\omega$ en coordonnées sphériques.

Longueur d'onde

$$\lambda \quad [\text{nm}]$$

Le rayonnement est un transport d'énergie se produisant sous forme de déplacements de photons. Il peut aussi être défini comme un champ d'ondes électromagnétiques. Le rayonnement peut être décomposé en fonction des différentes longueurs d'ondes λ .

$$\lambda_e \quad \text{Spectre solaire :} \quad 100 - 4\,000 \text{ nm}$$

La longueur d'onde du rayonnement produit par le soleil reçu à la surface de la Terre s'étend sur un spectre compris entre 100 et 4 000 nm (Figure 1.3). L'intégralité de ce spectre est englobée dans la plage du rayonnement thermique (100 – 100 000 nm). Cela signifie que l'exposition au rayonnement solaire d'un élément influe sur son équilibre énergétique et donc sa température. Les échanges par rayonnement thermiques avec des longueurs d'onde hors du spectre solaire énergétique ne sont pas considérées ici. Les grandeurs radiatives utilisées dans ce document se rapportant au rayonnement compris dans ce spectre sont indiquées e .

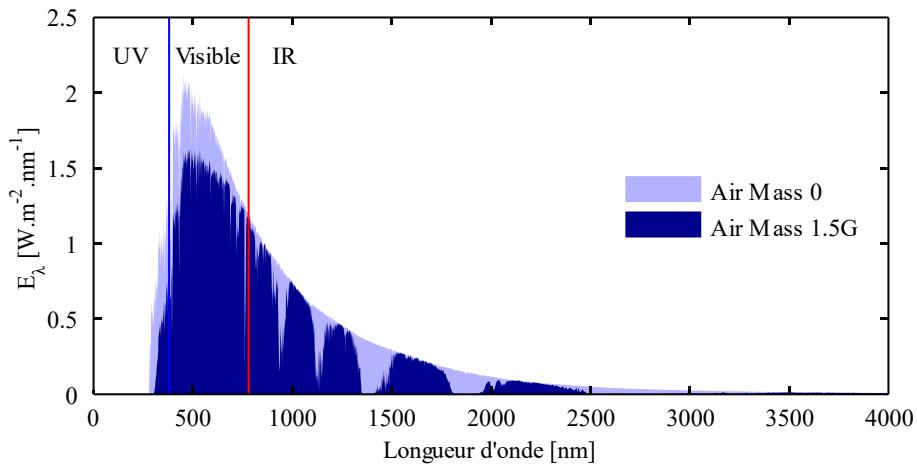


Figure 1.3 : Irradiance solaire spectrale extraterrestre (Air Mass 0) et irradiance solaire spectrale à la surface de la terre (Air Mass 1.5G) [ASTM G173-03].

$$\lambda_v \quad \text{Spectre visible :} \quad 380 - 780 \text{ nm}$$

L’œil humain est capable de percevoir le rayonnement électromagnétique avec une longueur d’onde comprise entre 380 et 780 nm. On appelle *lumière*, tout rayonnement électromagnétique présent dans ce spectre, et *lumière naturelle*, la partie du rayonnement solaire produite dans ce spectre.

Dans le domaine visible, les grandeurs radiatives sont quantifiées avec des unités photométriques, différentes des unités énergétiques. Le flux énergétique et le flux lumineux sont respectivement quantifiés par le Watt [W] et le lumen [lm]. Avec la fonction d’efficacité lumineuse spectrale (Figure 1.4), il est possible de passer des unités énergétiques aux unités photométriques. L’œil humain n’est pas également sensible à toutes les longueurs d’onde du spectre. La sensibilité maximale de l’œil est atteinte pour un rayonnement émis à une longueur d’onde de 555 nm. A cette longueur d’onde, l’efficacité lumineuse est égale à 683 lm/W. Dans ce document, les grandeurs radiatives lumineuses sont quantifiées avec les unités photométriques et sont indiquées ν .

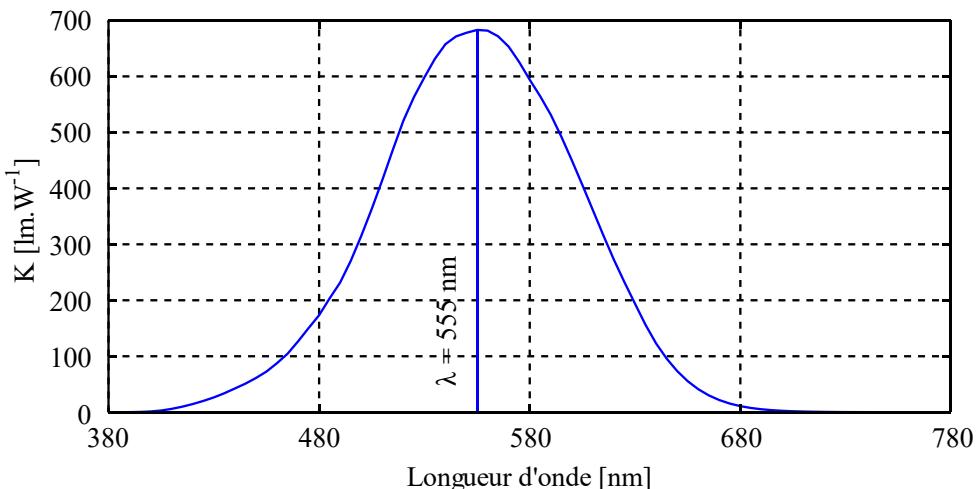


Figure 1.4 : Efficacité lumineuse spectrale $K(\lambda)$ [ISO/CIE 2019].

Énergie

$$Q_e \quad [\text{J}] \quad \text{Énergie rayonnante}$$

$$Q_v \quad [\text{lm.s}] \quad \text{Quantité de lumière}$$

L'énergie rayonnante (Éq. 1.3 et 1.4) est l'énergie produite par un nombre N_p de photon, et intégrée sur toutes les longueurs d'onde. L'énergie produite par un seul photon est fonction de la longueur d'onde et est obtenue avec la formule ci-dessous faisant intervenir la *constante de Planck* $h = 6.63 \times 10^{-34}$ [J.s] et la *vitesse de la lumière* $c = 299\,792\,458$ [m.s⁻¹].

$$Q_e = \int_{100}^{4000} N_{p,\lambda} e_\lambda d\lambda \quad 1.3$$

$$Q_v = \int_{380}^{780} N_{p,\lambda} e_\lambda K_\lambda d\lambda \quad 1.4$$

Avec, $e_\lambda = \frac{hc}{\lambda}$

Pour calculer la quantité de lumière, il est nécessaire de pondérer l'énergie rayonnante selon la sensibilité de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde du rayonnement $K(\lambda)$.

Flux

$$\Phi_e \quad [\text{W ; J.s}^{-1}] \quad \text{Flux énergétique}$$

$$\Phi_v \quad [\text{lm ; cd.s}] \quad \text{Flux lumineux}$$

Un flux (Éq. 1.5) est une puissance reçue, émise, réfléchie, transmise ou absorbée sous forme de rayonnement.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad 1.5$$

Intensité

$$I_e \quad [\text{W.sr}^{-1}] \quad \text{Intensité énergétique}$$

$$I_v \quad [\text{lm.sr}^{-1}] \quad \text{Intensité lumineuse}$$

Une intensité (Éq. 1.6) est un flux par unité d'angle solide.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad 1.6$$

Irradiance

$$E_e \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad \text{Irradiance}$$

$$E_v \quad [\text{lx ; lm.m}^{-2}] \quad \text{Éclairement}$$

L'irradiance et l'éclairement (Éq. 1.7), sont aussi appelées *éclairement énergétique* et *lumineux* en radiométrie et en photométrie. L'irradiance représente le flux reçu par unité de surface. L_i correspond à la radianc ou luminance incidente.

$$E = \frac{d\Phi_i}{dA} = \int_{\Omega^+} L_i \cos \theta_i d\omega \quad 1.7$$

Densité de flux absorbé

$$A \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

La densité de flux absorbé (Éq. 1.8) correspond à la partie du flux radiatif par unité de surface reçue par un élément qui n'est ni réfléchi ni transmis.

$$A = \frac{d\Phi_a}{dA} \quad 1.8$$

Exitance

$$M_e \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad \text{Exitance énergétique}$$

$$M_v \quad [\text{lm.m}^{-2}] \quad \text{Exitance lumineuse}$$

L'exitance (Éq. 1.9) représente le flux par unité de surface émis par une source.

$$M = \frac{d\Phi_{em}}{dA} \quad 1.9$$

Radiosité

$$B_e \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad \text{Radiosité}$$

$$B_v \quad [\text{lm.m}^{-2}] \quad \text{Luminosité}$$

La radiosité (Éq. 1.10) représente le flux sortant par unité de surface (indicateur o pour « outgoing ») émis, réfléchi et transmis [Sillion 1994]. Cette grandeur n'est pas présente dans la terminologie de la CIE mais c'est une grandeur clé des concepts de calcul présentés. La méthode de radiosité partage le même nom car c'est cette grandeur qui y est calculé.

$$B = \frac{d\Phi_o}{dA} = \int_{\Omega^+} L_o \cos \theta_o d\omega \quad 1.10$$

Radianc

$$L_e \quad [\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}] \quad \text{Radianc}$$

$$L_v \quad [\text{lm.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}] \quad \text{Luminance}$$

La radianc (Éq. 1.11) représente le flux rayonnant par unité de surface et dans la direction donnée par unité d'angle solide.

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos \theta dA d\omega} \quad 1.11$$

1.1.2. Caractéristiques optiques

Réflectance et Transmittance

ρ	[-]	Réflectance
τ	[-]	Transmittance

La réflectance (Éq. 1.12) d'un élément représente le rapport entre le flux réfléchi par l'élément $d\Phi_r$ et le flux reçu par cet élément $d\Phi_i$.

$$\rho = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} \quad 1.12$$

La réflectance varie selon la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique. C'est pourquoi la réflectance d'un même élément peut être différente dans le spectre lumineux et dans le spectre solaire. Il existe au total neuf types de réflectances [Nicodemus 1977] définies selon trois types d'angle solide d'incidence et de réflexion : directionnel, conique ou hémisphérique.

La transmittance (Éq. 1.13) est une grandeur similaire à la réflectance et les mêmes concepts cités précédemment s'y appliquent. La transmittance d'un élément représente le rapport entre le flux radiatif transmis à travers l'élément $d\Phi_t$ et le flux radiatif reçu par cet élément de surface $d\Phi_i$.

$$\tau = \frac{d\Phi_t}{d\Phi_i} \quad 1.13$$

BRDF, BTDF et BSDF

f_r	[sr ⁻¹]	BRDF
f_t	[sr ⁻¹]	BTDF
f	[sr ⁻¹]	BSDF

La réflectance d'un élément quelconque peut varier selon la direction du rayonnement incident et la direction du rayonnement réfléchi. La fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle appelée *BRDF* (Éq. 1.14) est la plus générale et permet d'englober toutes les possibilités de direction d'incidence et de réflexion. La *BRDF* f_r , pour « *Bidirectional Reflectance Distribution Function* », permet de caractériser la réflexion d'une surface selon les directions d'incidence et de réflexion. Elle est notée ρ dans la terminologie de la CIE mais, ici, elle est changée en f_r pour éviter des confusions entre la BRDF et la réflectance. Chaque direction est définie par deux variables θ et φ , la BRDF est donc une fonction de 4 variables qui inclut alors la totalité des directions d'incidence et de réflexion possibles [Nicodemus 1965]. La BRDF pour une direction d'incidence (θ_i, φ_i) et pour une direction de réflexion (θ_r, φ_r) données est égale au rapport entre la luminance réfléchie et l'éclairement produit par le rayon incident.

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad 1.14$$

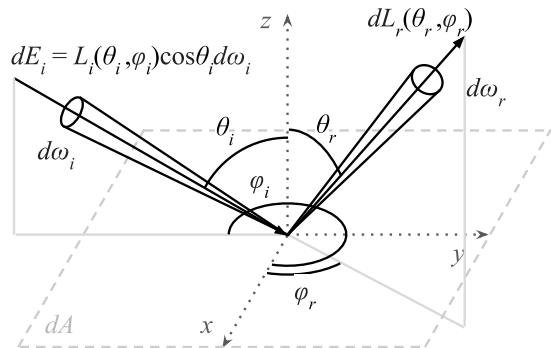


Figure 1.5 : Représentation géométrique des rayons incident et réfléchi pour la définition d'une BRDF.

La BTDF f_t , pour « Bidirectional Transmittance Distribution Function » (Éq. 1.15), est l'équivalent de la BRDF pour la transmission.

$$f_t(\theta_i, \varphi_i; \theta_t, \varphi_t) = \frac{dL_t(\theta_t, \varphi_t)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_t(\theta_t, \varphi_t)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad 1.15$$

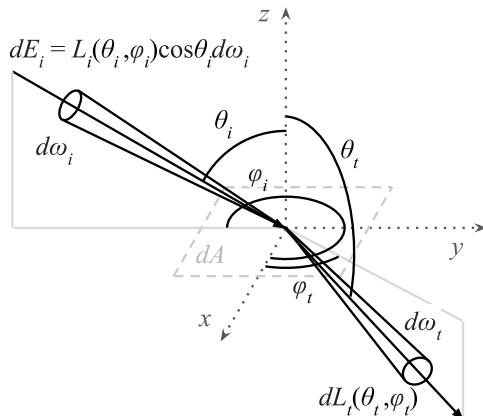


Figure 1.6 : Représentation géométrique des rayons incident et transmis pour la définition d'une BTDF.

La BSDF f_t , pour « Bidirectional Scattering Distribution Function » (Éq. 1.16), est la combinaison de la BRDF et de la BTDF prenant en compte à la fois la réflexion et la transmission [Asmail 1991].

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) + f_t(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) \quad 1.16$$

Des modèles de BRDF et de BTDF considérés comme physiquement valides doivent répondre à certaines propriétés :

- *Réciprocité* : aussi appelée *réciprocité d'Helmholtz*. La capacité d'une surface à réfléchir ou à transmettre doit être invariable si l'on change le sens de propagation (Éq. 1.17 et 1.18).

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = f_r(\theta, \varphi, \theta_i, \varphi_i) \quad 1.17$$

$$f_t(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = f_t(\theta, \varphi, \theta_i, \varphi_i) \quad 1.18$$

- *Conservation de l'énergie*: Cela signifie que le flux total sortant d'une surface, par réflexion et transmission, doit être inférieur ou égal au flux total incident.

Réflectance et transmittance diffuse

ρ_d	[-]	Réflectance diffuse
τ_d	[-]	Transmittance diffuse

La réflexion parfaitement diffuse, dite *Lambertienne*, correspond à la réflexion d'un rayon incident par un élément uniformément dans toutes les directions. La *réflectance diffuse* ρ_d (Éq. 1.19) représente le ratio entre le flux réfléchi de manière diffuse et le flux incident. Elle est indépendante de la direction d'incidence et de la direction de réflexion. La relation entre la BRDF et la réflectance diffuse pour ce type de réflexion s'écrit :

$$\begin{aligned} \rho_d &= \frac{d\Phi_{r,dif}}{d\Phi_i} \\ &= \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r) dA \int_{\Omega^+} \cos \theta_r d\omega_r}{dE_i(\theta_i, \varphi_i) dA} \\ &= f_{r,dif} \int_{\Omega^+} \cos \theta_r d\omega_r \\ &= \pi f_{r,dif} \end{aligned} \quad 1.19$$

Comme pour la réflexion, la transmission parfaitement diffuse correspond à la transmission d'un rayon incident à travers un élément uniformément dans toutes les directions. La *transmittance diffuse* τ_d (Éq. 1.20) représente le rapport entre le flux transmis de manière diffuse et le flux incident et elle est indépendante de la direction d'incidence et de transmission. La même relation entre la BRDF et la réflectance d'un élément réfléchissant de manière diffuse est valable pour la BTDF et la transmittance diffuse.

$$\tau_d = \frac{d\Phi_{t,dif}}{d\Phi_i} \quad 1.20$$

Réflectance spéculaire et transmittance directe

ρ_r	[-]	Réflectance spéculaire
τ_r	[-]	Transmittance directe

On parle de réflexion spéculaire, ou régulière, lorsqu'un rayon incident est réfléchi par une surface dans l'unique direction spéculaire. Les miroirs produisent ce type de réflexion. Pour le cas d'une surface réfléchissant de manière parfaitement spéculaire, la direction de la réflexion spéculaire est définie en fonction de la direction d'incidence selon la loi de Snell-Descartes (Éq. 1.21).

$$\begin{cases} \theta_{r,spec} = \theta_i \\ \varphi_{r,spec} = \varphi_i \pm \pi \end{cases} \quad 1.21$$

La *réflectance spéculaire* ρ_r (Éq. 1.22) représente le rapport entre le flux réfléchi dans la direction spéculaire et le flux incident reçu dans la direction incidente.

$$\rho_r = \frac{d\Phi_{r,spec}}{d\Phi_i} \quad 1.22$$

La relation entre la BRDF d'une surface spéculaire idéale et sa réflectance spéculaire s'écrit en faisant intervenir une double distribution de Dirac $\delta(x)$ non-nul pour $x=0$ et dont l'intégrale vaut 1 [Nicodemus 1977] (Éq. 1.23).

$$f_{r,spec}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \rho_r 2\delta(\sin^2 \theta_r - \sin^2 \theta_i) \delta(\varphi_r - \varphi_i \pm \pi) \quad 1.23$$

Pour une surface idéale spéculaire, la réflectance spéculaire peut aussi être définie sous la forme suivante mettant en relation la luminance réfléchie et la luminance incidente (Éq. 1.24).

$$\begin{aligned} L_r(\theta_{r,spec}, \varphi_{r,spec}) &= \int_{\Omega_i^+} f_{r,spec}(\theta_i, \varphi_i; \theta_{r,spec}, \varphi_{r,spec}) L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \rho_r 2\delta(\sin^2 \theta_{r,spec} - \sin^2 \theta_i) \cos \theta_i \sin \varphi_i \\ &\quad L_i(\theta_i, \varphi_i) \delta(\varphi_r - \varphi_i \pm \pi) d\varphi d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \rho_r L_i(\theta_i, \varphi_i) \delta(\sin^2 \theta_{r,spec} - \sin^2 \theta_i) d(\sin^2 \theta) \\ &= \rho_r L_i(\theta_i, \varphi_i) \end{aligned} \quad 1.24$$

Dans le cas théorique d'une surface idéale spéculaire, la réflectance spéculaire ne varie pas selon l'angle d'incidence. Dans la réalité, la réflectance spéculaire est dépendante de l'angle d'incidence, elle est dite directionnelle. Les relations de Fresnel définissent cette dépendance angulaire (Éq. 1.25). La relation précédente s'écrit alors en faisant apparaître la réflectance spéculaire en fonction de l'angle d'incidence

$$L_r(\theta_{r,spec}, \varphi_{r,spec}) = \rho_r(\theta_i) L_i(\theta_i, \varphi_i) \quad 1.25$$

La transmission directe est l'équivalent de la réflexion spéculaire pour la transmission. On parle de transmission directe, ou régulière, lorsqu'un rayon lumineux traverse un élément sans que sa trajectoire soit modifiée comme à travers une vitre. La direction de transmission directe est définie selon la direction d'incidence de la façon suivante (Éq. 1.26).

$$\begin{cases} \theta_{t,dir} = \theta_i \pm \pi \\ \varphi_{t,dir} = \varphi_i \pm \pi \end{cases} \quad 1.26$$

La *transmittance directe* τ_r (Éq. 1.27) représente le rapport entre le flux transmis directement dans la direction $(\theta_{t,dir}, \varphi_{t,dir})$ et le flux incident provenant de la direction (θ_i, φ_i) .

$$\tau_r = \frac{d\Phi_{t,dir}}{d\Phi_i} \quad 1.27$$

La BTDF d'une surface transmettant le rayonnement de manière directe s'écrit (Éq. 1.28) :

$$f_{t,r}(\theta_i, \varphi_i, \theta_t, \varphi_t) = \tau_r 2\delta(\sin^2(\theta_t \pm \pi) - \sin^2 \theta_t) \delta(\varphi_t - \varphi_i \pm \pi) \quad 1.28$$

La transmittance directe peut être définie avec la relation entre la luminance transmise et la luminance réfléchie (Éq. 1.29).

$$L_t(\theta_{t,dir}, \varphi_{t,dir}) = \tau_r L_i(\theta_i, \varphi_i) \quad 1.29$$

Comme pour le cas des surfaces réfléchissant de manière spéculaire, dans la plupart des cas, la transmittance directe d'un élément transparent est dépendante de l'angle d'incidence (Éq. 1.30).

$$L_t(\theta_{t,dir}, \varphi_{t,dir}) = \tau_r(\theta_i) L_i(\theta_i, \varphi_i) \quad 1.30$$

Absorptance

$$\alpha \quad [-]$$

La partie du rayonnement que reçoit un élément qui n'est ni réfléchie ni transmise est alors absorbée par celui-ci. Cette partie absorbée a un impact sur l'équilibre thermique de l'élément en le réchauffant. L'*'absorptance* (Éq. 1.31) représente la fraction entre le flux énergétique transmis par un élément de surface $d\Phi_a$ et le flux énergétique total reçu sur cet élément de surface $d\Phi_i$.

$$\alpha = \frac{d\Phi_a}{d\Phi_i} \quad 1.31$$

Comme pour la réflectance et la transmittance, l'absorptance peut dépendre de l'angle d'incidence du flux radiatif reçu. On parle alors d'absorptance directionnelle. Pour les éléments possédant une absorptance avec une dépendance angulaire, l'absorptance hémisphérique est utilisée par simplification dans cette thèse. L'absorptance hémisphérique correspond à l'absorptance directionnelle intégrée sur la totalité de l'hémisphère et est indépendante de l'angle d'incidence.

Réflectivité, Transmissivité

$$r \quad [-] \quad \text{Réflectivité}$$

$$t \quad [-] \quad \text{Transmissivité}$$

La réflectivité et la transmissivité définissent la capacité d'un matériau à réfléchir et transmettre le rayonnement uniquement à l'interface entre l'air et le matériau en question. Réflectivité/transmissivité et réflectance/transmittance sont des notions différentes. La réflectivité et la transmissivité sont des propriétés propres à un matériau tandis que la réflectance et la transmittance s'appliquent à un élément d'une certaine épaisseur pouvant être composé d'un ou de plusieurs matériaux. La réflectance et la réflectivité sont égales dans le cas d'un élément opaque ou avec une épaisseur semi-infinie. Pour un élément composé d'un matériau transparent avec une épaisseur finie comme une vitre en verre, la réflectivité et la transmissivité du verre sont alors différentes de la réflectance et de la transmittance de la vitre à cause des inter-réflexions et de l'absorption internes (voir l'indice d'absorption κ).

Indice de réfraction

n [-] *Indice de réfraction*

\hat{n} [-] *Indice de réfraction complexe*

L'*indice de réfraction* (Éq. 1.32) d'un matériau est une grandeur adimensionnelle définie comme le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ et la vitesse de phase de la lumière v dans le matériau en question. La valeur couramment utilisée pour le verre est $n=1,52$.

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{1.32}$$

On définit l'*indice de réfraction complexe* par (Éq. 1.33):

$$\hat{n} = n + ik \quad \text{1.33}$$

Indice d'absorption

κ [-]

Aussi défini comme la partie imaginaire de l'indice de réfraction, il représente la capacité d'un matériau à absorber le rayonnement lors de sa propagation dans le milieu. Nous prendrons $k=1.2\times10^{-6}$ pour le spectre du rayonnement visible et $k=2.2\times10^{-6}$ pour le spectre du rayonnement solaire.

1.2. Modèles de ciel

Pour procéder à des simulations précises d'éclairage naturel et d'apports solaires, il est nécessaire de reconstituer la directivité et la variabilité spatiale et temporelle des radiances et des luminances du ciel. Cette section présente les différents modèles de ciel, leurs données d'entrée nécessaires et les modèles d'efficacité lumineuse existants. Les deux modèles retenus, le modèle « All-weather » de [Perez 1993] et le modèle d'efficacité lumineuse de [Perez 1990], sont développés plus en détail.

1.2.1. Modèles de distribution des luminances et radiances du ciel

Les modèles du ciel sont généralement représentés par des fonctions dépendantes de l'angle zénithal θ et de l'azimut φ dans l'hémisphère qui représente la voûte céleste. Le premier modèle de ciel, le plus simple, est le ciel à luminance et radiance uniforme de Lambert (Éq. 1.34), utilisé pour déterminer le Facteur de Vue du Ciel (Sky View Factor).

$$L(\theta) = L \quad 1.34$$

Avec $L(\theta)$, la luminance ou la radiance à l'angle zénithal θ . [Moon 1942] a introduit un modèle de distribution de la luminance progressive de l'horizon jusqu'au zénith (Éq. 1.35). La luminance au zénith L_z est trois fois supérieure à celle de l'horizon.

$$L(\theta) = L_z \frac{1 + 2 \cos \theta}{3} \quad 1.35$$

Avec $L(\theta)$, la luminance ou la radiance à l'angle zénithal θ et L_z la luminance ou la radiance au zénith. Ce modèle très simple est encore utilisé pour la détermination du Facteur de Lumière du Jour (*Daylight Factor*). Il a été défini comme le ciel couvert standard par la CIE en 1955. Ce modèle a été créé pour représenter le pire scénario d'éclairement intérieur possible, c'est-à-dire un ciel entièrement recouvert d'une épaisse couche de nuages, où le soleil n'est pas du tout visible.

Historiquement, la CIE a d'abord adopté trois types de ciel dans sa norme : le ciel couvert de [Moon 1942], le ciel clair proposé par Kittler en 1967 et introduit comme norme CIE en 1973, et les ciels intermédiaires proposés par [Nakamura 1985]. Or, dans la réalité, les conditions de ciel varient sans grande discontinuité au cours du temps.

En essayant d'inclure toutes les variations possibles du ciel dans une seule formulation, le modèle de ciel clair a été étendu à quinze types de ciel par la suite (cinq couverts, cinq clairs et cinq intermédiaire). Ils s'appuient sur le calcul de cinq paramètres a, b, c, d et e qui servent à décrire les conditions atmosphériques et ainsi définir de quel type de ciel il s'agit. Cette proposition, basée sur le travail de [Kittler 1998] a été acceptée comme norme de ciel général de la CIE en 2003 [Darula 2002]. L'ancienne définition du ciel couvert (Éq. 1.35) a tout de même été conservée et correspond au ciel 16 de la CIE.

[Perez 1993] fut le premier à proposer un modèle couvrant l'ensemble des conditions de ciel de manière continue pour n'importe quelle localisation sur terre. C'est un modèle empirique basé sur 3 millions de mesures des luminances de ciels effectuées au laboratoire de Berkeley (USA). C'est

aujourd’hui le modèle le plus utilisé car le plus général et il a l’avantage de ne nécessiter que peu de données d’entrée toutes mesurables et accessibles.

1.2.2. Modèle « All-Weather » de [Perez 1993]

Les données nécessaires pour le calcul de la distribution de la radiance du ciel proposée par [Perez 1993] pour n’importe quelle condition peuvent être regroupées en deux catégories :

- La position du Soleil. Cette donnée est obtenue à partir des informations relatives au moment considéré (heure locale et jour) et à la localisation du site (latitude, longitude, altitude, fuseau horaire). Elle peut être calculée avec précision [Beckers 2010].
- Les données météorologiques, qui sont, l’irradiance diffuse horizontale $E_{e,dif}$ et l’irradiance directe normale $E_{e,ndir}$. L’irradiance diffuse horizontale correspond au rayonnement provenant uniquement du ciel (c’est-à-dire sans le Soleil) reçu sur un plan horizontal. L’irradiance directe normale correspond au rayonnement provenant du Soleil sur un plan orienté perpendiculairement au Soleil.

A partir de ces informations, une série de paramètres est obtenue à partir de tableaux et de formules pour parvenir à la radiance du ciel dans n’importe quelle direction :

L’indice de clarté ε

L’indice de clarté ε (Éq. 1.36) permet de catégoriser le ciel en 8 types différents. Ces 8 types de ciel vont du ciel complètement couvert ($1 \leq \varepsilon < 1.065$), au ciel dégagé ($6.2 \leq \varepsilon$). D’autres coefficients intermédiaires dépendent du type de ciel.

$$\varepsilon = \frac{\frac{E_{e,dif} + E_{e,ndir}}{E_{e,dif}} + 1.041\theta_s^3}{1 + 1.041\theta_s^3} \quad 1.36$$

Avec, $E_{e,dif}$ l’irradiance diffuse horizontale [W.m^{-2}], $E_{e,ndir}$ l’irradiance directe normale [W.m^{-2}], et θ_s l’angle zénithal du Soleil [rad]

L’indice de luminosité Δ

Comme l’indice de clarté, cet indice noté Δ (Éq. 1.37) sert au calcul des coefficients intermédiaires.

$$\Delta = \frac{mE_{e,dif}}{E_{e,ndir}} \quad 1.37$$

Avec, $E_{e,ndir}$ l’irradiance directe normale extra-terrestre [W.m^{-2}], m la masse optique d’air [-] qui représente la longueur relative du chemin optique, mesurée comme étant une proportion relative de la longueur du chemin dans la direction du zénith.

Ces deux variables sont estimées à partir de modèles existants. La masse optique d'air m (Éq. 1.38) peut être calculée selon la formule proposée par [Kasten 1989] et l'irradiance directe normale extra-terrestre $E_{e,ndir_0}$ (Éq. 1.39) selon la formule proposée par [Spencer 1971] :

$$m = \frac{\exp(-0.000184h)}{\cos\theta_s + 0.5057(96.07995 - \theta_s)^{-1.634}} \quad 1.38$$

$$E_{e,ndir_0} = E_{sc} \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{n2\pi}{365}\right) \right) \quad 1.39$$

Avec, h l'altitude du site [m], E_{sc} la constante solaire considérée constante et égale à 1367 W.m^{-2} conformément au *World Radiometric Reference* [Fröhlich 1998], et n le numéro du jour de l'année.

La radianc e relative l

La radianc e relative l (Éq. 1.40) d'un élément de ciel dans une direction (θ, γ) est définie comme le rapport entre la radianc e de l'élément de ciel considéré et la radianc e d'un élément de ciel arbitraire de référence.

$$l = f(\theta, \gamma) = (1 + a \exp(b / \cos \theta)) \times (1 + c \exp(d\gamma) + e \cos^2 \gamma) \quad 1.40$$

Avec, θ l'angle zénithal de l'élément de ciel considéré, γ l'azimut de l'élément de ciel considéré, et a, b, c, d, e les coefficients intermédiaires.

Les coefficients a, b, c, d et e

Pour obtenir la radianc e relative, les coefficients intermédiaires a, b, c, d et e sont calculés. Chacun de ces coefficients a un effet sur la répartition des radiances du ciel.

- *Le coefficient a sert à définir si l'horizon est plus sombre ou plus lumineux que le zénith. Une valeur positive correspond à un horizon plus clair que le zénith.*
- *Le coefficient b sert à définir le gradient des luminances dans la zone proche de l'horizon. Plus ce coefficient est grand, plus ce gradient est faible, plus la luminance varie fortement lorsque l'on se rapproche de l'horizon.*
- *Le coefficient c est proportionnel à l'intensité de la zone du ciel dans la zone proche du Soleil (zone circumsolaire). Plus sa valeur est grande, plus cette zone est intense.*
- *Le coefficient d sert à définir la taille de cette zone circumsolaire. Plus ce coefficient est grand, plus cette zone est étendue.*
- *Le coefficient e sert à définir l'intensité du rayonnement solaire rétrodiffusé (*backscattered*) par l'atmosphère. Ce phénomène correspond à une intensité du ciel plus marquée dans la direction opposée au Soleil généralement lorsque le Soleil est rasant (coucher ou lever du Soleil). Une valeur plus élevée signifie un rayonnement rétrodiffusé plus marqué.*

Ces cinq coefficients sont calculés selon la formule suivante (Éq. 1.41) :

$$x = x_1(\varepsilon) + x_2(\varepsilon)\theta_s + \Delta(x_3(\varepsilon) + x_4(\varepsilon)\theta_s) \quad 1.41$$

Avec, x coefficients a, b, c, d ou e , $x_i(\varepsilon)$ coefficients a_i, b_i, c_i, d_i ou e_i intermédiaires obtenus dans des tables en fonction de ε , Δ l'indice de luminosité, θ_s l'angle zénithal du Soleil [rad].

La radiance du ciel

Une fois la radiance relative d'un élément de ciel obtenue, la radiance $L_{e,dif}$ de cet élément de ciel peut alors être calculée ainsi (Éq. 1.42) :

$$L_{e,dif}(\theta, \gamma) = \frac{l(\theta, \gamma)E_{e,dif}}{\int_{l_{\theta,\gamma}} \cos \theta d\omega} \quad 1.42$$

1.2.3. Données météorologiques d'entrée

Parmi les mesures recueillies par les stations météorologiques, les données de rayonnement solaires sont largement disponibles pour de nombreux endroits dans le monde [ASHRAE 2001]. L'ensemble des données météorologiques nécessaires est disponible dans des fichiers de formats normalisés, tels que EnergyPlus Weather (EPW), qui fournissent des années types représentant les conditions météorologiques sur des périodes prolongées. Ce type de fichier comprend des enregistrements horaires de différents éléments météorologiques, tels que la température, l'humidité, les précipitations, la couverture nuageuse, les radiations solaires, ainsi que la vitesse et la direction du vent.

Parmi les données radiatives mesurées, les grandeurs photométriques sont rarement disponibles. C'est pourquoi la majorité des outils de simulation de l'éclairage naturel dépendent de modèles d'efficacité lumineuse pour convertir les grandeurs radiométriques en grandeurs photométriques [Perez 1990, Munee 1998].

1.2.4. Modèles d'efficacités lumineuses de [Perez 1990]

[Perez 1990] propose plusieurs modèles permettant le calcul de l'efficacité lumineuse [lm/W] afin de passer des irradiances aux éclairements (Éq. 1.43 et 1.44). Ces mêmes conversions peuvent aussi être appliqués directement aux radiances pour passer aux luminances. Ces modèles sont différents selon qu'il s'agit de l'irradiance globale, de l'irradiance diffuse ou de l'irradiance directe. Ce sont les deux dernières qui nous intéressent :

$$E_{v,dif} = E_{e,dif}(a + bW + c \cos \theta_s + d \ln \Delta) \quad 1.43$$

$$E_{v,dir} = \max\{0, E_{e,dir}(a + bW + c \exp(5.73\theta_s - 5) + d\Delta)\} \quad 1.44$$

Avec, a, b, c et d les coefficients obtenus en fonction du type de ciel (ε) et selon la conversion (rayonnement diffus ou rayonnement direct), Δ l'indice de luminosité, θ_s l'angle zénithal du Soleil [rad], W la quantité d'eau précipitable atmosphérique [cm].

L'auteur propose une estimation de la quantité d'eau précipitable atmosphérique W en fonction de la température de rosée T_d [°C] (Éq. 1.45). La température de rosée est une grandeur présente dans les fichiers de données météo d'année standard.

$$W = \exp(0.07T_d - 0.075) \quad \mathbf{1.45}$$

I.3. Les caractéristiques de l'environnement bâti

Cette section recense les principaux types d'élément présent dans l'environnement bâti selon leurs propriétés optiques. Ils sont regroupés ici en quatre groupes : les éléments opaques diffus, les éléments opaques spéculaires, les vitrages, et les textiles. À partir des différents phénomènes physiques impliqués dans la réflexion et la transmission de ces éléments, le but est de répertorier leurs caractéristiques importantes et les modèles existants.

I.3.1. Éléments opaques diffus

Si une surface présentant des irrégularités, n'est pas localement lisse ou est composée de minuscules particules, la réflexion produite par cette surface est diffuse. Chaque rayon arrivant sur une particule subit une réflexion régulière (ou spéculaire), mais comme les surfaces des particules sont dans des plans différents, elles réfléchissent le rayonnement dans de nombreuses directions. La majorité des surfaces présentes dans l'environnement bâti réfléchit la lumière de cette façon. Le béton, la pierre, le bois, le plâtre sont des matériaux qui produisent des réflexions principalement diffuses.

Modèle Lambertien

Le modèle le plus couramment utilisé pour ce type de réflexion est le modèle parfaitement diffus, dit Lambertien. Le rayonnement incident est réfléchi uniformément dans toutes les directions de l'hémisphère quel que soit l'angle d'incidence. Cette idéalisation est souvent utilisée dans les calculs car elle les simplifie radicalement tout en fournissant une bonne représentation des surfaces.

Autres Modèles

D'autres modèles plus précis et complexes existent [Wolff 1998], provenant majoritairement de la communauté infographique. Le modèle d'Oren-Nayar [Oren 1995] (Figure 1.7) est un des plus connus, il est basé sur l'optique géométrique et conçu à partir d'un modèle de micro-facettes. Comme la plupart des modèles issus de la communauté de l'infographie, ce modèle nécessite le choix de paramètre d'ajustement difficile à mesurer.

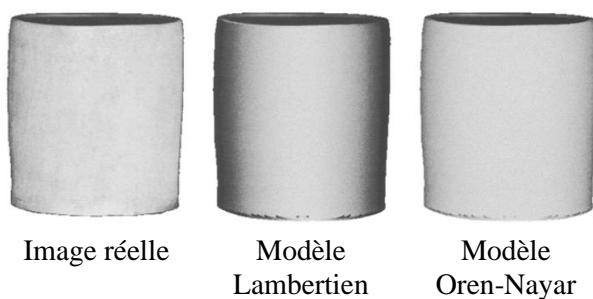


Figure 1.7 : Image d'un vase, son rendu avec modèle de réflexion Lambertien, et son rendu avec le modèle de réflexion Oren-Nayar [Oren 1995].

1.3.2. Éléments opaques spéculaires

Si une surface présente des irrégularités petites par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, elle réfléchit le rayonnement de manière spéculaire. Certains éléments présents dans l'environnement bâti sont composés de matériaux réfléchissant comme les miroirs, ou certains bardages métalliques de façades. A partir des lois de Snell-Descartes et des coefficients de Fresnel, il est possible de calculer la réflectance spéculaire d'un élément pour un angle d'incidence donné.

Lois de Snell-Descartes

Les lois de Snell-Descartes définissent la direction du rayonnement réfléchi et transmis à l'intérieur de l'élément (Figure 1.8). La réflexion se produit dans la direction spéculaire, c'est-à-dire que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion (Éq. 1.46). La direction de transmission est définie selon la formule faisant intervenir l'indice de réfraction des deux milieux (Éq. 1.47). En considérant l'indice de réfraction de l'air égal à 1, cela s'écrit :

$$\theta_i = \theta_r \quad 1.46$$

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_t \quad 1.47$$

Avec, n l'indice de réfraction de l'élément, θ_i l'angle d'incidence, θ_r l'angle de réflexion, et θ_t l'angle de transmission.

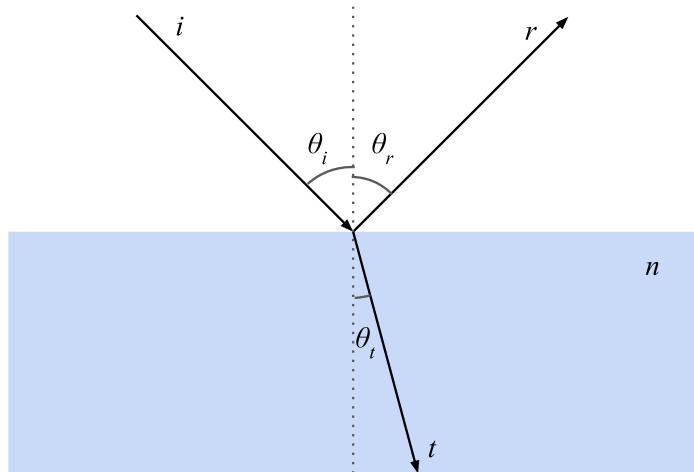


Figure 1.8 : Rayon incident, rayon réfléchi, rayon transmis à l'interface entre l'air et l'élément d'indice de réfraction n .

Coefficients de Fresnel

Les coefficients de Fresnel relient la réflectivité (Éq. 1.48) d'un élément avec les directions d'incidence et de transmission du rayonnement. La réflectivité r pour un angle d'incidence donné peut être calculée à partir de l'indice de réfraction n et du coefficient d'extinction κ . Les relations de Fresnel suivantes sont valables à la fois pour les matériaux métalliques, avec $\kappa \neq 0$, et pour les matériaux diélectriques comme le verre, avec $\kappa = 0$.

$$r = \frac{1}{2}(r_{TE} + r_{TM}) \quad 1.48$$

Où,

$$\begin{aligned} r_{TE} &= \frac{a^2 + b^2 - 2a \cos \theta_i + \cos^2 \theta_i}{a^2 + b^2 + 2a \cos \theta_i + \cos^2 \theta_i} \\ r_{TM} &= r_{TE} \frac{a^2 + b^2 - 2a \sin \theta_i \tan \theta_i + \sin^2 \theta_i \tan^2 \theta_i}{a^2 + b^2 + 2a \sin \theta_i \tan \theta_i + \sin^2 \theta_i \tan^2 \theta_i} \\ a^2 &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{(n^2 - \kappa^2 - n^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \kappa^2} + n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta_i \right) \\ b^2 &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{(n^2 - \kappa^2 - n^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \kappa^2} - (n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta_i) \right) \end{aligned}$$

Avec, r_{TE} la réflectivité des ondes transverses électriques, r_{TM} la réflectivité des ondes transverses magnétiques, et a et b les coefficients intermédiaires. Dans le cas d'un élément parfaitement opaque, la réflectivité est égale à la réflectance, $r = \rho$.

Simplification de Schlick

[Schlick 1994] propose une simplification des relations de Fresnel (Éq. 1.49). Le but initial de cette simplification est double : accélérer le calcul du coefficient de Fresnel notamment pour des applications de rendu réaliste, et obtenir une fonction indépendante de la longueur d'onde. En effet, l'indice de réfraction n et l'indice d'absorption κ , et donc r , sont tous les trois dépendant de la longueur d'onde et leurs valeurs sont difficilement accessibles. Le point fort de la simplification de Schlick réside dans sa simplicité. Un seul paramètre d'entrée caractérisant l'élément est nécessaire : la réflectance de l'élément à l'angle d'incidence normal ρ_0 . En plus d'être le seul paramètre d'entrée, ρ_0 est une donnée facilement mesurable contrairement à n et κ et donc largement accessible pour n'importe quel matériau ou élément.

$$\rho(\theta_i) = \rho_0 + (1 - \rho_0)(1 - \cos \theta_i)^5 \quad 1.49$$

La formule est obtenue à partir d'une approximation rationnelle validant les conditions suivantes (Éq. 1.50), dites « *kernel conditions* », qui décrivent le comportement général de la courbe de la réflectance en fonction de l'angle d'incidence :

$$\begin{cases} \rho(\pi/2) = 1 \\ \rho(0) = \rho_0 \\ \rho'(0) = 0 \\ \rho''(0) = 0 \end{cases} \quad 1.50$$

Autres Modèles

Dans la réalité, une composante spéculaire peut être présente pour les matériaux réfléchissant majoritairement de manière diffuse comme le bois. Cette observation est importante pour le rendu d'images car c'est ce qui produit les effets de brillance, très remarqués par l'œil humain. Des matériaux peuvent aussi avoir un modèle de réflexion anisotrope, c'est-à-dire que la réflexion dépend de l'angle azimutal d'incidence comme c'est le cas des métaux brossés [Poulin 1990] ou le bois à cause de l'orientation des fibres [Ward 1992].

L'utilisation de BRDF est alors nécessaire pour modéliser ces singularités. De nombreux modèles ont été développés par la communauté infographique au fil des années. Il existe des BRDF très générales servant à couvrir l'ensemble des matériaux et d'autres plus spécifiques servant à modéliser précisément un type de matériaux. Parmi les modèles existants respectant les lois de la physique, on peut citer les modèles empiriques de [Ward 1992] pour le bois, [Schlick 1994] pour des matériaux hétérogènes, [Lafortune 1997] pour des matériaux rugueux, [Strauss 1990] pour les métaux et matériaux brillants ; et les modèles basés sur l'optique géométrique (théorie des micro-facettes) de [Torrance 1967] pour les matériaux rugueux, et [Cook 1981] pour les métaux et les plastiques.

1.3.3. Les vitrages : réflexion spéculaire & transmission directe

Les vitrages sont des éléments capables de réfléchir de manière spéculaire et de transmettre de manière directe le rayonnement. Les principaux phénomènes physiques définissant et quantifiant la réflexion, la transmission et l'absorption entre le rayonnement solaire et les vitrages sont expliqués afin de donner une vue d'ensemble des caractéristiques générales importantes de l'ensemble des vitrages présents dans l'environnement bâti pour créer un modèle adapté à la simulation de la lumière naturelle et des apports solaires.

Interaction du rayonnement et d'un vitrage à travers son épaisseur

Le verre est un matériau diélectrique et par définition son indice d'absorption κ est supposé nul. En réalité, le verre possède un indice d'absorption différent de 0 à cause des imperfections qui se situent à l'intérieur. Le verre absorbe donc une partie du rayonnement. On peut retenir ces deux valeurs pour du verre classique de vitrage : $\kappa = 3.5 \times 10^{-7}$ pour le spectre visible et $\kappa = 2 \times 10^{-6}$ pour le spectre solaire [Rubin 1985]. On peut considérer que $r + t = 1$ uniquement à l'interface. Lorsque le rayonnement progresse à l'intérieur de l'élément, une petite partie est absorbée. Le rayonnement traversant un élément d'épaisseur d avec un angle de transmission θ_t parcourt une distance de $d / \cos \theta_t$ pour atteindre l'autre interface. La transmissivité à cette distance $t_{d/\cos \theta_t}$ peut être obtenue selon la formule suivante, déduite de la loi de Beer-Lambert [Howell 2010] (Éq. 1.51) :

$$t_{d/\cos \theta_t} = e^{-4\pi\kappa d / \lambda_0 \cos \theta_t} \quad 1.51$$

A partir des réflectivités et des transmissivités obtenues aux deux interfaces du vitrage pour un angle d'incidence donné, il est possible d'obtenir la réflectance, la transmittance et l'absorptance pour l'élément de vitrage en présentant le problème des inter-réflexions à l'intérieur du vitrage de manière géométrique (Figure 1.9). Il est intéressant de noter que pour des interfaces planes et

parallèles comme ici, la direction du rayon incident et du rayon à la sortie du vitrage est inchangée. La réflectance, la transmittance et l'absorptance (Éq. 1.52, 1.53 et 1.54) d'un simple vitrage peuvent être obtenues à partir de la réflectivité et de la transmissivité calculées à un angle d'incidence donné.

$$\rho = r \left[1 + \frac{(1-r)^2 t^2}{1 - r^2 t^2} \right] \quad 1.52$$

$$\tau = \frac{(1-r)^2 t}{1 - r^2 t^2} \quad 1.53$$

$$\alpha = \frac{(1-r)(1-t)}{1 - rt} \quad 1.54$$

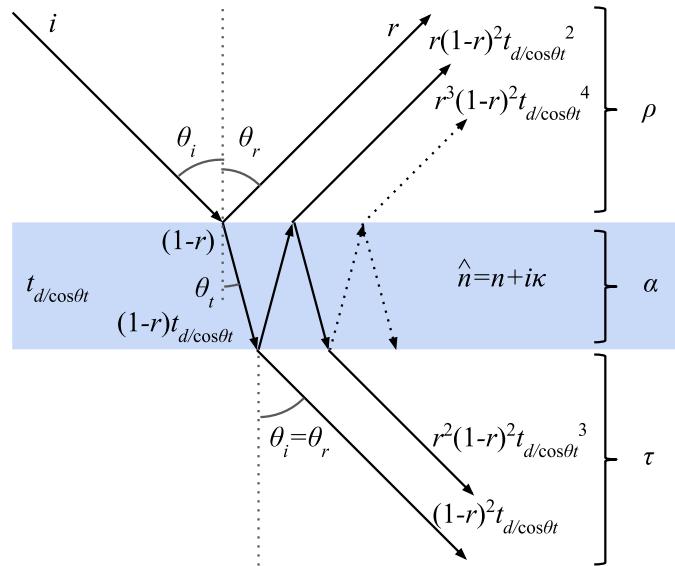


Figure 1.9 : Représentation géométrique des inter-réflexions produites à l'intérieur du vitrage.

Les vitrages multiples

Avec le même type de raisonnement géométrique (Figure 1.10), il est possible de retrouver les caractéristiques générales à un certain angle d'incidence $\rho(\theta_i)$, $\tau(\theta_i)$ et $\alpha(\theta_i)$ pour un vitrage multiple composé de x couches de verre à partir des caractéristiques de chacune d'elles. La Figure 1.10 représente les inter-réflexions à l'intérieur d'un double vitrage. Pour un ensemble composé de deux éléments de vitrage 1 et 2, la réflectance, la transmittance et l'absorptance (Éq. 1.55, 1.56 et 1.57) de l'ensemble peuvent être obtenues par les formules suivantes :

$$\rho = \rho_1 + \frac{\tau_1^2 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad 1.55$$

$$\tau = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad 1.56$$

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\tau_1(\alpha_1\rho_2 + \alpha_2)}{1 - \rho_1\rho_2} \quad 1.57$$

Ces formules pour un double vitrage fonctionnent également pour un ensemble composé de plus de 2 éléments de vitrage. Le calcul doit se faire itérativement en commençant par 2 vitrages, puis en considérant par la suite ces 2 vitrages comme un seul nouveau vitrage et ainsi de suite.

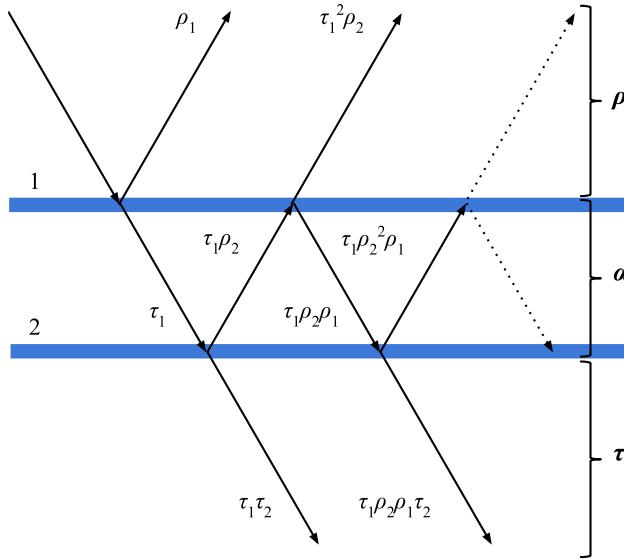


Figure 1.10 : Représentation géométrique des inter-réflexions produites à l'intérieur d'un double vitrage.

Dans le cas d'un double vitrage phonique standard composé d'une vitre de 4 mm (identique au cas précédent), d'une lame d'air de 16 mm et d'un autre vitrage de 10 mm (4/16/10), les réflectances et les absorptances obtenus sont sensiblement différentes selon le sens de traversé du rayonnement (Figure 1.11). Dans le sens vitre 4 mm vers vitre 10 mm $\rho = 0.140$, $\alpha = 0.097$ et dans l'autre sens $\rho = 0.135$, $\alpha = 0.103$ pour l'angle d'incidence normal et dans le spectre visible. La transmittance reste identique dans les deux sens $\tau = 0.76$.

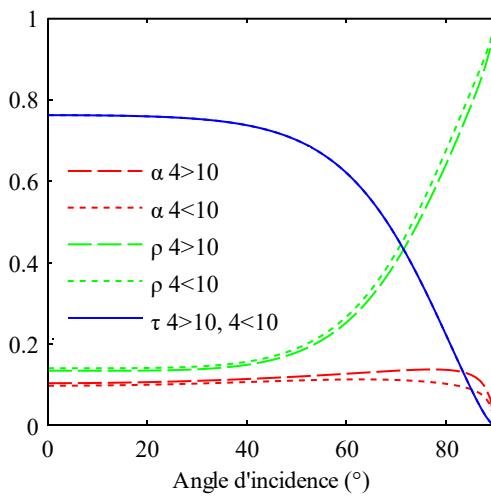


Figure 1.11 : Réflectances, transmittances et absorptances d'un double vitrage phonique standard 4/16/10 en fonction de l'angle d'incidence calculés avec les relations de Fresnel. Seule la transmittance est identique selon le sens de traversée du rayonnement.

Les vitrages traités

Le comportement optique d'un vitrage peut être modifié dans le spectre visible et dans le spectre solaire en y déposant une ou plusieurs couches très fines d'un autre matériau. Ces revêtements peuvent être diélectriques ou métalliques. Il est possible d'obtenir une absorption élevée ou faible sous différentes longueurs d'onde du rayonnement.

Dans le cas d'un vitrage traité sur une face, les réflectances sont différentes selon le sens de traversé du rayonnement contrairement à la transmittance qui elle est indépendante du sens. Dans l'exemple étudié d'un traitement à l'argent (Figure 1.12), la différence entre la transmittance visuelle et solaire est bien plus marquée que pour un vitrage sans traitement. Grâce au traitement appliqué, le rayonnement solaire est filtré plus fortement que le rayonnement visible. La figure suivante représente les transmittances et réflectances à l'angle d'incidence normal en fonction des longueurs d'onde pour un vitrage sans traitement de 4 mm et pour ce même vitrage avec un traitement argent. Pour un vitrage non traité, la réflectance et la transmittance sont quasiment constantes sur tout le spectre solaire tandis que pour le vitrage traité à l'argent la transmittance est bien plus élevée autour du spectre visible et diminue fortement au-delà des longueurs d'onde de 800 nm. Le but recherché étant de laisser passer au maximum la lumière en diminuant au maximum les apports solaires.

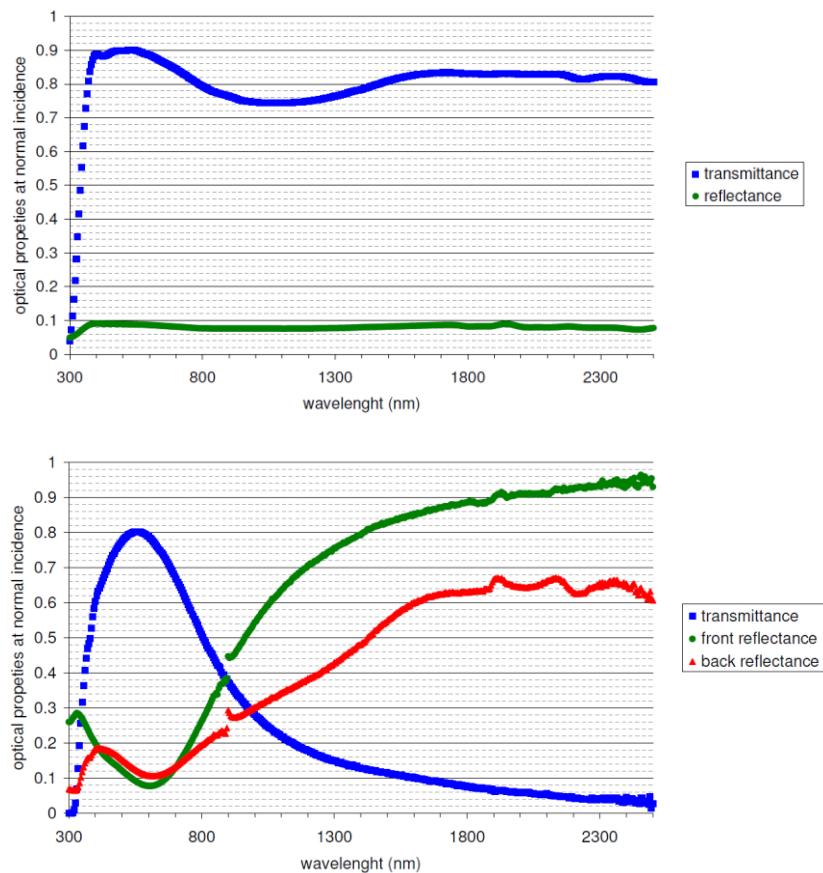


Figure 1.12 : Transmittances et réflectances à l'angle d'incidence normal (0°) en fonction des longueurs d'onde pour un vitrage sans traitement de 4mm (haut) et pour le même vitrage avec un traitement argent supplémentaire (bas) [Dama 2004].

Ces types de traitement peuvent aussi être appliqués sur des vitrages multiples. Il existe aujourd’hui une multitude de types de vitrages très performants à plusieurs couches avec traitement. La Figure 1.13 présente les deux principes de base de conception des doubles vitrages avec traitements appelés « *heat mirror* » et « *solar control* ». L’interface traitée est représentée en bleu foncé. La première configuration « *heat mirror* » est utilisée dans un but de conservation de la chaleur intérieure. Elle exploite la capacité du traitement à réfléchir le rayonnement infrarouge. En effet, grâce à la faible émissivité du traitement présent sur le vitrage intérieur, les échanges en onde longue entre la vitre froide et les surfaces intérieures sont réduits et la chaleur contenue dans la pièce est mieux conservée. La deuxième configuration « *solar control* » est utilisée pour réduire les surchauffes dues aux apports solaires. Elle exploite la capacité du traitement à réfléchir le rayonnement solaire infra-rouge sur la vitre positionnée à l’extérieur.

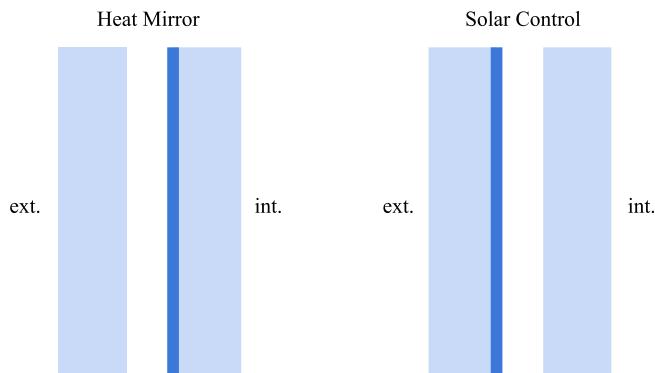


Figure 1.13 : Schéma des deux principaux types de double vitrage avec traitement : « *heat mirror* » et « *solar control* ».

Modèles de dépendance angulaire des caractéristiques des vitrages

Le calcul exact de la dépendance angulaire de la réflectance et de la transmittance de n’importe quel type de vitrage est en théorie possible avec les relations vues précédemment. Cependant, elles impliquent la connaissance de propriétés difficilement accessibles pour les matériaux qui composent le vitrage : n et k . La mesure de ces propriétés nécessite en plus une grande précision. En effet, les calculs sont très sensibles à ces propriétés et de faibles écarts dans leur mesure peuvent engendrer des erreurs substantielles dans le résultat final de ρ et τ . Cela ne justifie donc pas l’emploi de ces formules exactes. La détermination de la dépendance des caractéristiques selon l’angle d’incidence est un domaine de recherche à part-entière [Karlsson 2000, Rubin 1999]. Cependant, des modèles simplifiés existent pour prendre en compte ces dépendances angulaires.

[Furler 1991] propose un modèle de simplification précis de la dépendance angulaire de ρ et τ pour des simples vitrages homogènes compte tenu de ρ_0 , τ_0 et l’épaisseur du verre. La méthode consiste à faire la procédure de calcul inverse : au lieu de calculer $\rho(\theta_i)$ et $\tau(\theta_i)$ à partir de n et k , c’est n et k qui sont estimés à partir de ρ_0 et τ_0 pour ensuite calculer $\rho(\theta_i)$ et $\tau(\theta_i)$. Cette méthode produit des résultats très précis pour des simples vitrages homogènes cependant elle reste limitée à ce seul type de vitrage.

Des modèles pour l'estimation de la dépendance angulaire des caractéristiques des vitrages traités existent également. Parmi les plus répandus, on retrouve le modèle de la [ASHRAE 2017], utilisé par le logiciel WINDOW développé par le LBNL (Berkley), et le modèle HEUM [Montecchi

2002]. Ces deux modèles sont construits à partir de méthodes empiriques. La Figure 1.14 présente une comparaison de ces deux modèles dans le cas d'un vitrage simple traité à l'argent du côté extérieur (front) avec les transmittance et réflectance obtenues par mesure à un angle d'incidence de 0° et de 60° . Les modèles ASHRAE et HEUM à un angle d'incidence de 60° produisent des erreurs de l'ordre de $\pm 5\%$ pour la réflectance et la transmittance dans le spectre visible et solaire.

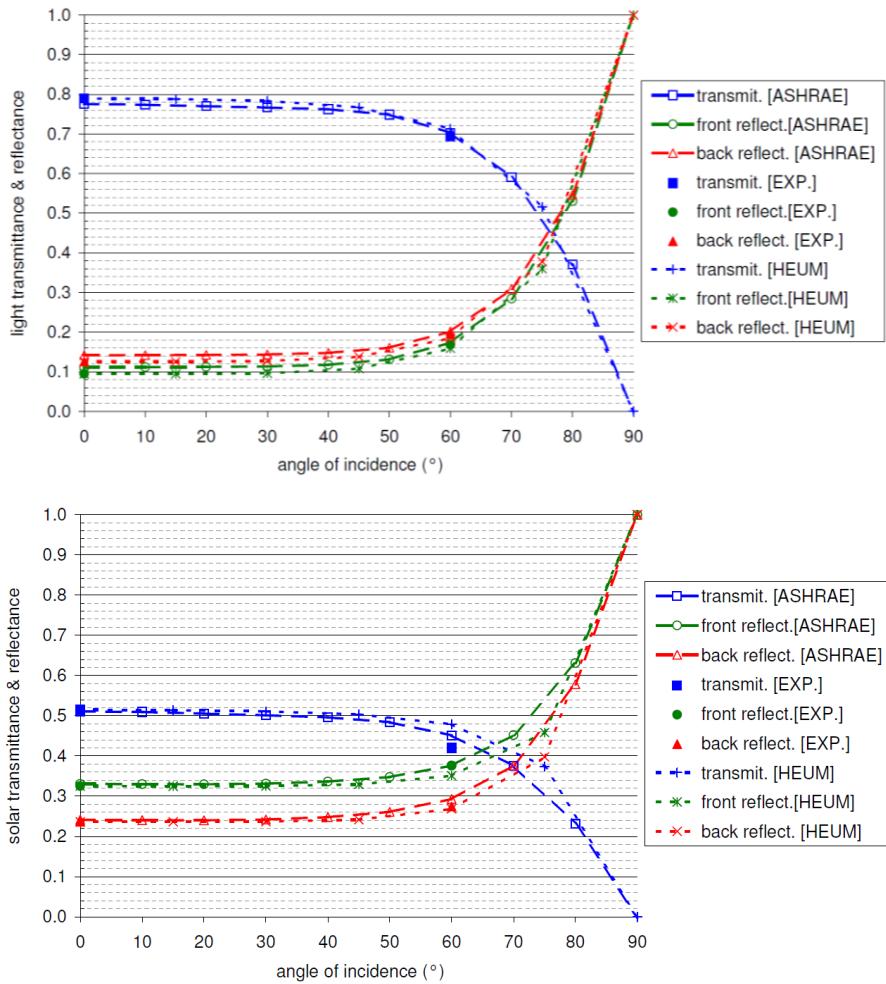


Figure 1.14 : Transmittances et réflectances dans le spectre visible et solaire pour un vitrage traité à l'argent d'un côté (front) en fonction de l'angle d'incidence selon les modèles ASHRAE et HEUM comparés aux valeurs mesurées (EXP) à un angle d'incidence de 0° et 60° [Dama 2004].

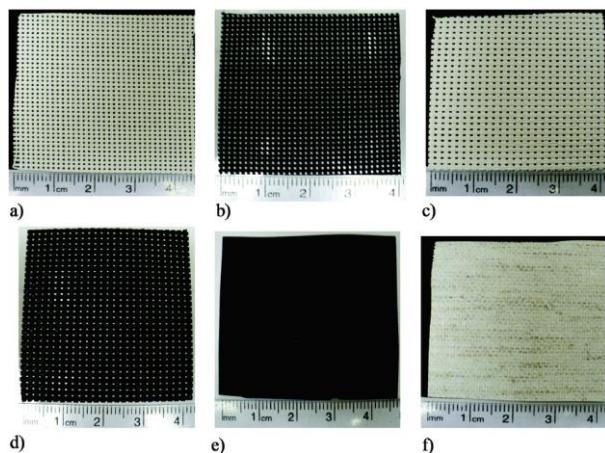
La modélisation mais également la mesure de la dépendance angulaire des caractéristiques des vitrages est difficile. Les mesures sont généralement limitées à l'angle d'incidence normal. Plus l'angle d'incidence est élevé, plus les mesures deviennent difficiles et moins précises jusqu'à devenir quasi-impossible au-delà de 60° . C'est d'ailleurs pour cette raison que la norme européenne [EN 410] portant sur la détermination des caractéristiques d'un vitrage limite son application à l'angle d'incidence normal. La réflectance et la transmittance à angle d'incidence normal, ρ_0 et τ_0 , sont des données facilement mesurables et donc beaucoup plus accessibles notamment depuis les fiches techniques constructeurs.

1.3.4. Les textiles : réflexion diffuse & transmission directe et diffuse

Les matériaux opaques, diffus et spéculaires, ainsi que les vitrages représentent la très grande majorité des éléments qui constituent les environnements bâti. Cependant, d'autres types d'élément sont parfois présents. Notamment les éléments de type textiles utilisés à des fins structurelles [Llorens 2015] ou pour contrôler le rayonnement solaire, lumineux ou thermique, comme les rideaux ou les toiles d'ombrage (Figure 1.15).

Comme les vitrages, cette catégorie d'élément fin réfléchit et laisse passer une partie du rayonnement. Il existe peu de travaux dans la littérature portant sur l'étude des caractéristiques optiques des textiles. Les travaux de [Kotey 2009a, 2009b] sont ceux qui apportent la meilleure analyse sur le sujet à partir de mesures expérimentales. L'auteur propose également différents modèles de dépendance angulaire des caractéristiques selon les types de textiles (Figure 1.15). On peut résumer les principales caractéristiques des tissus ainsi :

- La partie réfléchie du rayonnement par le textile est majoritairement diffuse. Sa *réflectance diffuse* ρ_d dépend de la couleur des fibres et du taux d'ouverture entre les fibres A_0 .
- La transmission est séparée en deux parties distinctes. Une partie du rayonnement est transmise à travers le textile de manière indirecte par inter-réflexion entre les mailles. Cette partie transmise dépend également de la couleur des fibres et de la géométrie des mailles. La transmission produite via ce processus est majoritairement diffuse et est donc caractérisée par la *transmittance diffuse* τ_d .
- L'autre partie transmise est celle qui passe directement à travers le textile par les ouvertures. Elle est directement liée au taux d'ouverture mais également à la géométrie des mailles mais ne dépend pas de la couleur des fibres. La *transmittance directe* τ_r caractérise ce phénomène.



Figures 1.15 : Exemples de protections solaires présentées dans [Kotey 2009a].

Contrairement à la réflectance et à la transmittance diffuse, qui restent relativement constante selon l'angle d'incidence, la transmittance directe montre une dépendance angulaire marquée et un comportement général similaire à celui observé avec un vitrage. La raison de cette dépendance

angulaire est purement géométrique. La différence majeure entre la dépendance angulaire de la transmittance directe d'un textile et celle d'un vitrage est que la transmittance directe d'un textile atteint 0 avant que l'angle d'incidence soit de 90° . D'après les mesures effectuées par [Kotey 2009a, 2009b], cet angle se situe entre 65° et plus de 80° selon les textiles. Il varie selon la forme des fibres et leur espacement. La Figure 1.16 représente schématiquement trois textiles avec des formes et des espacements de fibre variés. L'angle limite est différent dans les 3 cas.

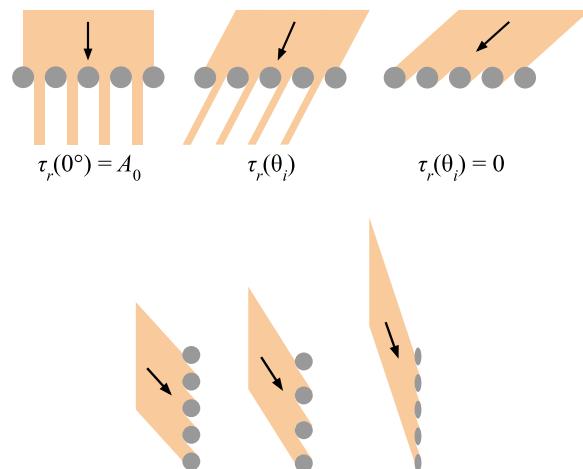


Figure 1.16 : En haut, coupe d'un textile et représentation du flux transmis avec différents angles d'incidence. En bas, angles limites de 3 textiles de différentes compositions.

Comme pour les vitrages, la transmittance directe à angle d'incidence normal est couramment utilisée pour définir la transmittance directe d'un textile. La mesure des caractéristiques à des angles d'incidence supérieurs à 60° est également difficile pour ce type d'élément.

1.4. État de l'art des méthodes de calcul du rayonnement

La méthode de radiosité et les méthodes de lancer de rayon ont été les premières méthodes de calcul numérique à décrire l'illumination globale d'un environnement. Elles ont été grandement développées dans le domaine de l'infographie et ont également laissé place à des sous-familles comme le « *photon mapping* » [Jensen 2001]. Pour obtenir des images réalistes de haute qualité, les méthodes basées sur le lancer de rayons ont pris le dessus sur la méthode de radiosité au fil du temps notamment pour leur faculté à pouvoir prendre en compte tout type de réflexion et de transmission grâce aux techniques de Monte-Carlo. RADIANCE, le moteur de calcul référence dans le domaine de l'éclairage naturel, utilise cette approche. Néanmoins, la méthode de radiosité reste une technique très performante pour le calcul du bilan radiatif pour des applications en éclairage naturel et en thermique du bâtiment. Cette section présente ces deux approches de calcul du rayonnement. L'équation du rendu de [Kajiya 1986] sert de point de départ aux démonstrations.

1.4.1. L'équation du rendu

L'équation du rendu de [Kajiya 1986] (Éq. 1.58) est l'une des équations les plus connues dans le domaine du rendu réaliste et du calcul du rayonnement [Arvo 1993, Sillion 1994]. Elle est le point de départ de la plupart des démonstrations des méthodes de calcul du rayonnement. Elle permet aussi de comprendre les particularités et les difficultés du calcul du rayonnement. Cette équation exprime l'équilibre énergétique local du rayonnement en un point d'une surface.

$$\underbrace{L(\theta, \varphi)}_{\text{radiance sortante}} = \underbrace{L_{em}(\theta, \varphi)}_{\text{radiance émise}} + \underbrace{\int_{\Omega^+} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) L(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i}_{\text{radiance réfléchie}} \quad 1.58$$

L'équation est composée de trois éléments :

- La *radiance sortante* totale produite par une surface en un point dans une direction définie par (θ, φ) .
- La *radiance émise* par la surface dans la direction sortante (θ, φ) . Cet élément est non-nul seulement pour les sources de rayonnement : lampes, ciel...
- La *radiance réfléchie* par la surface dans la direction sortante (θ, φ) . La radiance réfléchie est dépendante du rayonnement que reçoit la surface, définie dans l'équation par la radiance incidente $L(\theta_i, \varphi_i)$ et de la capacité de la surface à réfléchir le rayon reçu de la direction (θ, φ) vers la direction (θ_i, φ_i) définie par la BRDF $f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi)$. Cela est réalisé en prenant en compte toutes les directions possibles d'incidence contenue dans l'hémisphère Ω^+ .

L'équation du rendu est une équation intégrale, plus précisément une équation de Fredholm de la seconde espèce. La radiance totale sortante dans une direction est dépendante de la radiance reçue dans toutes les directions et inversement, ce qui implique de devoir considérer le problème dans sa globalité. C'est de là que provient toute la difficulté de la résolution de cette équation.

Ce problème peut être illustré par un exemple simple et concret : Prenons le cas d'une pièce rectangulaire classique éclairée par une ampoule. Si l'ampoule est allumée, on peut facilement voir toutes les surfaces de la pièce ce qui signifie que toutes les surfaces envoient de la lumière par réflexion et/ou par émission pour l'ampoule. Lorsqu'on allume l'ampoule, la lumière est envoyée vers le sol, le sol réfléchit une partie de cette lumière vers les murs, le plafond et l'ampoule, qui réfléchissent à leur tour une partie de cette lumière vers les autres surfaces et ainsi de suite... jusqu'à l'infini. Tout est alors lié : si l'on change le matériau d'une des surfaces, on va changer la quantité de lumière qu'elle réfléchit ou la façon dont elle la réfléchit, et par enchainement, la quantité de lumière que reçoivent les autres surfaces, etc...

Si l'on considère que l'émission et le BRDF de chaque élément qui composent une scène sont connus, la seule inconnue dans l'équation du rendu est alors la radiance L . Elle apparaît deux fois dans l'équation : une fois dans la partie gauche et une autre fois dans la partie de droite sous une intégrale. La résolution analytique de cette équation intégrale est possible dans des cas très simples. Dans des configurations plus complexes sa résolution analytique devient impossible. Les méthodes numériques de radiosité et de lancer de rayons de type Monte-Carlo, présentées juste après, sont les deux principales méthodes qui permettent de calculer une solution de cette équation.

1.4.2. « Path-tracing » avec Monte-Carlo

Pour retrouver la partie réfléchie de $L(\theta, \phi)$ en un point, une des manières la plus intuitive est de remonter jusqu'à la source en suivant le « chemin » inverse de la lumière, on parle alors de « *backward path-tracing* » en anglais. Pour alléger l'écriture des équations suivantes, $\vec{\omega}$ désigne la direction définie par (θ, ϕ) et $\kappa(\vec{\omega}_i, \vec{\omega})$ le produit de la BRDF $f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega})$ et du cosinus de l'angle d'incidence θ_i . L'équation du rendu s'écrit alors sous la forme (Éq. 1.59) :

$$L(\vec{\omega}) = L_{em}(\vec{\omega}) + \int_{\Omega^+} \kappa(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}) L(\vec{\omega}_i) d\omega_i \quad 1.59$$

Le « Path-tracing »

Si les radiances émises par les éléments qui composent la scène sont connues, la partie réfléchie de l'équation du rendu peut alors s'écrire en fonction de ces radiances émises [Lafortune 1993]. L'intégrale dans l'équation du rendu représentant la partie réfléchie, est remplacée par une suite infinie de somme d'intégrales qui correspondent pour chacune à une réflexion supplémentaire (Éq. 1.60).

$$\begin{aligned} L(\vec{\omega}) &= L_{em}(\vec{\omega}) \\ &+ \int_{\Omega^+} \kappa_1(\vec{\omega}_1, \vec{\omega}) L_{em,1}(\vec{\omega}_1) d\omega_1 \\ &+ \int \int_{\Omega^+} \kappa_1(\vec{\omega}_1, \vec{\omega}) \kappa_2(\vec{\omega}_2, \vec{\omega}_1) L_{em,2}(\vec{\omega}_2) d\omega_1 d\omega_2 \\ &+ \dots \end{aligned} \quad 1.60$$

« Path-tracing » avec Monte Carlo

Une estimation de chacune de ces intégrales peut être faites grâce aux techniques de Monte-Carlo. Le principe de base de la méthode de Monte Carlo est de calculer une approximation numérique d'une intégrale en utilisant des techniques probabilistes [Hammersley 1964]. Dans ce cas précis, l'intégrale représente la radiance réfléchie dans une direction produite par la lumière reçue depuis toutes les directions de l'hémisphère (Éq. 1.61). Cette intégrale est calculée numériquement en étant décomposée en N rayons envoyés dans des directions aléatoires $\vec{\omega}_j$. La fonction de densité de probabilité p sert à imiter le comportement de réflexion de la surface en donnant des poids plus ou moins importants aux différentes directions générées selon le BRDF de la surface.

$$\int_{\Omega^+} \kappa_i(\vec{\omega}_l, \vec{\omega}) L_{em,l}(\vec{\omega}_l) d\omega_l \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\kappa_i(\vec{\omega}_j, \vec{\omega}) L_{em,l}(\vec{\omega}_j)}{p(\vec{\omega}_j)} \quad 1.61$$

Cette méthode peut par exemple être utilisée pour calculer l'irradiance. L'irradiance en un point d'une surface peut être exprimée comme l'intégrale sur l'hémisphère du produit des radiances incidentes et du cosinus de leurs angles d'incidence. Cette intégrale, comme celle de la réflexion, peut être discrétisée en plusieurs rayons aléatoires distribués sur l'hémisphère. RADIANCE utilise une distribution Monte-Carlo stratifiée des rayons incidents pour calculer l'irradiance en un point [Ward 1988, Lee 1985] (Éq. 1.62).

$$E = \frac{\pi}{2n^2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{2n} L(\theta_j, \varphi_k) \quad 1.62$$

Où :

$$\theta_j = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{j-X}{n}} \right)$$

$$\varphi_k = \pi \frac{k-X}{n}$$

Avec, E l'irradiance reçue en un point, X une variable aléatoire comprise entre 0 et 1, et le nombre $2n^2$ correspond au nombre total de rayons générés.

La Figure 1.17 illustre les principes expliqués à partir de l'exemple précédent. On souhaite calculer l'irradiance sur le point 0. Depuis ce point, plusieurs rayons sont donc générés de manières aléatoires dans la scène. Pour calculer la radiance correspondante à chacun de ces rayons, leur chemin est tracé jusqu'à la source de lumière. Le trajet orange représente le trajet d'un seul de ces rayons. On peut voir qu'avant d'arriver jusqu'à la source, trois réflexions ont eu lieu sur les murs et le sol. Pour chacune de ces réflexions, un seul rayon a été généré de manière aléatoire pour approcher l'intégrale correspondant à la partie réfléchie selon le BRDF des surfaces.

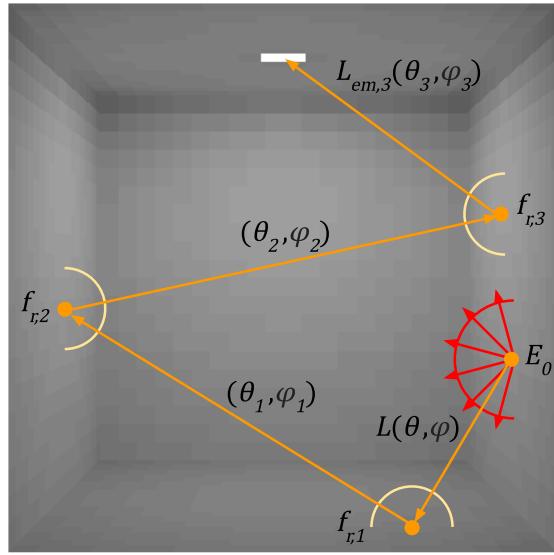


Figure 1.17 : Représentation schématique du « path-tracing » avec méthodes de Monte Carlo pour le calcul de l’irradiance en un point. Les flèches sont dans le sens du calcul, ce sens est opposé à celui de la propagation de la lumière.

La précision et le temps de calcul dans ce type de méthode numérique est directement lié au nombre de rayons émis. Pour accélérer les calculs, plusieurs techniques ont été développées comme « l’irradiance caching » [Ward 1988] qui consiste à mémoriser et réutiliser les irradiances dans certaines zones de la scène au cours du calcul. Dans le même but d’accélération des calculs, de nombreuses techniques ont été développées afin d’accélérer la recherche d’intersection des rayons avec les nombreuses surfaces de la scène en la découplant en zones [Glassner 1984].

Applications et Validations du programme RADIANCE

RADIANCE est devenu dans les années 90-00 l’outil référence de la communauté des chercheurs en éclairage en raison de ses capacités de rendu basé sur la physique [Reinhart 2006a]. Son moteur de calcul basé sur le « backward path-tracing » avec Monte Carlo pour les réflexions diffuses [Ward 1998] s’est montré efficace en produisant des images réalistes de très bonne qualité pour l’époque. L’une des principales raisons du succès de Radiance a été la validation pour chacune de ses applications. Cela en a fait l’un des outils les plus fiables actuellement utilisés pour la simulation de l’éclairage et du rayonnement.

Les premières applications et les premières validations portaient majoritairement sur le rendu réaliste d’image. Des validations ont été réalisées par [Grynberg 1989] et [Houser 1999], où des images produites avec RADIANCE ont été comparées aux photographies prises dans des espaces réels. Cependant il est difficile de valider la justesse d’une image autrement que de manière subjective même si des indicateurs de validité basées sur la perception humaine ont été proposés [Rushmeier 1995].

La validation considérée comme cruciale pour établir la validité physique de RADIANCE a été menée par [Mardaljevic 1995]. Des mesures simultanées à long terme (presque un an) de la luminance du ciel extérieur et de l’éclairement intérieur ont été recueillies par le Building Research Establishment (BRE) à Garston, au Royaume-Uni ; elles sont devenues les données de

base pour tester la capacité de RADIANCE à modéliser des conditions de ciel réalistes et de fournir des résultats précis d'éclairement intérieur en utilisant la technique des « *daylight coefficients* » [Mardaljevic 2000, 2001]. [Reinhart 2001] produit également une validation du logiciel DAYSIM utilisant le moteur de calcul RADIANCE et le modèle de ciel « *All-Weather* » de [Perez 1993]. Les résultats ont été comparés à des mesures effectuées dans une salle d'essai orientée au sud-ouest, des mesures simultanées de l'irradiance externe, directe et diffuse, et de l'éclairement lumineux interne en trois points du plan de travail, tous à 2 m de distance des fenêtres. Les données ont été recueillies pendant un mois à Fribourg (Allemagne). Les résultats obtenus sont les suivants : MBE $\leq 8\%$ et RMSE $\leq 24\%$. Ces études de validation ont grandement contribué à la reconnaissance du moteur de calcul dans le monde de l'éclairage naturel en recherche ou dans l'industrie.

Les développements réalisés plus tard concernent majoritairement la modélisation des fenêtrages complexes. [Reinhart 2006b] a notamment effectué une étude comparative similaire à la précédente, cette fois-ci en utilisant des vitrages translucides. La précision obtenue est proche de celle obtenue pour l'étude précédente avec des vitrages clairs. Les travaux de [McNeil 2013] portant sur l'établissement de modèles BSDF de fenêtrages complexes pour la méthode « *3-phase* » ont également été soumis à des tests de validité basés sur des comparaisons avec des modèles analytiques.

Concept des « Daylight Coefficients »

L'introduction de la méthode des « *Daylight Coefficient* » (*DC*) a entraîné une amélioration significative de l'efficacité des outils de simulation de l'éclairage naturel. Proposée par [Tregenza 1983], cette méthode est basée sur le fait que l'éclairement obtenu en un point quelconque de la scène est directement proportionnel aux luminances du ciel par un facteur dépendant de la forme et des matériaux de la scène. En considérant une voute céleste discrétisée en un certain nombre de tuiles, l'éclairement *E* reçu en un point d'une scène pour une condition de ciel donnée peut s'écrire comme le produit des *DC* et les luminances de chaque tuile de ciel (Éq. 1.63).

$$E = \sum_i^N DC_i L_i \quad 1.63$$

Avec, *E* l'éclairement reçu en un point quelconque de la scène, *DC* les « *Daylight Coefficients* » de chaque tuile de ciel pour ce point, et *L* les luminances des tuiles de ciel. En d'autres mots le *DC* d'une tuile de ciel pour un point de la scène correspond à l'éclairement produit sur ce point par la tuile de ciel avec une luminance unitaire. Le calcul des *DC* pour un point de la scène permet d'obtenir les éclairements pour n'importe quelle condition de ciel. Cette méthode présente un intérêt important pour le calcul d'indicateur d'éclairage naturel annuel qui requiert les éclairements à de nombreux instants, en général 8760 avec un pas de temps d'une heure durant une année entière. La commande rfluxmtx de RADIANCE est uniquement conçue pour le calcul des *DC*. A partir de ce concept, découlent les nombreuses autres méthodes plus pointues telle que la méthode « *3-phase* » [McNeil 2013] évoquée juste avant.

1.4.3. Radiosité

Principe général

L'autre méthode numérique importante pour résoudre l'équation du rendu est la méthode de la radiosité [Goral 1984]. Le problème est traité avec une approche par carreaux comme dans la méthode des éléments-finis. Son fonctionnement se base sur l'application de plusieurs hypothèses :

- *Réflexion parfaitement diffuse.* La première hypothèse consiste à considérer que l'intégralité des réflexions qui se produisent dans la scène sont parfaitement diffuses. Cela correspond à avoir une BRDF constante quel que soit l'angle d'incidence et de réflexion pour toutes les surfaces. La BRDF peut donc être sortie de l'intégrale et on peut ainsi faire apparaître la réflectance diffuse dans l'équation du rendu (Éq. 1.64).

$$L(\theta, \varphi) = L_{em}(\theta, \varphi) + \frac{\rho_d}{\pi} \int_{\Omega^+} L(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad 1.64$$

L'intégrale présente dans l'équation correspond maintenant à l'irradiance reçue sur la surface (Éq. 1.65).

$$L(\theta, \varphi) = L_{em}(\theta, \varphi) + \frac{\rho_d}{\pi} E \quad 1.65$$

- *Émission parfaitement diffuse.* Suivant le même principe, l'émission des sources est considérée parfaitement diffuse. Avec cette hypothèse supplémentaire, la radiance émise n'est donc plus dépendante de la direction et par conséquent la radiance sortante non plus.

$$L = L_{em} + \frac{\rho_d}{\pi} E \quad 1.66$$

En multipliant tous les termes de l'équation par π , on obtient la formule suivante faisant apparaître l'exitance (pour la partie émise) et la radiosité (pour la partie totale sortante). On retrouve bien dans cette équation la définition de la grandeur de radiosité présentée précédemment.

$$\begin{array}{rcl} B & = & M \\ \text{radiosité} & & \text{exitance} \\ & & + \rho_d E \\ & & \text{irradiance réfléchie} \end{array} \quad 1.67$$

- *Environnement discrétilisé.* Les surfaces de l'environnement sont discrétilisées en éléments de géométrie simple appelés carreaux. On suppose que la radiosité, l'exitance, l'irradiance et la réflectance d'un carreau sont constants sur toute sa surface. Avec cette hypothèse, l'irradiance reçue sur un carreau peut s'écrire comme la somme de ce qu'il reçoit en provenance de tous les autres carreaux. La contribution d'un carreau j sur l'irradiance reçue d'un carreau i est égale au produit entre F_{ij} , le facteur de vue du carreau i vers le carreau j , et B_j la radiosité du carreau j . Cela donne l'équation de la radiosité :

$$\begin{array}{rcl} B_i & = & M_i + \rho_{d,i} \sum_j F_{ij} B_j \\ \text{radiosité} & \text{exitance} & \underbrace{\sum_j}_{\text{irradiance réfléchie}} \end{array} \quad 1.68$$

Il existe autant d'équations similaires que de carreaux dans la scène. Si l'on considère qu'il y a n carreaux, on obtient un système linéaire à n équations et n inconnues qui sont les radiosités B de chaque carreau. Sous forme matricielle, le système s'écrit :

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_{d,1}F_{11} & \rho_{d,1}F_{12} & \cdots & \rho_{d,1}F_{1n} \\ \rho_{d,2}F_{21} & \rho_{d,2}F_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \rho_{d,n}F_{n1} & \cdots & \cdots & \rho_{d,n}F_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{B} = \mathbf{M} + \mathbf{RFB} \quad 1.69$$

Avec, \mathbf{B} le vecteur contenant les radiosités de chacun des n carreaux, \mathbf{M} le vecteur contenant les exitances, \mathbf{R} la matrice diagonale contentant les réflectances, \mathbf{F} la matrice carrée contenant les facteurs de vue entre chaque carreau.

Facteurs de vue – Concept

Dans l'équation de la radiosité apparaît le facteur de vue F_{ij} . Il est défini ainsi :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{x \in A_i} \int_{y \in A_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(x, y) dy dx \quad 1.70$$

Avec, A_i l'aire du carreau i , x un point appartenant au carreau i , y un point appartenant au carreau j , θ l'angle entre la normale du carreau i au point x et la direction entre x et y , θ' l'angle entre la normale du carreau j au point y et la direction entre y et x , r la distance entre x et y , $V(x, y)$ la fonction de visibilité binaire entre x et y (1 si ils se voient entre eux, 0 si masqués).

Si l'on multiplie l'expression du facteur de vue précédente par A_i , on s'aperçoit que son expression est symétrique entre i et j , et il existe alors la relation de réciprocité suivante entre F_{ij} et F_{ji} :

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad 1.71$$

Le facteur de vue F_{ij} est initialement défini comme la fraction du flux total sortant du carreau i reçue par le carreau j . Cette définition de F_{ij} est contre intuitive au vu de la formulation de l'équation de la radiosité. L'équation de la radiosité est exprimée avec des grandeurs de densité de flux surfacique en W.m^{-2} tandis que le facteur de vue correspond au rapport de deux flux en W . Si l'on écrit l'équation de la radiosité en termes de flux, c'est-à-dire en multipliant par les surfaces des carreaux, et en utilisant la relation de réciprocité précédente, on retrouve bien l'équation de la radiosité exprimée avec F_{ji} :

$$\begin{aligned}
 A_i B_i &= A_i M_i + A_i \rho_i \sum_j F_{ij} B_j \\
 &= A_i M_i + \rho_i \sum_j F_{ji} A_j B_j
 \end{aligned} \tag{1.72}$$

Le facteur de vue F_{ij} peut alors être également défini comme la fraction de la radiosité produite par le carreau j reçue directement par le carreau i .

Les facteurs de vue possèdent deux propriétés importantes : Si la surface d'un carreau est parfaitement plane, alors son propre facteur de vue est nul c'est-à-dire que le carreau ne se voit pas lui-même.

$$F_{ii} = 0 \tag{1.73}$$

L'autre propriété est la règle de fermeture. La somme des facteurs de vue d'un carreau doit être égale 1. En pratique, il peut arriver que cette somme soit inférieure à 1 si l'environnement n'est pas parfaitement fermé et que le carreau voit le vide.

$$\sum_j F_{ij} = 1 \tag{1.74}$$

Facteurs de vue – Calcul

Le calcul des facteurs de vue représente une des deux parties les plus importantes de la méthode de radiosité et surtout la plus lourde en termes de charge informatique. Beaucoup d'efforts ont donc été faits afin d'améliorer la précision et la rapidité de cette étape du calcul. De nombreuses méthodes de calcul existent (Figure 1.18). Elles vont des méthodes analytiques pour les formes les plus simples, jusqu'aux méthodes numériques plus spécifiques pour les environnements comportant des parties cachées [Cohen 1993].

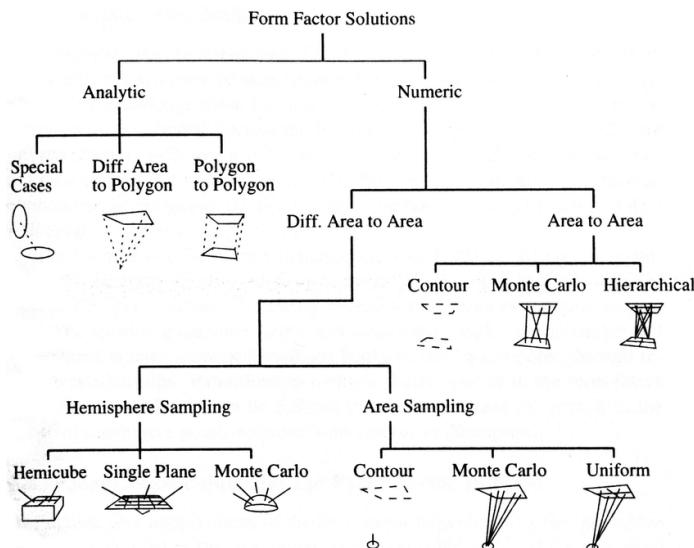


Figure 1.18 : Liste (non-exhaustive) des principales techniques de calcul des facteurs de vue existantes [Cohen 1993].

Dans des environnements complexes, comme c'est le cas de l'environnement bâti, les facteurs de vue sont habituellement calculés avec des méthodes numériques. Pour simplifier le calcul, le facteur de vue F_{ij} n'est pas calculé depuis la surface A_i vers la surface A_j (Surface-Surface), mais depuis la surface différentielle dA_i vers la surface A_j (Point-Surface) [Beckers 2014]. On considère alors ce facteur de vue constant sur la surface du carreau i . Cela permet de supprimer une intégrale à l'équation du facteur de vue.

$$F_{ij} \approx F_{dA_i - A_j} = \int_{y \in A_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(x, y) dy \quad 1.75$$

Selon l'analogie de Nusselt, le facteur de vue $F_{dA_i - A_j}$ peut être défini comme la fraction de la surface sur le disque de rayon unitaire obtenue en projetant la surface A_j sur l'hémisphère de rayon unitaire centré sur dA_i puis sur le disque [Sillion 1994] :

$$F_{dA_i - A_j} = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_j} \cos \theta d\omega \quad 1.76$$

Avec, Ω_j l'ensemble des directions non-masquées de dA_i vers le carreau j .

La plupart des méthodes de calcul numériques des facteurs de vue reposent sur cette hypothèse. Historiquement, la méthode de l'hémicube [Cohen 1985] est la plus utilisée car la plus rapide. Cette technique consiste à placer un demi cube au-dessus de la surface différentielle dA_i , de partitionner chacune des facettes du demi cube en plusieurs éléments (pixels), puis de projeter la scène sur les facettes de l'hémicube. Chaque pixel a un facteur de vue correspondant calculé au préalable, et ce facteur de vue est attribué au carreau vu à travers ce pixel. Cette technique tire les avantages de la technique du z-buffer, optimisée pour les cartes graphiques [Baum 1990, Bu 1989], pour déterminer les parties cachées rapidement dans des environnements complexes, ce qui en fait la technique la plus couramment utilisée pour le calcul des facteurs de vue. Néanmoins cette technique possède quelques inconvénients notamment liés à l'hypothèse de simplification point-surface et à la distribution non uniforme des directions [Baum 1989].

D'autres méthodes de calcul numériques des facteurs de vue par lancer de rayons ont été introduites [Maxwell 1986, Malley 1988]. Ces méthodes tirent profit des atouts des algorithmes de lancer de rayons notamment pour la flexibilité de la définition des directions des rayons générées. Pour calculer les facteurs de vue depuis un carreau, on trace des rayons depuis le carreau d'origine vers la scène dans des directions réparties sur l'hémisphère supérieur du carreau. La distribution de ces directions peut se faire de n'importe quelle façon. Par exemple, la méthode de Monte-Carlo proposée par [Malley 1988], consiste à générer aléatoirement et de manière uniformément répartie des points sur un disque de rayon unitaire puis de les projeter sur l'hémisphère correspondant. Ainsi les directions du centre de la sphère vers les différents points représentent des directions aléatoirement générées qui tiennent compte du $\cos \theta$ de l'analogie de Nusselt.

Résolution du système d'équation

Il existe différentes méthodes pour finalement résoudre le système des radiosités (Éq. 1.69) [Fernández 2014]. Les plus basiques sont présentées ici. La première consiste à reformuler

l'Équation 1.69. En exprimant les radiosités \mathbf{B} comme le produit entre l'inverse de la matrice $(\mathbf{I} - \mathbf{RF})$ et le vecteur des exitances \mathbf{M} . En inversant la matrice $(\mathbf{I} - \mathbf{RF})$, la solution exacte du problème est directement obtenue en prenant en compte l'infinité des réflexions. Cette méthode de résolution n'est pas toujours possible notamment lorsque le nombre de carreau est important impliquant des temps de calcul très long.

$$\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \mathbf{RF})^{-1} \mathbf{M} \quad 1.77$$

Lorsque la résolution par inversion n'est pas possible, des méthodes de résolution itératives [Saad 2003] moins contraignantes peuvent être utilisées. La méthode de Jacobi par exemple consiste à calculer une approximation des radiosités itérativement en utilisant généralement l'hypothèse de départ : $\mathbf{B} = \mathbf{M}$. Effectuer une nouvelle itération correspond à prendre en compte une réflexion supplémentaire. Un nombre d'itération t maximum doit cependant être fixé pour que le calcul s'arrête. L'infinité des réflexions ne peut donc pas être pris en compte avec les méthodes itératives.

$$\mathbf{B}^{(t)} = \mathbf{M} + \mathbf{RFB}^{(t-1)} \quad 1.78$$

$$B_i^{(t)} = M_i + \rho_{d,i} \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j^{(t-1)} \quad 1.79$$

La méthode Gauss-Seidel est une adaptation de la méthode de Jacobi qui consiste à réutiliser dès que possible les nouvelles radiosités fraîchement calculées afin d'accélérer la convergence du calcul. Contrairement à la méthode de Jacobi, le nombre d'itération ne correspond pas au nombre de réflexions prises en compte et n'a aucune signification physique.

$$B_i^{(t)} = M_i + \rho_{d,i} \sum_{j=1}^i F_{ij} B_j^{(t)} + \rho_{d,i} \sum_{j=i+1}^n F_{ij} B_j^{(t-1)} \quad 1.80$$

Extensions de la radiosité pour la prise en compte des échanges non-diffus

La limite majeure de la méthode de radiosité réside dans son incapacité à pouvoir modéliser des surfaces qui réfléchissent autrement que de manière parfaitement diffuse. Différentes solutions pour prendre en compte les échanges non-diffus avec la méthode de radiosité ont été créées dans le domaine de l'infographie.

Dans la méthode de [Immel 1986], la relation entre chaque direction de sortie pour chaque patch puis chaque direction de sortie pour chaque autre patch et ainsi de suite doit être déterminée. Il en résulte un nombre très important de radiances inconnues à résoudre simultanément. Pour rendre ce calcul possible, il faut non seulement discréteriser les surfaces, mais aussi l'hémisphère des directions entrantes et sortantes. Cette discrétisation n'est cependant pas suffisante pour rendre le calcul faisable. En effet, même pour des scènes relativement simples le nombre d'équations produites devient intraitable.

D'autres ont essayé de combiner les avantages du lancer de rayon avec les algorithmes de radiosité pour lever la limitation des réflexions diffuses. Ces techniques sont regroupées sous le nom des méthodes « *Two Pass* ». Le principe général de ces méthodes est basé sur la séparation des modes

de réflexion : Il s'agit d'utiliser un algorithme de radiosité pour les échanges diffus et un algorithme de lancer de rayons pour les échanges non-diffus.

La première méthode de cette catégorie proposée par [Wallace 1987] utilise la radiosité pour calculer les échanges par réflexions diffuses dans l'environnement. Une fois les échanges diffus calculés, un point et un angle de vue définissant la perspective de l'image souhaitée sont choisis et des rayons sont lancés à partir du point vers la scène dans le champ défini. Pendant l'étape du lancer de rayons, chaque fois qu'un rayon atterrit sur une surface diffuse, la radiance est déterminée à partir des radiosités précalculées. Si un rayon atterrit sur une surface spéculaire, le trajet du rayon se poursuit jusqu'à trouver une surface diffuse et ainsi calculer la radiance correspondante. Bien que ce système produise des images de très bonne apparence, il n'apporte pas une solution complète. Le rayonnement dans ce modèle est calculé comme la somme d'une composante spéculaire et d'une composante diffuse. Cela revient à définir ces deux termes comme complètement indépendants, ce qui n'est pas le cas en réalité.

Les facteurs de vue étendus

L'approche proposée par [Sillion 1989] permet une prise en compte complète et globale du problème. C'est la première méthode qui n'implique pas l'hypothèse selon laquelle les réflexions spéculaires et diffuses sont indépendantes. Le concept clé des facteurs de vue étendus est introduit. Cette méthode performante et robuste a été utilisée et adaptée dans d'autres techniques pour la création d'image sophistiquées [Chen 1991]. Les équations suivantes reprennent, étape par étape, la démonstration du concept des facteurs de vue étendus pour la radiosité développée dans [Sillion 1989, 1994].

La première hypothèse de calcul consiste à considérer l'émission du rayonnement par les surfaces comme parfaitement diffus. Dans ce cas, la radiance émise par un carreau est indépendante de la direction : $L_{em}(\theta, \varphi) = L_{em,d}$. La seconde hypothèse consiste à séparer les modes de réflexion diffus et spéculaire. La BRDF d'une surface est alors définie par la somme de sa BRDF diffuse et de sa BRDF spéculaire :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = f_{r,d} + \underbrace{f_{r,r}(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi)}_{\mathcal{R}_r} \quad 1.81$$

L'équation du rendu de Kajiya est reformulée ainsi :

$$L(\theta, \varphi) = L_d + \mathcal{R}_r L(\theta, \varphi) \quad 1.82$$

$L(\theta, \varphi)$ représente la radiance produite (émission + réflexion diffuse et spéculaire) par une surface dans la direction (θ, φ) . L_d représente la radiance produite de manière diffuse (émission + réflexion) dans cette direction. Elle est définie ainsi :

$$L_d = L_{em,d} + f_{r,d} \int_{\Omega^+} L(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad 1.83$$

Et $\mathcal{R}_r L(\theta, \varphi)$ représente la radiance correspondant à la réflexion spéculaire produite dans cette direction. \mathcal{R}_r est un opérateur linéaire qui transforme la distribution des radiances incidentes dans la distribution obtenue en considérant une réflexion spéculaire sur la surface. Il est défini ainsi :

$$\mathcal{R}_r L(\theta, \varphi) = \int_{\Omega^+} f_{r,r}(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) L(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad 1.84$$

A partir de l'inversion de l'équation 1.84, la nouvelle équation ci-dessous établit la relation entre la radiance L , directionnelle, et la radiance L_d , indépendante de la direction, ce qui rend la radiance L également indépendante de la direction. L'équation fait apparaître l'opérateur global des réflexions spéculaires \mathcal{R}_r^* . Contrairement à \mathcal{R}_r qui représente l'effet d'une seule réflexion spéculaire, \mathcal{R}_r^* représente l'effet de plusieurs réflexions spéculaires à la suite (série de Neumann).

$$L = (1 - \mathcal{R}_r)^{-1} L_d = \left(\sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{R}_r^k \right) L_d = \mathcal{R}_r^* L_d \quad 1.85$$

De la même façon, il est possible d'exprimer l'Équation 1.83 avec un opérateur \mathcal{R}_d représentant l'effet d'une réflexion diffuse :

$$L_d = L_{em,d} + \mathcal{R}_d L(\theta, \varphi) \quad 1.86$$

Avec, $\mathcal{R}_d L_d = f_{r,d} \int_{\Omega^+} L(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i$

En remplaçant L dans cette équation par son expression précédente, on obtient :

$$L_d = L_{em,d} + \mathcal{R}_d \cdot \mathcal{R}_r^* \cdot L_d \quad 1.87$$

Dans l'équation précédente, les deux opérateurs \mathcal{R}_d et \mathcal{R}_r^* représentent respectivement l'effet d'une réflexion diffuse et l'effet de l'ensemble des inter-réflexions spéculaires produites à la suite. Cette équation fait maintenant intervenir uniquement des radiances émises de manière diffuse permettant ainsi le passage à une formulation radiosité de l'équation. L'équation de la radiosité associée à cette nouvelle équation de L_d doit comprendre l'ensemble des réflexions spéculaires. Le facteur de vue étendu F_{ij}^{ext} contenant l'ensemble des réflexions spéculaires est alors introduit.

$$B_i = M_i + \rho_i \sum_j F_{ij}^{ext} B_j \quad 1.88$$

F_{ij}^{ext} est défini comme la fraction de la radiosité produite par réflexion ou émission par le carreau P_j reçue par le carreau P_i directement et/ou après une ou plusieurs réflexions spéculaires. On peut ainsi décomposer F_{ij}^{ext} en deux parties.

$$F_{ij}^{ext} = F_{ij} + S_{ij} \quad 1.89$$

F_{ij} est le facteur de vue classique, et S_{ij} représente la partie spéculaire du facteur de vue étendue et est défini comme la fraction de la radiosité produite par le carreau P_j reçue par le carreau P_i seulement après une ou plusieurs réflexions spéculaires.

I.5. Evaluation de l'éclairage naturel en architecture et urbanisme

L'éclairage naturel est un élément essentiel à prendre en compte lors de la conception de bâtiment ou de quartier. Pour appuyer leurs décisions aux différents stades de la conception, les architectes et les concepteurs utilisent des indicateurs différents pour évaluer les performances en éclairage naturel de leur projet. Ces indicateurs sont référencés dans cette section. Une analyse portant sur les seuils d'éclairement à considérer vis-à-vis des aspects visuels et non-visuels de la lumière naturelle est présentée.

I.5.1. Indicateurs statiques

Les simulations de la lumière naturelle reposent sur un ensemble de concepts et de modèles provenant de différents domaines. Avant les progrès survenus autour des années 90 dans la définition des modèles de ciel et dans la simulation des échanges radiatifs, des indicateurs simples ont dû être utilisés pour évaluer l'éclairage naturel des espaces. Grâce à leur simplicité, ces indicateurs sont à la fois faciles à calculer et également à mesurer. C'est pourquoi ils sont encore aujourd'hui largement utilisés. Ces indicateurs sont dits statiques car ils ne dépendent ni du moment de l'année ou de la journée, ni de la localisation, ni des conditions climatiques.

Sky View Factor (SVF)

Le « *Sky View Factor* » (facteur de vue du ciel) correspond à la fraction de ciel observable à partir d'une surface. Ce facteur est purement géométrique. Il permet d'évaluer l'exposition vis-à-vis du ciel des espaces intérieurs et extérieurs [Beckers 2014].

Daylight Factor (DF)

Le « *Daylight Factor* » (facteur de lumière du jour) est le rapport entre l'éclairement intérieur reçu en un point d'une surface, généralement le plan de travail, et l'éclairement extérieur simultané obtenu sur une surface horizontale. Le ciel 16 de la CIE doit être utilisé [Moon 1942]. Ce modèle de ciel représente une condition de ciel avec une épaisse couverture nuageuse correspondant au pire scénario d'éclairement. Contrairement au SVF, le DF n'est pas purement géométrique. En effet, les capacités de réflexion et de transmission de l'environnement bâti interviennent dans l'éclairement intérieur.

I.5.2. Indicateurs dynamiques

Les indicateurs dynamiques calculés à partir de données climatiques, aussi appelés indicateurs CBDM pour « *Climate Based Daylight Modeling* », sont devenus les méthodes de référence ces dernières années. Ils sont maintenant présents dans des directives et normes de construction officielles comme la norme [EN 17037], première norme européenne exclusivement dédiée à l'éclairage naturel dans les bâtiments, appliquée depuis décembre 2018, ou comme dans les méthodes standardisées par l'Illuminating Engineering Society [IESNA 2012]. Ils permettent une évaluation précise de la lumière du jour sur une année entière, en tenant compte de la nature dynamique des conditions d'éclairage naturelle en fonction du temps de la saison et du climat pour n'importe quelle localisation [Reinhart 2006c, Mardaljevic 2013]. Les calculs sont effectués

pour une année entière avec généralement un pas de temps d'une heure, soit un total de 4380 conditions d'éclairement différentes ($= 365 \times 24 / 2$). L'aspect dynamique et la notion de temps sont alors présents dans ces indicateurs. Voici les deux principaux indicateurs basés sur cette méthode :

Daylight Autonomy (DA)

Parmi ces indicateurs CBDM, la « *Daylight Autonomy* » (autonomie en éclairage naturelle) [Reinhart 2006c] est la plus basique. Elle représente le pourcentage de temps dans l'année où l'éclairement reçu sur le plan de travail est considéré suffisant, c'est-à-dire lorsqu'il dépasse un certain seuil d'éclairement minimal fixé suivant différents critères. Toutes les heures de l'année ne sont pas nécessairement prises en compte dans le calcul. Seules les heures d'occupation peuvent être sélectionnées, par exemple de 8h à 18h pour des bureaux.

Useful Daylight Illuminance (UDI)

« *L'Useful Daylight Illuminance* » [Nabil 2005] (éclairement naturel utile) est similaire au DA à la différence que l'UDI possède, en plus du seuil d'éclairement minimal, un seuil maximal supplémentaire à ne pas dépasser. Ce seuil maximal pénalise les conditions avec un éclairement trop fort pouvant être à l'origine d'inconfort lié à l'éblouissement.

1.5.3. A propos des seuils d'éclairement

Fonction visuelle de la lumière

Le calcul de chacun des indicateurs dynamiques présentés ci-dessus requiert de définir un seuil d'éclairement minimal sur le plan de travail. Ce seuil est choisi en fonction des besoins d'éclairement liés à l'utilisation de l'espace étudié. Le DA et l'UDI ont à l'origine été utilisés pour étudier des espaces de travail comme des bureaux ou des salles de classe. De par l'occupation importante de ces espaces au cours des journées et de l'année, l'utilisation de la lumière naturelle aux dépens de la lumière artificielle peut constituer des économies d'énergie conséquentes. L'objectif pour les concepteurs est alors d'augmenter le DA pour limiter la consommation liée à l'utilisation de l'éclairage artificiel. Ces indicateurs et notamment le DA sont utilisés en ce sens pour la conception. Le choix du seuil d'éclairement minimal s'est alors logiquement appuyé sur les objectifs définis par les réglementations d'éclairage artificiel, soit un éclairement sur le plan de travail généralement compris entre 300 et 500 lux minimum.

Cependant, ces seuils sont discutables. Même si les industriels cherchent à reproduire au mieux le spectre de la lumière naturelle pour leur luminaire, la lumière artificielle reste émise dans un spectre différent et moins complet que celui de la lumière naturelle. La lumière naturelle produit la meilleure perception et reste la lumière la plus agréable d'un point de vue purement visuel pour l'homme. Cela se traduit par une tolérance à des niveaux plus bas d'éclairement naturel que d'éclairement artificiel [Jakubiec 2018]. Il est commun d'observer que les gens tolèrent des niveaux d'éclairement de lumière du jour beaucoup plus faibles que de lumière artificielle, en particulier lorsque la lumière du jour diminue en fin de journée. Il est fréquent que les gens continuent à lire ou travailler à des niveaux aussi bas que 50 lux, c'est-à-dire 5 fois plus bas que les recommandations d'éclairage artificiel [Baker 2000]. Dans le même sens, [Paule 2015] a étudié l'activation manuelle de la lumière artificielle et des stores vénitiens par les occupants dans

les bureaux d'un même bâtiment. Il en ressort que lorsque l'éclairage électrique n'est pas automatisé, en moyenne, les utilisateurs allument la lumière lorsque le niveau d'éclairement intérieur est inférieur à 150 lux au centre de la pièce soit nettement inférieur aux 300 ou 500 lux prescrits.

Ces indicateurs CBDM peuvent également être utilisés pour l'évaluation d'espaces destinés à une utilisation autre que tertiaire. Dans le résidentiel notamment, les attentes ne sont pas les mêmes pour les occupants. Des niveaux plus faibles peuvent être suffisants pour éclairer des espaces autres que des espaces de travail. Certains organismes comme le [CIBSE 2013] recommande des niveaux d'éclairement minimal entre 100 et 150 lux dans les espaces de vie comme les salons ou les chambres, et également pour les espaces de type cuisines et salle d'eau. La norme européenne [EN 12464], dédiée à l'éclairage des espaces de travail, impose des niveaux d'éclairement minimal pour les zones destinées à d'autres fonctions que des tâches de travail spécifiques, comme les zones de déplacements (couloir) ou les zones communes (bibliothèque, vestiaire, réfectoire...), entre 50 et 200 lux.

Fonctions non-visuelles de la lumière

La lumière du jour peut avoir des répercussions positives sur la vie des individus sur deux principaux aspects : contribuer au confort visuel et à une meilleure perception de l'environnement par l'intermédiaire du système visuel ; mais également sur la santé par l'intermédiaire du système circadien, agissant sur les rythmes biologiques, et par l'intermédiaire de la peau pour la régulation de la production de vitamine D.

Depuis le début des années 1980, les chercheurs s'intéressent à la façon dont la lumière affecte la santé, et plus précisément le rythme circadien. En 2002, un troisième photorécepteur a été découvert sur la rétine [Berson 2002]. Il s'agit des cellules ganglionnaires à mélanopsine. Depuis cette découverte, d'autres fonctions autres que visuelles sensibles à la lumière ont pu être décrites. En effet, ces cellules sont liées à diverses fonctions dans le corps humain responsables de la régulation du cycle de 24 heures éveil/sommeil comme la sécrétion de mélatonine, aussi appelé hormone du sommeil sécrétée pour faciliter l'endormissement [Zeitzer 2000]. Cela a aussi encouragé de nombreuses recherches pour des utilisations de la lumière à des fins thérapeutiques très spécifiques : Effets de la lumière sur la maladie d'Alzheimer et de Parkinson [Van Someren 1999] et sur les troubles dépressifs [Rosenthal 1984, Germain 2008].

Compte tenu de l'importance de la synchronisation du système circadien et de la nature des fonctions non visuelles, la lumière apparaît comme un besoin biologique indispensable au bon fonctionnement de l'organisme.

D'un point de vue quantitatif, il est très difficile de définir quelle serait la « dose » minimale de lumière quotidienne. Certaines études renseignent sur l'ordre de grandeur à partir duquel l'exposition à la lumière se fait ressentir sur le système circadien. Une série d'expériences rapporte que la lumière, même d'intensité relativement faible, a un grand effet sur la régulation du rythme circadien de l'homme [Czeisler 1989, Boivin 1996, Boivin 1998]. [Zeitzer 2000] indique également que le rythme circadien est très sensible à la lumière ambiante intérieure et que des variations mineures de l'intensité lumineuse ambiante peuvent avoir un impact majeur sur notre système circadien. La Figure 1.19 nous montre que la sensibilité du système circadien vis-à-vis de l'exposition à la lumière n'est pas linéaire. A partir de 50 lux reçu au niveau des yeux

jusqu'à 500 lux, la quasi-totalité des effets sont produits. La moitié des résultats obtenus sous une condition de fort éclairement de 9000 lux est atteint avec un niveau d'éclairement compris entre 50 et 130 lux, soit 2 ordres de grandeur inférieurs.

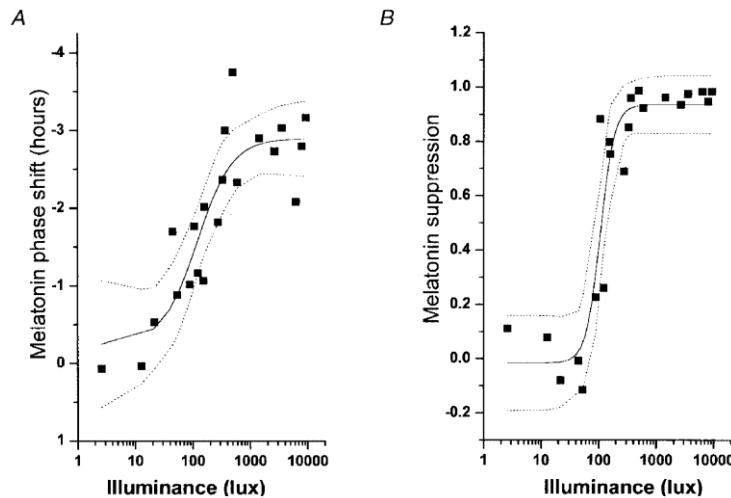


Figure 1.19 : Effet de l'éclairement reçu au niveau des yeux sur le décalage du rythme de sécrétion de mélatonine (A) et sur la suppression de mélatonine (B) pour une durée d'exposition de 6,5h [Zeitzer 2000].

D'autres chercheurs essayent d'apporter des réponses plus précises quant à la quantité journalière de lumière utile pour l'homme. [Rea 2005] a proposé un modèle de la phototransduction circadienne humaine basé sur les recherches faites sur la suppression et le décalage de la mélatonine sous exposition à la lumière, et en neuroanatomie et neurophysiologie sur le système visuel et circadien. L'objectif est d'offrir un modèle simplifié applicable au domaine de l'architecture. Ce modèle est appelé Circadian Stimulus (CS). A partir de la lumière reçue au niveau des yeux, il est possible d'estimer ce CS. Le CS est une transformation de cet éclairement reçu en unités relatives :

- de 0, seuil d'activation du système circadien,
- à 0,7, saturation des effets sur le système circadien

Les recherches produites par le Lighting Research Center [Figueiro 2016] auprès de patients atteints de la maladie d'Alzheimer, d'employés de bureau, d'adolescents et de personnes âgées en bonne santé montrent que l'exposition à un CS de 0,3 ou plus au niveau de l'œil, pendant au moins une heure de préférence au début de la journée, est suffisamment efficace pour stimuler le système circadien et est associée à un meilleur sommeil et à une amélioration du comportement et de l'humeur.

Une prise en compte du spectre d'émission de la lumière joue un rôle dans la sensibilité du système circadien et donc également dans le calcul du CS. Pour un spectre de ciel standardisé CIE D65 correspondant à un ciel sous des conditions moyennes, un éclairement de 180 lux au niveau des yeux suffit pour atteindre un CS de 0,3. Par comparaison, pour obtenir le même CS de 0,3 avec une lampe LED standard, un éclairement de 350 lux est nécessaire. Ceci s'explique par la répartition différente et moins efficace du spectre d'émission de la lampe artificielle. Il est important de noter que ces valeurs d'éclairement doivent être mesurées au niveau et dans la direction du regard. [Acosta 2017] a étudié les performances d'une salle d'hôpital en s'appuyant

sur le CS. Dans une chambre d'hôpital, la position et la direction des patients sont connues. Or, pour l'évaluation d'un espace lors de sa conception, il est difficile de prévoir la position et la direction du regard des occupants d'un espace.

A propos des seuils d'éclairement : Conclusions

La contribution positive de la lumière naturelle sur les aspects visuels et non-visuels semble être assimilée, par expérience ou par connaissance, par une majorité des personnes. Plusieurs enquêtes ont démontré que les gens préfèrent la lumière du jour à la lumière électrique notamment pour la qualité de l'éclairement produit et pour ses effets sur la santé [Galasiu 2006]. [Cuttle 1983] a constaté que 86 % des 471 participants à un sondage effectué dans des bureaux préfèrent travailler dans des espaces éclairés par la lumière du jour. Lorsque leur sont demandées les raisons pour lesquelles ils préfèrent la lumière naturelle, la majorité indique que la lumière du jour est plus confortable que l'éclairage électrique et qu'elle contribue à réduire leur stress au travail.

Définir un seuil d'éclairement restera toujours un choix d'hypothèse discutable. Au regard des travaux présentés dans les paragraphes précédents, des valeurs d'éclairement naturel plus faibles que celles couramment recommandées en éclairage artificiel restent tout autant appréciées. De même, le fait qu'une exposition à des niveaux de lumières naturelle considérés faibles exerce un effet positif pour la santé de l'homme justifie également de pouvoir prendre en considération des niveaux cibles d'éclairement plus bas. Compte tenu des ordres de grandeurs évoqués dans les paragraphes précédents et dans un but de simplification, un seuil d'éclairement horizontal de 100 lux est retenu pour l'évaluation des performances des pièces intérieures dans cette étude.

I.6. Prise en compte des apports solaires en architecture et urbanisme

I.6.1. Méthodes statiques et réglementations thermiques

À la suite du premier choc pétrolier de 1973, les premières réglementations thermiques appliquées aux bâtiments dans le monde, et notamment en France, sont créées (RT 1974). Le but est simple : réduire de 25% la consommation énergétique des bâtiments. L'évaluation des performance est basée sur le calcul des coefficients de transmission thermique K (maintenant U) en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ des parois et du coefficients des déperditions globales G en $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Avec cette approche statique, l'accent est essentiellement porté sur l'isolation thermique. Les apports solaires ne sont alors jusque-là pas pris en compte.

Après le second choc pétrolier de 1979, la réglementation thermique est renforcée (RT 1982 et 1988) pour réduire davantage les consommations énergétiques. Un nouveau coefficient B, pour les besoins de chauffages, et un nouveau coefficient C, pour les consommations prenant en compte le rendement des systèmes de chauffage, voient le jour. Les apports solaires sont cette fois-ci pris en compte dans le coefficient B de manière forfaitaire, selon l'orientation des parois et la zone climatique.

Dans les réglementations thermiques plus récentes de 2000, 2005 et 2012, les ambitions de réductions des consommations d'énergie sont croissantes. La prise en compte des apports solaires dans les calculs réglementaires est de plus en plus détaillée avec des zones climatiques plus précises, une prise en compte des masques extérieurs, des dispositifs de protection solaire, etc. Cependant il s'agit encore de modèles très simplifiés basés sur des coefficients forfaits ne tenant pas compte de la nature dynamique du problème.

I.6.2. Simulations Thermiques Dynamiques et méthodes nodales avec EnergyPlus

Dans les années 1970, les premières méthodes de calcul thermique dynamiques sont développées basées pour la plupart sur des analogies thermiques-électriques. Les Simulations Thermiques Dynamiques (STD) permettent de prendre en compte les aspects dynamiques influent sur l'équilibre énergétique des bâtiments : variations des températures, du rayonnement solaire, l'inertie thermique, etc... La charge de calcul était beaucoup trop lourde à l'époque pour que ces méthodes soient utilisées lors des étapes de conception et elles sont devenues de plus en plus utilisées grâce aux progrès en informatique.

Au début des années 2001, sort EnergyPlus [Crawley 2001]. Il est le moteur de calcul référence dédié à la thermique du bâtiment. Dans ce moteur de calcul basés sur les analogies thermiques électriques, les apports solaires sont calculés en tenant compte des aspects dynamiques tel que la position du soleil et les conditions de ciel. Les apports solaires sont calculés heure par heure au sein du moteur de calcul avec une méthode de lancer de rayons. Chaque surface du modèle sont représentées par 4 points d'intérêt où 90 rayons sont lancés afin de calculer le rayonnement solaire provenant du ciel, du soleil, et de l'environnement urbain par réflexion. Certaines hypothèses simplificatrices importantes sont faites :

- une seule réflexion avec l'environnement extérieur est prise en compte,
- le rayonnement qui parvient à l'intérieur des bâtiments est réparti forfaitairement sur les différentes surfaces.
- le rayonnement reçu sur les parois intérieures et extérieures (planchers, façades, ...) est considéré constant sur la totalité des surfaces, ce qui simplifie fortement la distribution spatiale du rayonnement et particulièrement celle du rayonnement direct du soleil.

Méthodes nodales avec calcul radiatif précis

Des études ont été faites en combinant le moteur de calcul RADIANCE pour le calcul radiatif des apports solaires avec EnergyPlus [Fernandes 2015, Hoffmann 2016]. L'apport principal de RADIANCE dans ce type d'étude est la prise en compte précise de modèle de réflexion et de transmission de fenêtrage complexe comprenant des dispositifs d'ombrage avec des formes complexes et mobiles.

D'autres programmes de calcul thermique basés sur des méthodes nodales utilisent des méthodes de calcul du rayonnement solaire basé sur la méthode de la radiosité comme SOLENE-microclimat [Miguet 2000, Musy 2015] et Citysim [Robinson 2009]. Ces deux programmes principalement conçus pour des études thermiques d'environnement urbain tirent profit de la méthode de la radiosité notamment pour le calcul rapide des inter-réflexions diffuses par itération sur l'ensemble du modèle.

1.6.3. L'approche éléments-finis

Une des méthodes, récemment développées pour les contextes urbains, utilise la méthode des éléments-finis pour résoudre le problème thermique complet avec une considération spatiale fine. La méthode par éléments-finis requiert un maillage volumique de la scène urbaine où le rayonnement solaire est calculé sur les carreaux exposés au rayonnement ; ils constituent la peau du modèle.

[Aguerre 2019] réalise une comparaison entre une séquence de thermographies prise dans une rue du centre-ville de Bayonne et les thermographies simulées par cette méthode avec Cast3m [El Ganaoui 2005]. Pour la partie radiative, la méthode de radiosité est utilisée pour le calcul des apports solaire sur la peau du maillage ainsi que pour le calcul des échanges en ondes longues.

Le modèle de calcul montre des résultats probants (Figure 1.20), reproduisant le même ordre de grandeur et l'apparence générale des résultats mesurés. De plus, les résultats permettent d'évaluer l'équilibre du flux de chaleur en divers points utiles de la géométrie, et l'impact associé à la modification des paramètres de la scène.

Avec un modèle 3D plus fin de la rue et la correction des thermographies simulées en prenant en considération l'aspect brillant des réflexions, des rendus encore plus proches des thermographies réelles sont obtenues (Figure 1.21) [Aguerre 2020]. L'avantage de la méthode pour une prise en compte spatiale précise du problème thermique ressort clairement.

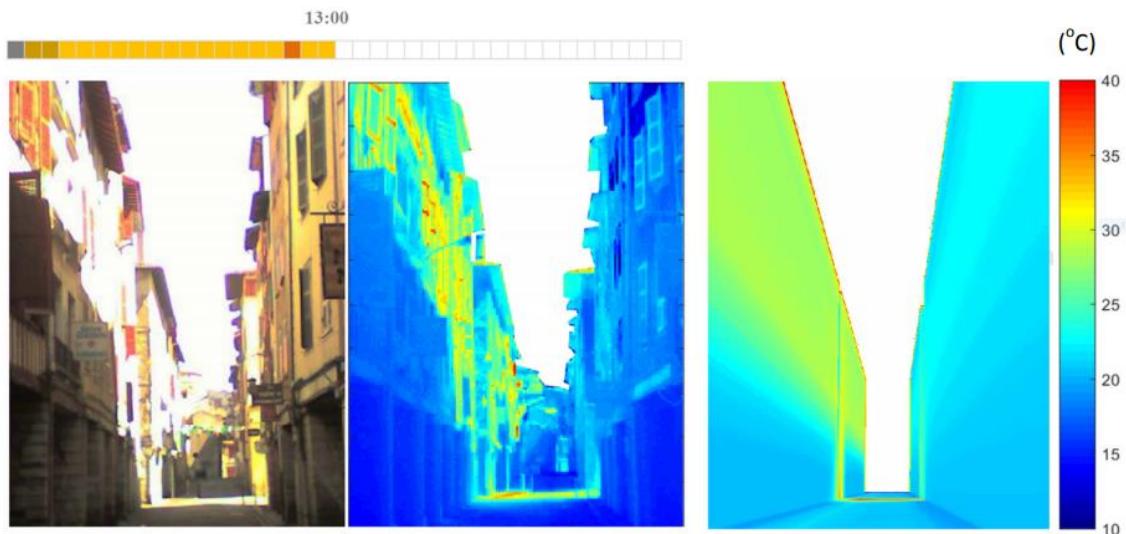


Figure 1.20 : Photographie, thermographie, et thermographie simulée par la méthode des éléments finis d'une rue de Bayonne [Aguerre 2019].

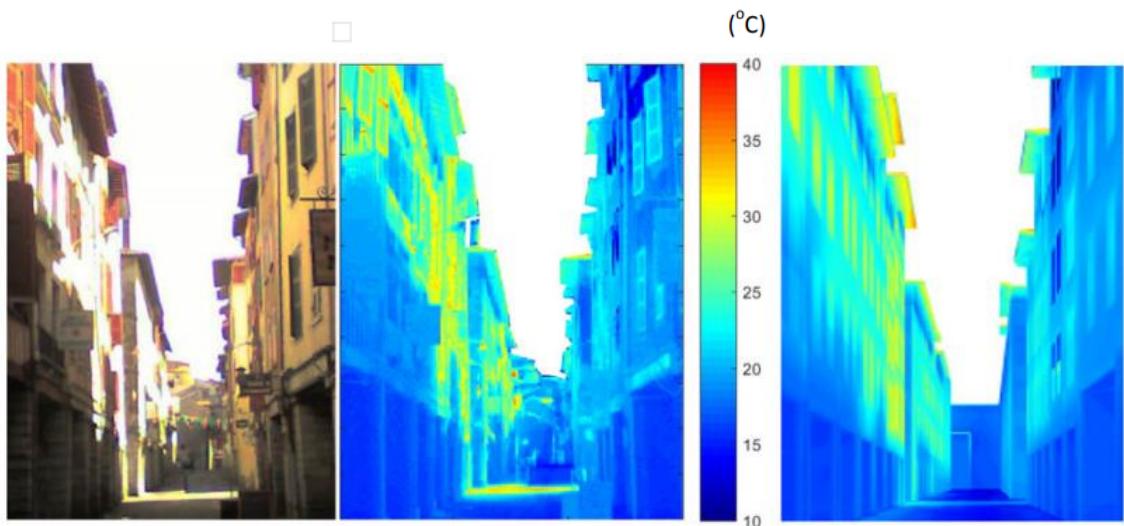


Figure 1.21 : Photographie, thermographie, et thermographie simulée avec modèle 3D détaillé par la méthode des éléments finis d'une rue de Bayonne [Aguerre 2020].

1.7. Conclusions

Les concepts essentiels pour le calcul du rayonnement solaire dans les bâtiments ont été présentés dans ce chapitre : la définition des grandeurs théoriques, les propriétés optiques des matériaux qui constituent l'environnement bâti, les différents modèles de ciel, les méthodes de calcul numériques du calcul du rayonnement, et les applications dans le domaine de l'architecture en éclairage naturel et en thermique.

Parmi les modèles de ciel existants, le modèle « *All-weather* » de Richard Perez se distingue des autres par sa faculté à pouvoir modéliser n'importe quelle condition de ciel à partir de peu de données d'entrées disponibles pour de nombreux endroits sur terre. Le modèle d'efficacité lumineuse proposé par le même auteur offre la possibilité d'appliquer ce modèle de ciel pour des études thermiques et d'éclairage naturel.

Concernant la modélisation des propriétés optiques des éléments de l'environnement bâti, il existe un écart de complexité net entre les modèles utilisés dans le domaine de l'infographie en comparaison de ceux utilisés dans le domaine de la thermique du bâtiment. Le domaine de l'infographie a produit une multitude de BRDF complexes permettant de reproduire fidèlement les effets produits par presque tous les types de matériaux. En parallèle, les méthodes de calcul dépendantes du point de vue permettant d'incorporer ces modèles complexes se sont développées et sont devenus incontournables dans ce domaine. La communauté de l'éclairage a tiré profit de ces avancées principalement pour pouvoir étudier des dispositifs de fenêtrage complexe.

De l'autre côté, les modèles de réflexion et de transmission utilisés habituellement en thermique du bâtiment sont beaucoup plus simples. Une importance plus grande est portée sur l'aspect quantitatif que sur l'aspect directionnel des réflexions et des transmissions. Considérer la réflexion spéculaire et la dépendance angulaire des réflectances et transmittances représente déjà un niveau de précision dont la plupart des méthodes de calcul ne tiennent pas compte.

Au vu de ce chapitre, la définition des surfaces selon leur réflectance et transmittance diffuses ainsi que par leur réflectance spéculaire et transmittance directe avec dépendance angulaire permet de modéliser la majorité des éléments qui constituent les environnements bâties. Ces quatre modes extrêmes de réflexion et de transmission doivent suffire à atteindre une précision suffisante pour les applications architecturales d'éclairage naturel et de thermiques étudiées dans cette thèse. En partant de cette hypothèse, la méthode de radiosité couplée au concept des facteurs de vue étendus se présente comme une solution intéressante pour considérer efficacement ces quatre modes de réflexion et de transmission.

Chapitre 2 – Méthode

Extension de la Radiosité Appliquée à l'Architecture et à l'Urbanisme

2.1.	Modélisation des différents éléments de l'environnement	53
2.1.1.	L'environnement bâti	53
2.1.2.	Les capteurs	61
2.1.3.	Les sources : ciel et soleil	61
2.2.	Calcul des facteurs de vue par lancer de rayons	68
2.2.1.	Génération déterministe des directions des rayons	69
2.2.2.	Distribution aléatoire des points de départ des rayons	70
2.2.3.	Intérêt de la distribution aléatoire des origines	70
2.3.	Calcul des facteurs de vue étendus pour la prise en compte des échanges non-diffus	76
2.3.1.	Modèle physique	76
2.3.2.	Modèle numérique	78
2.3.3.	Exemple du cube	79
2.4.	Système d'équations des irradiances	84
2.4.1.	De l'équation de la radiosité à l'équation de l'irradiance	84
2.4.2.	Prise en compte des transmissions diffuses	85
2.4.3.	Écriture et résolution du système d'équation des irradiances	87
2.4.4.	De l'irradiance à la densité de flux absorbée	89
2.5.	Conclusion	91

Résumé du chapitre

La méthode de la radiosité possède des avantages pour l'étude de l'éclairage naturel et des apports solaires grâce à son approche de style éléments finis : la possibilité de calculer l'infinité des réflexions diffuses, et de calculer le rayonnement sur la totalité des surfaces de la scène. Sa principale limite réside dans son incapacité à prendre en compte des matériaux autres que des matériaux opaques diffus. Cela restreint son utilisation à des applications sur des modèles possédant des matériaux avec des niveaux de détail peu élevés. Le cœur de la méthode proposée dans ce chapitre concerne l'implantation du concept des facteurs de vue étendus [Sillion 1989] pour des applications architecturales. Le but est de pouvoir intégrer des éléments autres que des réflecteurs opaques diffus tels que des miroirs, des vitrages, des éléments textiles, etc., au sein d'un même algorithme de radiosité. Les sections du chapitre reprennent dans l'ordre les différentes étapes de la méthode :

- La section 2.1 montre comment les différents éléments d'une scène sont modélisés géométriquement, et quelles sont leurs caractéristiques physiques associées. Les éléments sont regroupés en trois grandes familles : *l'environnement bâti, les capteurs, et les sources (ciel et soleil)*.
- La section 2.2 développe la méthode de *calcul des facteurs de vue classiques*. Les algorithmes de lancer de rayons performant d'Embree sont utilisés pour permettre un calcul efficace des facteurs de vue avec une prise en compte précise des parties cachées. Ils seront également utilisés pour l'implantation des facteurs de vue étendus (section suivante).
- La section 2.3 présente la méthode de *calcul des facteurs de vue étendus*. C'est à cette étape que les échanges non-diffus sont considérés. Même si le concept de facteur de vue étendu offre la possibilité de prendre en compte n'importe quel mode de réflexion ou de transmission, nous nous limitons ici aux réflexions spéculaires et aux transmissions directes.
- La section 2.4 concerne *la construction et la résolution du système linéaire d'équations des irradiances*. C'est à cette dernière étape que les échanges par réflexion et transmission diffuses sont calculés. Les données de sortie obtenues sont les irradiances et/ou les éclairements sur les surfaces de la scène et sur les capteurs pour une ou plusieurs conditions de ciel. Les indicateurs en lumière naturelle et les apports solaires thermiques sont calculés à partir de ces résultats.

2.1. Modélisation des différents éléments de l'environnement

Cette section présente la modélisation des différentes composantes de l'environnement et les caractéristiques physiques qui leur sont attribuées. Ces composantes sont regroupées en trois familles :

- l'environnement bâti,
- les capteurs,
- les sources: le ciel et le soleil.

2.1.1. L'environnement bâti

La première famille présentée est celle des éléments de l'environnement bâti. Il s'agit des seuls éléments qui peuvent recevoir, réfléchir, transmettre et absorber le rayonnement. Ces phénomènes se produisent suivant les caractéristiques propres aux surfaces de chaque élément. Cette partie présente les modèles de réflexion et de transmission choisis ainsi que la stratégie de maillage utilisée. Les hypothèses prises pour l'absorption de ces surfaces sont détaillées plus loin dans ce chapitre en section 2.4.4. Deux catégories sont présentées : les éléments opaques, les éléments fins transparents.

Éléments opaques

Les éléments opaques, tels que les murs, le sol, etc., sont uniquement modélisés par leurs surfaces exposées au rayonnement. Ces surfaces correspondent à la frontière séparant le volume, la matière de l'élément et l'air. On parle alors de « peau » du modèle 3D. Par exemple, un mur-façade peut posséder deux surfaces qui correspondent aux côtés intérieurs et extérieurs. Il peut arriver qu'une seule de ces surfaces soit nécessaire au calcul. Ces surfaces ne reçoivent le rayonnement que d'un côté et ont donc un sens d'orientation.

Chaque surface est discrétisée en plusieurs éléments de surface ou carreaux (triangulaires ou quadrilatères) (Figure 2.1). Les techniques de maillage utilisées ici sont élémentaires : application d'un patron de maillage régulier sur chaque surface, ou subdivision des surfaces. La plupart des logiciels de CAO et d'éléments finis permettent de générer automatiquement ce type de maillage. Aucune stratégie particulière de création, d'optimisation, ou de raffinement du maillage n'est utilisée ou développée ici.

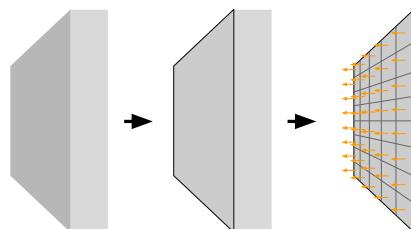


Figure 2.1 : Maillage d'une surface d'un élément opaque.

Le maillage influence la précision des résultats. En règle générale, plus le maillage est fin, plus le calcul est précis. Un maillage plus fin requiert cependant plus de mémoire et implique des temps de calcul plus longs. La méthode développée ici, plus précisément l'étape du calcul des facteurs de vue (voir section 2.2.2 et 2.2.3), est pensée pour que la qualité du maillage de l'environnement bâti ait le moins d'impact possible sur les résultats. Tout en conservant la meilleure précision possible sur les calculs, l'objectif est de pouvoir :

- utiliser n'importe quel maillage généré par des méthodes de maillage très simples (maillage structuré, Delaunay...),
- utiliser un maillage avec un minimum de carreaux pour gagner en rapidité de calcul (voir section 2.4.3),
- et utiliser des maillages provenant d'autres codes où la définition du maillage peut être plus contraignante (logiciels éléments-finis, CFD...).

Parmi les éléments opaques, on retrouve deux principaux types de réflexions :

- ***Éléments opaques à réflexion diffuse***

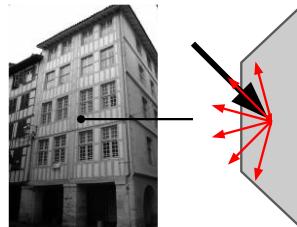


Figure 2.2 : Exemple et représentation d'un élément opaque à réflexion diffuse.

Ce type de surface constitue la grande majorité des surfaces de l'environnement bâti. Les murs, plafonds et sols en béton, en pierre, peints, etc... font partie de cette catégorie. La Figure 2.2 représente une façade de la rue des tonneliers dans le centre historique de Bayonne. Ces surfaces possèdent uniquement une réflectance diffuse ρ_d . Le modèle de réflexion lambertien leur est attribué. La réflectance est indépendante de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion. Dans ce cas particulier, la réflectance diffuse directionnelle-hémisphérique est constante quel que soit l'angle d'incidence ($\rho_d(\theta_i) = \text{constante}$).

- ***Éléments opaques à réflexion spéculaire***

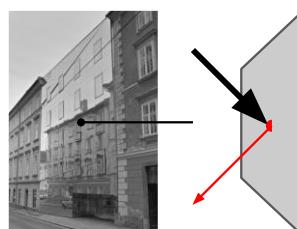


Figure 2.3 : Exemple et représentation d'un élément opaque spéculaire.

Cette catégorie correspond aux surfaces opaques réfléchissant de manière spéculaire, comme les surfaces métalliques ou les miroirs. Une façade métallique est représentée à la Figure 2.3. La

visibilité nette de la façade en vis-à-vis par réflexion illustre la forte composante spéculaire. Ces surfaces sont caractérisées par leur réflectance spéculaire ρ_r qui est variable selon l'angle d'incidence suivant les coefficients de Fresnel. Cette dépendance angulaire est prise en compte selon la simplification originale de [Schlick 1994] présentée dans le chapitre 1. Pour rappel :

$$\rho_r(\theta_i) = \rho_{r0} + (1 - \rho_{r0})(1 - \cos \theta_i)^5 \quad 2.1$$

Avec, $\rho_r(\theta_i)$ la réflectance spéculaire à un angle d'incidence θ_i , et $\rho_{r0} = \rho_r(0^\circ)$ la réflectance spéculaire à incidence normale. Par simplification, on utilise couramment la valeur à l'angle d'incidence normal ρ_{r0} pour désigner la réflectance spéculaire ρ_r d'un matériau. La Figure 2.4 montre la dépendance angulaire de la réflectance spéculaire d'un miroir ($\rho_r = 90\%$) calculée en suivant la simplification de Schlick.

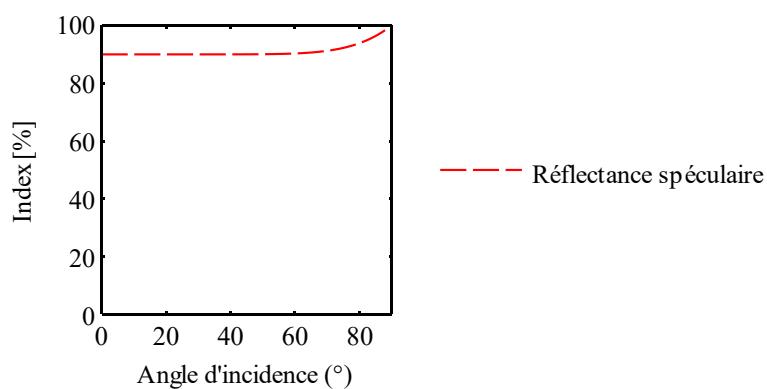


Figure 2.4 : Dépendance angulaire de la réflectance spéculaire d'un miroir selon le modèle de Schlick original.

Éléments fins transparents

Les éléments fins transparents sont ceux qui sont capables de réfléchir et transmettre le rayonnement. Ici, deux des éléments fins transparents les plus courants sont considérés : les vitrages (clair, simple, multiple, traités, etc.) et les textiles (protections solaires, rideaux, etc.). Comme pour les éléments opaques, seules les surfaces exposées au rayonnement sont modélisées. Ces éléments sont en général de faible épaisseur et sont donc modélisés par deux surfaces parallèles espacées de quelques millimètres et orientées dans les directions opposées. Il est tout à fait possible que ces deux interfaces possèdent des caractéristiques optiques différentes.

Le maillage est effectué avec les mêmes techniques simples que pour les surfaces opaques (Figure 2.5). La seule contrainte supplémentaire est que les deux surfaces d'un même élément non-opaque doivent être maillées à l'identique : un carreau i sur la face recto possède un carreau identique correspondant i' sur la face verso. Ils ont la même surface, la même forme, une position identique décalée en fonction de l'épaisseur, et sont orientés dans des sens opposés. Cette contrainte est nécessaire pour le calcul des échanges par transmission diffuse (voir section 2.4.2).

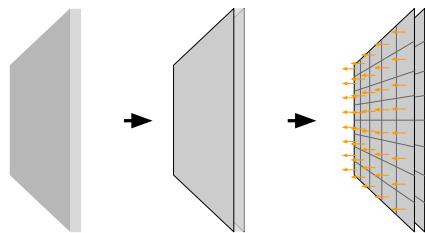


Figure 2.5 : Maillage des deux surfaces d'un même élément fin non-opaque.

Voici les modèles de réflexion et de transmission prises en compte pour les vitrages et les textiles :

- **Vitrages**

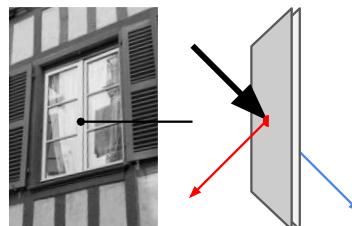


Figure 2.6 : Exemple et représentation d'un vitrage.

Les deux surfaces de l'élément d'un vitrage (Figure 2.6) possèdent une transmittance directe τ_r et une réflectance spéculaire ρ_r . Ces deux caractéristiques sont également soumises à la dépendance angulaire selon les relations de Fresnel. La simplification de Schlick est utilisée pour modéliser la dépendance angulaire de la réflectance des vitrages. Une adaptation de la simplification de Schlick est proposée pour la transmittance des vitrages.

A l'origine, la simplification de Schlick est une simplification des relations de Fresnel pour un élément opaque ou supposé d'épaisseur semi-infinie (c'est-à-dire sans inter-réflexion interne). Dans ce cas, la réflectivité est identique à la réflectance ($\rho = r$) car il n'y a pas d'inter-réflexion à l'intérieur de l'élément. Dans un élément de vitrage, la réflectance et la réflectivité sont différentes à cause des inter-réflexions internes. Malgré cela, la dépendance angulaire de la réflectance spéculaire et celle de la réflectivité ont un comportement très similaire, et leurs fonctions remplissent les mêmes conditions :

$$\begin{aligned} r(90^\circ) &= 1; \quad r(0^\circ) = r_0; \quad r'(0^\circ) = 0; \quad r''(0^\circ) = 0 \\ \rho_r(90^\circ) &= 1; \quad \rho_r(0^\circ) = \rho_{r0}; \quad \rho_r'(0^\circ) = 0; \quad \rho_r''(0^\circ) = 0 \end{aligned}$$

L'approximation de Schlick peut être étendue à la dépendance angulaire de la transmittance d'un vitrage. Les courbes de la dépendance angulaire de la réflectance et de la transmittance sont très similaires. Pour la fonction de la dépendance angulaire de la transmittance, les conditions à respecter sont : $\tau_r(90^\circ) = 0$; $\tau_r(0^\circ) = \tau_{r0}$; $\tau_r'(0^\circ) = 0$; $\tau_r''(0^\circ) = 0$. Nous proposons la fonction de dépendance angulaire de la transmittance suivante (Éq. 2.2) basée sur la simplification de Schlick :

$$\tau_r(\theta_i) = \tau_{r0} - \tau_{r0}(1 - \cos \theta_i)^5 \quad \text{2.2}$$

Avec, $\tau_r(\theta_i)$ la transmittance directe à un angle d'incidence θ_i , τ_{r0} la transmittance directe à incidence normale.

- **Textiles**

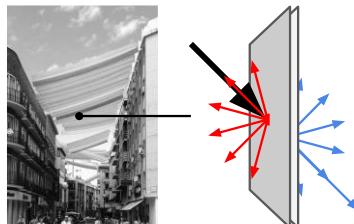


Figure 2.7 : Exemple et représentation d'un élément de protection solaire textile.

Cette catégorie concerne les textiles tel que les toiles de protections solaires, tissus, et rideaux qui réfléchissent et laissent passer le rayonnement de manière directe et diffuse (Figure 2.7). Les modèles de réflexion et de transmission sont proposés à partir des observations faites sur les mesures réalisées par [Kotey 2009a, 2009b] : la réflexion produite par les textiles est considérée comme purement diffuse. La réflectance diffuse ρ_d varie en fonction de la couleur du textile et également du taux d'ouverture a_0 .

Quant à la transmission, elle est séparée en deux parties. Une partie du rayonnement est transmise à travers le textile de manière diffuse par inter-réflexion entre les mailles. La transmission produite via ce processus est considérée parfaitement diffuse. Elle est caractérisée par une transmittance diffuse τ_d qui varient elle aussi selon la couleur et le taux d'ouverture du textile.

L'autre partie transmise passe directement à travers les ouvertures. Cette partie est caractérisée par la transmittance directe τ_r qui correspond au taux d'ouverture a_0 . Contrairement à la réflectance et à la transmittance diffuse, la transmittance directe montre une dépendance angulaire marquée et avec un comportement général similaire à celui d'un vitrage. Comme pour les autres éléments, on utilise couramment la transmittance directe à angle d'incidence normal pour définir la transmittance directe d'un textile. La raison de cette dépendance angulaire est purement géométrique et dépend de la forme des fibres et de leur organisation. Dans les applications suivantes, nous ne tiendrons pas compte de cet angle limite à cause du manque d'information sur la composition des textiles modélisés. La fonction de dépendance angulaire de transmittance déjà proposée pour les vitrages (Éq. 2.2) est utilisée.

Correction possible de la dépendance angulaire avec la simplification de Schlick

Le choix a été fait de modéliser toutes les dépendances angulaires rencontrées par la simplification de Schlick. L'avantage de cette simplification est de pouvoir modéliser aisément la dépendance angulaire de n'importe quel élément de vitrage complexe ou autre à partir de donnée facilement accessible : ρ_{r0} et τ_{r0} .

En revanche, même si la simplification de Schlick suit le comportement général de la dépendance angulaire des caractéristiques des éléments rencontrés, leur courbure n'est pas parfaitement identique. Des corrections peuvent être apportées à la simplification de Schlick pour suivre plus fidèlement la dépendance angulaire des caractéristiques des éléments.

La Figure 2.8 montre la dépendance angulaire de la réflectance d'un simple vitrage clair standard ($n = 1.52$, $k = 3.5 \times 10^{-7}$, $d = 4$ mm, $\lambda_0 = 580$ nm ; soit $\rho_{r0} = 8\%$ et $\tau_{r0} = 89\%$) calculée avec 3 méthodes différentes : à partir des relations de Fresnel, à partir de la simplification de Schlick originale, et à partir de la simplification de Schlick modifiée avec un exposant de 3.5. Réduire l'exposant à 3.5 donne une courbure très similaire à celle obtenue avec les relations de Fresnel dans le cas d'un simple vitrage. Même si la différence entre la courbe des relations de Fresnel et celle de la simplification de Schlick est visible, ces deux courbes ont un comportement identique.

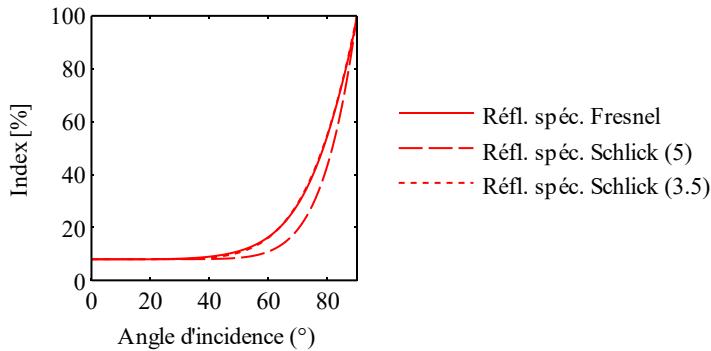


Figure 2.8 : Dépendance angulaire de la réflectance d'un simple vitrage selon les relations de Fresnel, la simplification de Schlick (exposant 5), et la simplification de Schlick modifiée (exposant 3.5).

La Figure 2.9 représente la dépendance angulaire de la transmittance d'un simple vitrage clair standard calculée avec les relations de Fresnel, la simplification de Schlick originale, et la simplification de Schlick modifiée avec l'exposant égal à 3.5. Comme pour la réflectance, modifier l'exposant permet de contrôler la courbure et de se rapprocher de la courbure réelle.

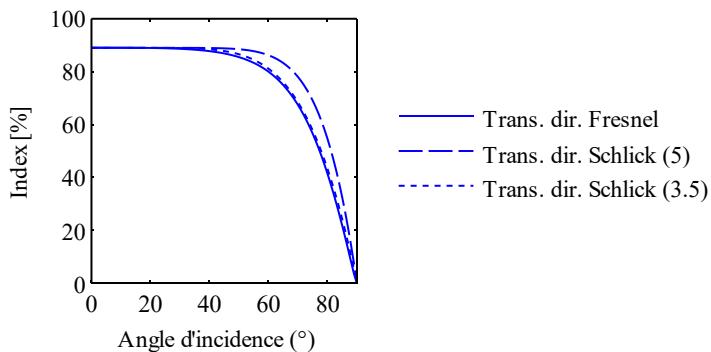


Figure 2.9 : Dépendance angulaire de la transmittance directe d'un simple vitrage selon les relations de Fresnel, la simplification de Schlick (exposant 5), et la simplification de Schlick modifiée (exposant 3.5).

Pour les textiles, il est aussi possible de modifier cette fonction si l'on souhaite approcher une certaine dépendance angulaire de la transmittance directe basée sur des valeurs mesurées. L'exemple suivant concerne le textile a) de la Figure 1.15. D'après les mesures de Kotey [2009a], il possède une réflectance diffuse de 64 %, une transmittance diffuse de 17 %, et une transmittance directe de 13 % à incidence normale. L'angle limite de la transmittance normale est autour des 65 %. Une adaptation de la dépendance angulaire de la transmittance directe (Eq. 2.3) est proposée pour ce textile. La Figure 2.11 représente cette fonction et les valeurs mesurées.

$$\tau_r(\theta_i) = \begin{cases} \tau_{r0} - \tau_{r0} \left(1 - \cos\left(\frac{\theta_i}{65^\circ}\right)\right)^{1.2}, & \text{si } 0 \leq \theta_i < 65^\circ \\ 0, & \text{si } \theta_i > 65^\circ \end{cases} \quad 2.3$$

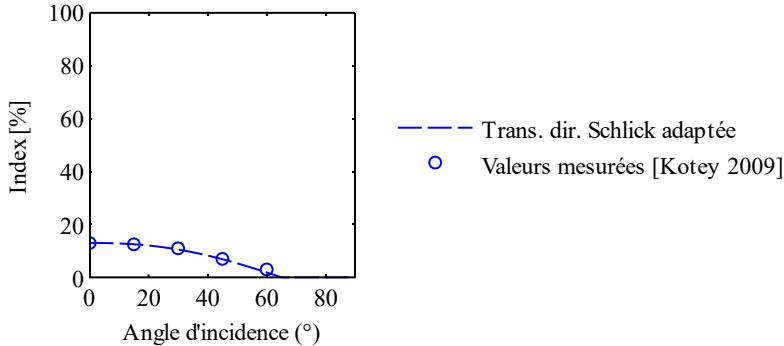


Figure 2.10 : Dépendance angulaire de la transmittance du textile a) Figure 2.8 selon l’adaptation fonction de dépendance angulaire proposée, et les valeurs de transmittance directe mesurées par [Kotey 2009a].

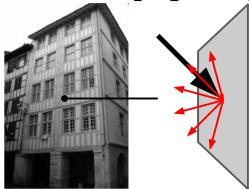
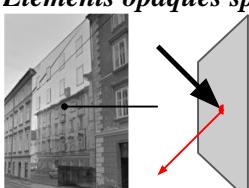
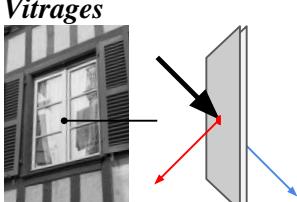
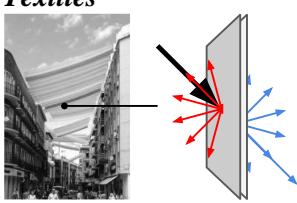
Par manque de données précise sur les caractéristiques des éléments modélisés dans cette thèse, la courbure de la simplification de Schlick originale est conservée dans les applications suivantes.

Récapitulatif des modes de réflexion et de transmission considérés

Les deux principaux modes de réflexion et de transmission sont pris en compte. Pour les réflexions et les transmissions diffuses, le modèle lambertien est choisi. Pour les réflexions spéculaires et les transmissions directes, le flux est réfléchi ou transmis dans l’unique direction spéculaire ou directe idéale et une dépendance angulaire de la réflectance et de la transmittance est appliquée en se basant sur la simplification de [Schlick 1994]. Cette simplification permet de tenir compte de la dépendance angulaire de la réflectance spéculaire et de la transmittance directe de la plupart des matériaux.

Dans la réalité, les matériaux ont des propriétés de réflexion et de transmission plus complexes qui ne suivent pas parfaitement les modèles théoriques proposés. Le choix a été de se limiter aux deux modes de réflexion et de transmission extrêmes : diffus et spéculaire (ou direct). La distribution du rayonnement solaire dans une scène peut être très différente suivant ces deux modes. A partir de ces deux modèles, il est possible de représenter la quasi-totalité des éléments présents dans l’environnement bâti. Le Tableau 2.1 réunit les différents éléments considérés dans les applications des chapitres suivants.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des 4 types d'éléments considérés dans l'environnement bâti avec leurs modes de réflexion et de transmission.

Eléments opaques diffus 	$\rho_d = \text{cst.}$
Eléments opaques spéculaires 	$\rho_r(\theta_i) = \rho_{r0} + (1 - \rho_{r0})(1 - \cos \theta_i)^5$
Vitrages 	$\rho_r(\theta_i) = \rho_{r0} + (1 - \rho_{r0})(1 - \cos \theta_i)^5$ $\tau_r(\theta_i) = \tau_{r0} - \tau_{r0}(1 - \cos \theta_i)^5$
Textiles 	$\rho_d = \text{cst}$ $\tau_d = \text{cst}$ $\tau_r(\theta_i) = \tau_{r0} - \tau_{r0}(1 - \cos \theta_i)^5$

2.1.2. Les capteurs

Les capteurs correspondent à des éléments de surface infiniment petits orientés dans une certaine direction. Ces éléments n'interagissent pas avec le rayonnement, ils ne font que recevoir le rayonnement mais n'émettent pas, ne réfléchissent pas, ne transmettent pas, ni n'absorbent le rayonnement. Ils n'ont aucune influence sur la distribution du rayonnement. Ce sont des éléments capables de voir tous les autres éléments de l'environnement, mais ils ne peuvent être vus par les autres. Ces éléments sont couramment utilisés pour les études d'éclairage afin de modéliser un plan de travail fictif : ils sont répartis en grille à une hauteur de 80 cm du sol et orientés vers le haut.

2.1.3. Les sources : ciel et soleil

Le ciel et le soleil sont les deux seules sources naturelles de rayonnement en ondes courtes, il est alors essentiel de les modéliser avec précision. Leur modélisation est réalisée en deux étapes : une première étape purement géométrique consiste à partitionner (discretiser) le ciel en un nombre fini de tuiles, et une autre étape consiste à attribuer à chaque tuile une radiance (ou luminance) selon les conditions climatiques.

Partition du ciel en tuiles d'angles solides égaux

Pour la partition de la voute céleste, la méthode proposée par [Beckers 2012] est utilisée. Cette méthode permet la création d'une partition en tuiles d'angles solides égaux et avec le meilleur rapport d'aspect possible. Elle offre également la possibilité de contrôler le nombre exact de tuiles dans la partition. Cela permet de définir avec précision l'angle solide qu'occupe chaque tuile de ciel. La Figure 2.13 montre trois exemples de partitions de l'hémisphère en 145, 2 000, et 5 000 tuiles. Les angles solides des tuiles sont respectivement : $0.0433 \text{ sr} (= 2\pi / 145)$, $0.0032 \text{ sr} (= 2\pi / 2 000)$, et $0.0013 \text{ sr} (= 2\pi / 5 000)$.

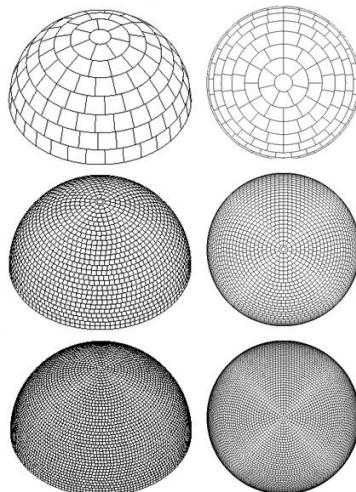


Figure 2.11 : Vues 3D et projections orthographiques de 3 partitions de l'hémisphère en 145, 2 000 et 5 000 carreaux selon [Beckers 2012].

Ces tuiles de ciel ne sont pas des éléments de surface comme le sont les carreaux de l'environnement bâti. Chacune correspond à une portion d'angle solide dans une direction donnée. Cela revient à considérer l'hémisphère du ciel infiniment grand. En procédant de cette façon, la visibilité des tuiles de ciel et les ombres sont indépendantes de la localisation du modèle géométrique dans le repère global.

Les tuiles ont la particularité de ne faire qu'émettre du rayonnement. Elles ne reçoivent pas, ni ne réfléchissent, ni n'absorbent. Elles sont donc vues par les autres carreaux de l'environnement bâti et les capteurs, mais elles ne voient pas.

Distribution des radiances (et luminances) diffuses du ciel

Les étapes restantes consistent à attribuer une radiance à chaque tuile selon les conditions de ciel à l'instant considéré. Pour calculer la distribution des radiances, le modèle « *All-Weather* » de [Perez 1993] présenté dans le chapitre 1 est suivi. Pour rappel, les données principales nécessaires à l'application de ce modèle sont :

- la position du soleil, calculée en suivant la méthode décrite dans [Beckers 2010],
- l'irradiance diffuse horizontale $E_{e,dif}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
- et l'irradiance directe normale $E_{e,ndir}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

La position du soleil est une donnée géométrique qui ne dépend pas des conditions météorologiques et qui peut être calculée avec grande précision. L'irradiance diffuse horizontale et l'irradiance directe normale peuvent être obtenues à partir de mesures ou de fichiers météorologiques d'année standard (Typical Weather Year, TWY) [Thevenard 2002a, 2002b]. Dans les exemples qui suivent, les données IWEC de Bordeaux fournies par EnergyPlus (energyplus.net/weather) sont utilisées.

Ces trois données suffisent à calculer la totalité des coefficients intermédiaires du modèle « *All-Weather* ». L'avant-dernière étape consiste à calculer la radiance relative l du ciel dans une direction donnée. On considère que la radiance d'une tuile est constante sur la totalité de l'angle solide qu'elle occupe. La radiance attribuée à une tuile correspond à celle obtenue dans la direction de son barycentre. Une fois les radiances relatives de toutes les tuiles obtenues, la radiance $L_{e,dif}$ d'une tuile de ciel peut alors être calculée (Éq. 2.4).

$$L_{e,dif} = \frac{lE_{e,dif}}{\int\limits_{2\pi} l(\theta, \gamma) \cos \theta d\omega} \quad 2.4$$

Comme le ciel est discrétisé en plusieurs tuiles, l'intégrale qui englobe les radiances relatives de l'hémisphère est remplacée par une somme équivalente (Éq. 2.5).

$$L_{e,dif} = \sum_{\text{tuiles de ciel}} \frac{lE_{e,dif}}{l(\theta, \gamma) \omega \cos \theta} \quad 2.5$$

Avec, θ , l'angle zénithal du centre d'une tuile, γ , l'azimut du centre d'une tuile, l , la radiance relative de la tuile considérée, $l(\theta, \gamma)$, la radiance relative dans la direction (θ, γ) , ω , l'angle solide d'une tuile.

Les Figures suivantes montrent plusieurs exemples de distribution des radiances du ciel à Bordeaux sous différentes conditions météorologiques (Figure 2.12), et à différentes heures de la journée (Figure 2.13). Une partition en 2000 tuiles est utilisée. On peut voir la très grande amplitude des valeurs de radiance et les distributions très différentes.

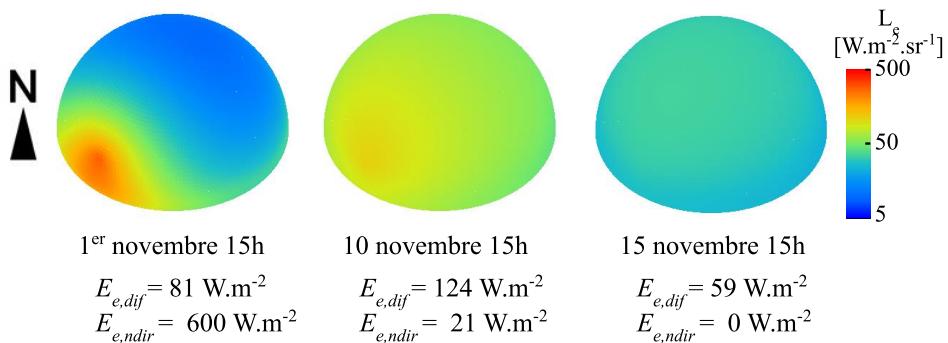


Figure 2.12 : Distributions des radiances du ciel pour 3 jours à la même heure en novembre à Bordeaux avec différents couverts nuageux.

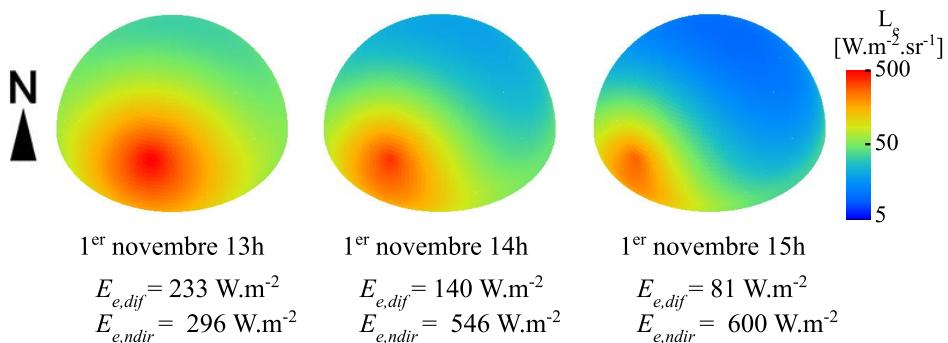


Figure 2.13 : Distributions des radiances du ciel à 13h, 14h, et 15h le 1^{er} novembre à Bordeaux.

Radiance directe du soleil

La radiance directe du soleil est appliquée sur la même partition. On modélise le soleil par la tuile de ciel dans laquelle il se situe. L'angle solide pris en compte pour le soleil est alors différent de son angle solide réel. La radiance directe de la tuile de ciel contenant le soleil $L_{e,dir}$ peut être directement déterminée à partir de l'irradiance directe normale $E_{e,ndir}$ et l'angle solide ω qu'occupe de la tuile (Éq. 2.6).

$$L_{e,dir} = \frac{E_{e,ndir}}{\omega} \quad 2.6$$

La radiance totale de la tuile contenant le soleil est alors égale à la somme de sa radiance diffuse du ciel et de la radiance directe du soleil calculée (Éq. 2.7).

$$L_{e,tot} = L_{e,dif} + L_{e,dir}$$

2.7

À la Figure 2.14, la radiance directe du soleil est représentée pour le même ciel avec 3 partitions différentes de 145, 2000 et 5000 tuiles.

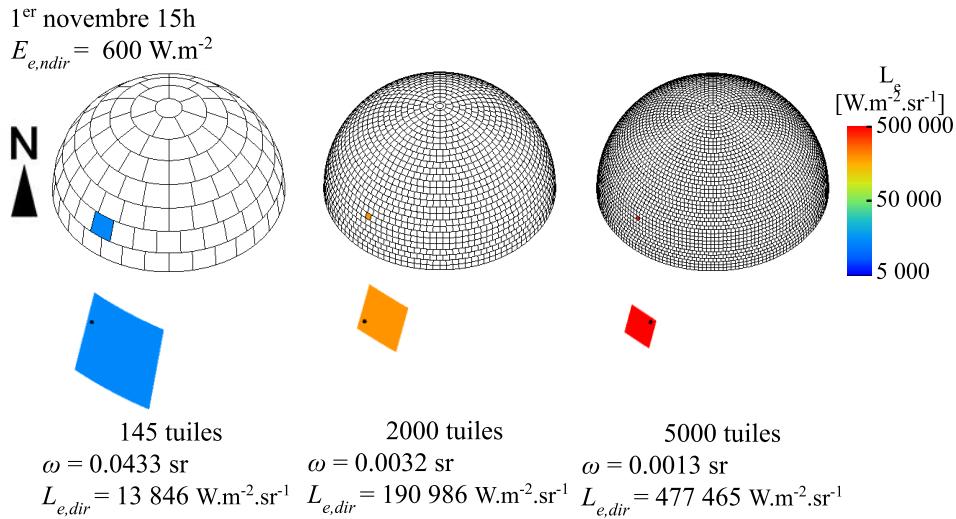


Figure 2.14 : Radiance directe du soleil $L_{e,dir}$ le 1^{er} novembre à 15h avec différentes résolutions de partition du ciel : 145 tuiles, 2000 tuiles, et 5000 tuiles. Un zoom est fait sur la tuile du soleil, le point noir marque la position exacte du soleil.

Efficacité lumineuse

Pour passer des grandeurs radiatives aux grandeurs photométriques, le modèle de [Perez 1990], présenté dans le 1^{er} chapitre, est utilisé pour le calcul des efficacités lumineuses afin de faire la conversion des radiances aux luminances. Les efficacités lumineuses sont différentes pour le rayonnement direct du soleil et le rayonnement diffus du ciel.

Effets de la résolution de la partition du ciel

A partir d'un modèle très simple (Figure 2.15), les effets produits par différentes résolutions de partition du ciel sont analysés. Le modèle est une pièce standard de 6 m de profondeur, 3 m de large, et 3 m de hauteur. Une fenêtre de 1.5 m de hauteur par 1m de largeur, située à 1 m du sol, traverse le mur de 25 cm d'épaisseur exposé au Sud. Aucun autre élément extérieur n'est modélisé. Les caractéristiques des surfaces sont standards : les réflectances diffuses du mur, du plafond, et du sol sont respectivement de 70 %, 80 %, et 30 %. La fenêtre a une transmittance directe de 85 % et une réflectance spéculaire de 10 %. Une grille de capteur (espacement de 25 cm) est placée au niveau du plan de travail virtuel à 80 cm de hauteur. On considère un maillage très fin de la pièce avec des carreaux de 0.1 x 0.1 m.

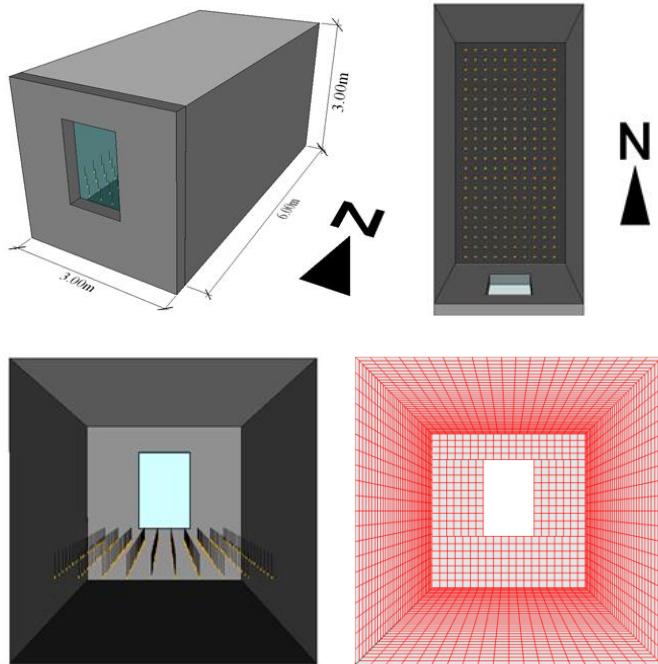


Figure 2.15 : Géométrie de la pièce avec la position des capteurs et son maillage en carreaux de 0.1x0.1m.

Les éclairements obtenus sur les surfaces de la scène et sur le plan de travail sont calculés. Plusieurs partitions du ciel sont testées : 145, 500, 2 000, 5 000 et 20 000 tuiles. La condition de ciel modélisée est celle du fichier IWEC de Bordeaux du 1^{er} novembre à 15h déjà présentée précédemment dans cette section. Cet instant a été volontairement choisi car il s'agit d'un moment avec un ciel très dégagé et donc avec une forte radiance directe du soleil. Comme les Figures 2.14, 2.15, et 2.16 le montrent, il existe écart un très important de plusieurs ordres de grandeur entre les radiances diffuses du ciel et la radiance directe du soleil par temps ensoleillé. Le facteur déterminant de la qualité d'une partition de ciel est la façon dont le soleil est modélisé.

En utilisant une partition trop grossière, deux erreurs sont commises : la première est due à l'angle solide que représente la tuile du soleil. Plus la partition est grossière, plus le flux solaire direct est réparti dans un grand cône, et les ombres produites sont alors moins bien délimitées qu'elles ne le devraient. On peut voir assez nettement la différence de taille entre la tache solaire obtenue avec 145 tuiles et 20 000 tuiles.

L'autre erreur commise est due à la position approximative du soleil. En effet, le soleil n'est pas forcément positionné exactement à l'emplacement du centre de la tuile qui la contient (Figure 2.14). Dans l'exemple de partition en 145 tuiles, la tuile qui contient le soleil est positionnée plus au Sud que la position exacte du soleil. A cause de cette approximation, une plus grande quantité de soleil parvient dans la pièce et à une position plus profonde. L'éclairement dans la salle est ainsi surestimé. Avec 500 tuiles, c'est le problème inverse : la tuile du soleil est positionnée moins au Sud qu'elle ne le devrait. Moins de soleil rentre dans la pièce et l'éclairement est sous-estimé.

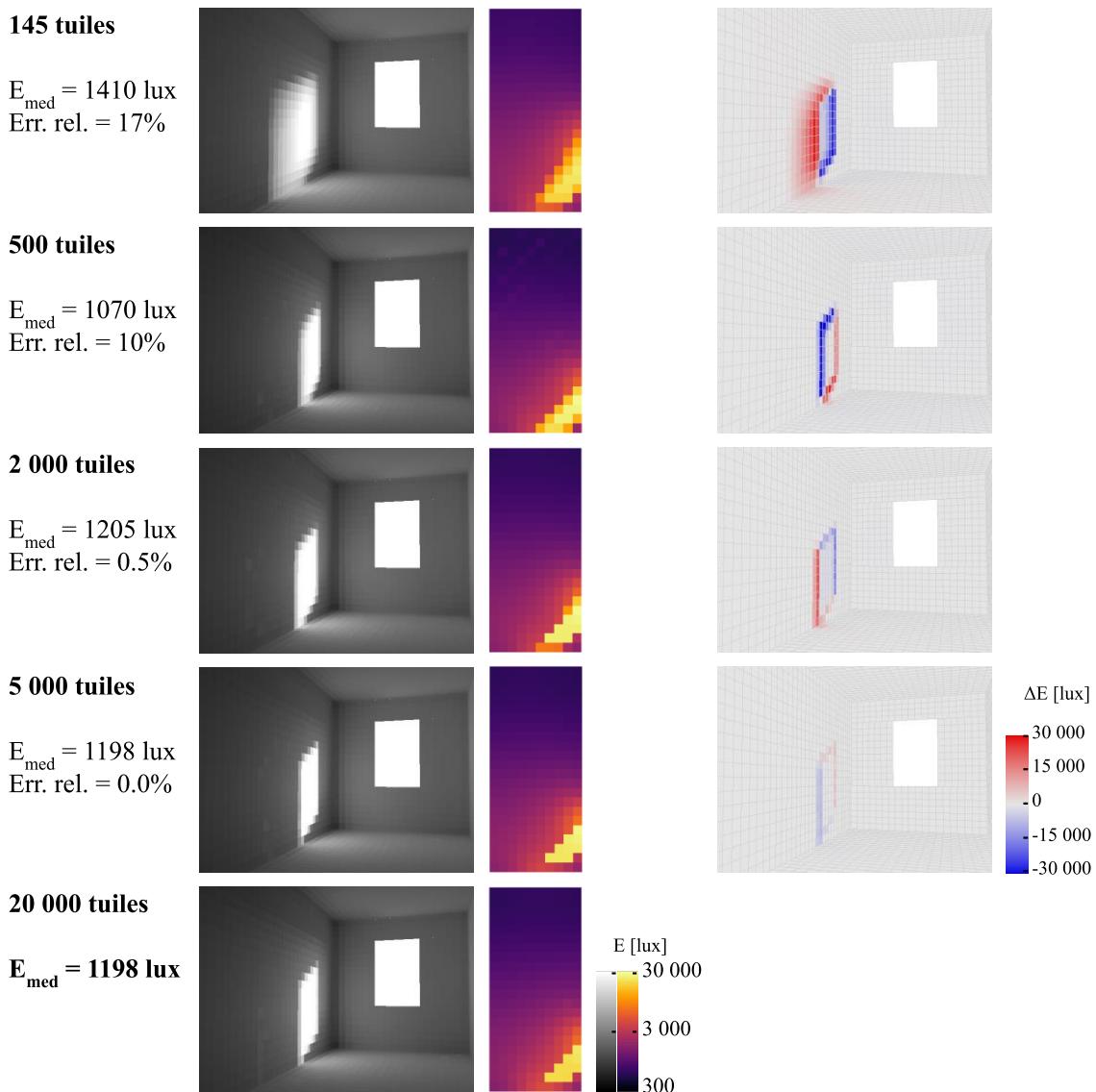


Figure 2.16 : A gauche ; distributions des éclairements calculés dans la pièce et sur le plan de travail lors du 1^{er} novembre 15h à Bordeaux avec des partitions de ciel de 145, 500, 2000, 5000, et 20000 tuiles. A droite ; la différence entre les éclairements et ceux calculés avec 20000 tuiles de ciel.

À partir d'une partition de 2 000 tuiles, les différences en quantité globale de flux solaire perçu dans la pièce sont fortement diminuées. L'erreur relative sur l'éclairement médian, comparé au résultat avec une partition très fine de 20 000 tuiles, est de 0.5 % dans ce cas. Des différences demeurent dans la distribution spatiale du rayonnement. Ces décalages sont sensibles à la distance entre le masque et la surface qui reçoit le rayonnement, respectivement ici, le cadre de la fenêtre et le mur gauche. Ces décalages, de quelques centimètres avec 2 000 tuiles et 5 000 tuiles, sont d'autant plus marqués avec un maillage fin de l'environnement comme ici (carreaux de 0.1 x 0.1 m). Avec un maillage de l'environnement plus grossier ces décalages sont estompés dans la surface des carreaux.

Pour chaque application, la résolution de la partition du ciel doit être déterminé selon la précision des résultats souhaitée. Ce choix dépend principalement de l'importance donnée à la répartition spatiale du rayonnement direct du soleil. Pour chaque partition de ciel, deux approximations sont

faites sur la position et l'angle solide que représente le soleil. L'idéal est d'utiliser une partition de ciel la plus fine possible. Or, utiliser des partitions très fines peut dans certains cas alourdir et ralentir inutilement les calculs (voir section 2.4.3). Dans l'exemple présenté ici, similaire aux prochaines applications présentées dans ce document, des résultats de précision suffisante sont déjà atteints avec une partition de 5 000 tuiles sans créer de contrainte de calcul majeure. Une partition de 5 000 tuiles est retenue pour les applications présentées par la suite.

2.2. Calcul des facteurs de vue par lancer de rayons

Cette section présente la méthode de calcul des facteurs de vue développée. Il s'agit d'une étape clé pour tout algorithme de radiosité. Cette méthode tire profit des algorithmes de lancer de rayons et utilise la bibliothèque de programmes performants et open-source Embree développés par Intel sous le langage C++ [Wald 2014] optimisé pour les CPU. L'utilisation d'algorithmes de lancer de rayons pour le calcul des facteurs de vue offre une très grande souplesse permettant de pouvoir générer des tirs de rayons dans n'importe quelle direction et à partir de n'importe quel point d'origine sans contrainte.

Les performances d'Embree permettent de lancer une quantité conséquente de rayons dans un temps limité. La vitesse est d'environ 24 millions de rayons par seconde dans notre programme développé avec un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel i7 7^{ème} génération.

En combinant ces avantages, un calcul précis des facteurs de vue peut être effectué en peu de temps. Le facteur de vue entre deux éléments est défini par une double intégrale sur la surface du carreau d'origine i et sur la surface du carreau visé j (Éq. 2.8).

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{x \in P_i} \int_{y \in P_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(x, y) dy dx \quad 2.8$$

Le calcul numérique de cette double intégrale est séparé en deux étapes distinctes (Figure 2.17) :

- une génération déterministe des directions des rayons suivant le modèle de partition de l'hémisphère en tuiles de facteurs de vue égaux [Beckers 2016a, 2016b],
- et une génération aléatoire des points de départs de chaque rayon sur la surface du carreau d'origine. Les bénéfices qu'apporte cette méthode sont développés dans la section 2.2.3.

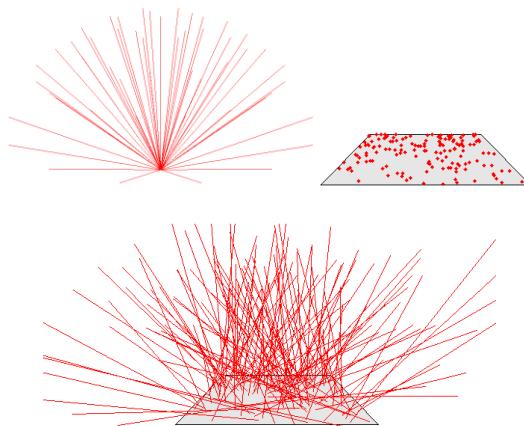


Figure 2.17 : Principe général du calcul des facteurs de vue par lancer de rayons depuis un carreau avec 50 rayons : génération des directions (haut gauche) ; génération des origines (haut droit) ; et tir des rayons (bas).

2.2.1. Génération déterministe des directions des rayons

La définition du facteur de vue (Equation 2.8) (surface à surface) est simplifiée par sa définition différentielle (Equation 2.9). Il s'agit du facteur de vue depuis un point vers une surface. La définition du facteur de vue est alors limitée à sa deuxième intégrale, celle sur la surface des carreaux visés j . L'équation du facteur de vue différentiel F_{x-A_j} est simplifiée et réécrite avec l'analogie de Nusselt [Beckers 2014] (Equation 2.9). Le facteur de vue d'un carreau j depuis un point x correspond à l'angle solide projeté de sa partie visible.

$$F_{x-A_j} = \int_{y \in P_j} \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} V(x, y) dy = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_{vpj}} \cos \theta d\omega \quad 2.9$$

Pour réaliser le calcul de F_{x-A_j} numériquement grâce au lancer de rayons, l'hémisphère est maillé en tuiles à facteur vue égaux suivant la méthode proposée par [Beckers 2016b]. Cette méthode assure une partition de l'hémisphère avec un rapport d'aspect des tuiles proche d'un quelle que soit la résolution choisie.

Un rayon est émis dans chaque tuile. La quantité de carreaux peut être modifiée selon la précision souhaitée. La Figure 2.18 représente une partition en 50 tuiles. Il s'agit d'un très petit nombre de rayons servant uniquement à créer une représentation graphique afin d'aider la compréhension. Il est difficile de définir une quantité idéale de rayons pour les applications en lumière naturelle et en apport solaire car les besoins varient selon de nombreux paramètres. Les principaux sont la précision souhaitée du calcul, la taille des carreaux de l'environnement, et la taille des tuiles du ciel. En pratique, des quantités de l'ordre de 50 000 jusqu'à 500 000 rayons par carreau sont utilisées.

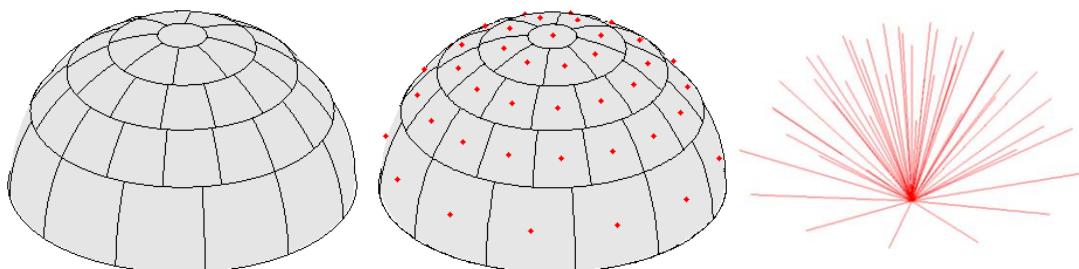


Figure 2.18 : Partition d'un hémisphère en 50 tuiles de facteurs de vue égaux (gauche) ; Position des centres de chaque tuile (centre) ; Directions générées (droite).

L'ensemble des directions formées entre le centre de l'hémisphère et le centre de chaque carreau constitue l'ensemble des directions dans lesquelles chaque rayon est lancé pour le calcul du facteur de vue. Comme chaque tuile possède le même facteur de vue depuis le centre de l'hémisphère, chaque rayon correspond à une fraction de facteur de vue ΔF égale à l'inverse du nombre total de rayons. Le facteur de vue d'un carreau j depuis un point x , F_{x-A_j} , est donc égal à la somme des fractions ΔF que représente chaque rayon qui le coupe (Éq. 2.10). La fonction de visibilité est prise en compte par le lancer de rayons.

$$F_{x-A_j} = \sum_{N_{inter}} \Delta F \quad 2.10$$

Et $\Delta F = 1 / N$

Avec, N le nombre de rayons, N_{inter} le nombre de rayons qui coupent le carreau j , et ΔF le facteur de vue que représente un rayon.

2.2.2. Distribution aléatoire des points de départ des rayons

La deuxième intégrale sur le carreau d'origine est traitée en générant aléatoirement et uniformément les points de départ des rayons sur sa surface. Cette génération aléatoire uniforme est effectuée en suivant la méthode proposée par [Osada 2002]. En considérant un triangle de sommets I , J et K , un point aléatoire O est obtenu selon la formule :

$$O = (1 - \sqrt{r_1})I + \sqrt{r_1}(1 - r_2)J + \sqrt{r_1}r_2K \quad 2.11$$

Avec r_1, r_2 deux variables aléatoires comprises entre 0 et 1. Les carreaux quadrangulaires sont divisés en deux triangles (Figure 2.19) et un test préalable est effectué pour définir dans quel triangle un nouveau point de départ est créé. La probabilité de sélection d'un triangle est proportionnelle à sa surface.

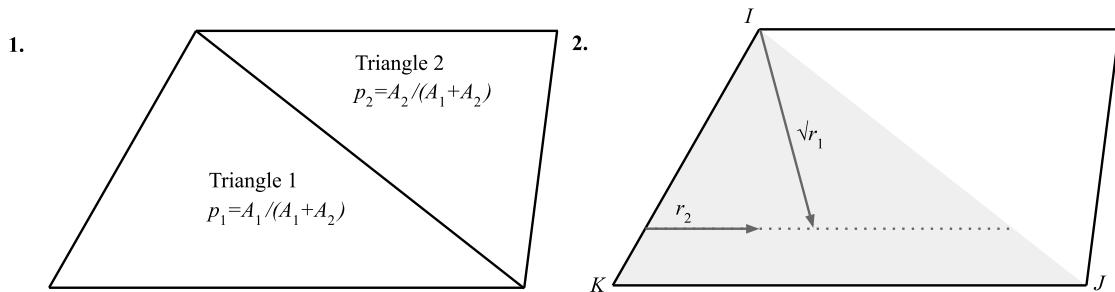


Figure 2.19 : Etapes de la génération aléatoire d'un point sur la surface d'un carreau quadrilatère.

Pour chaque rayon tiré, un point de départ différent est défini. La Figure 2.20 représente l'exemple d'un carreau comportant 50 rayons tirés depuis des origines générées aléatoirement.

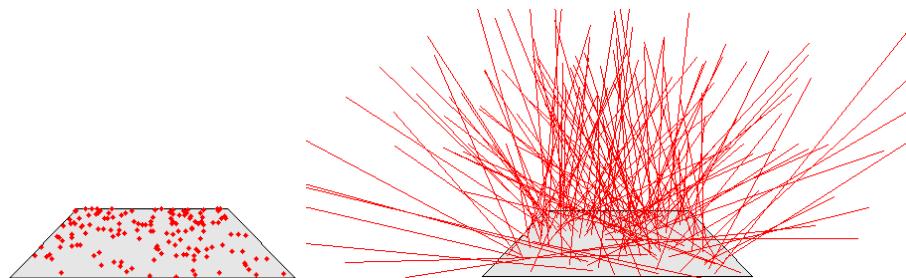


Figure 2.20 : Carreau avec 50 points d'origine distribués aléatoirement sur sa surface (gauche) ; 50 rayons tirés depuis ces points dans les directions préalablement définies (droite).

2.2.3. Intérêt de la distribution aléatoire des origines

Le but de cette section est de montrer l'importance d'une bonne considération de la surface du carreau d'origine lors du calcul des facteurs de vue. L'intérêt général est de pouvoir conserver une précision maximale dans des maillages grossiers. La méthode d'intégration proposée, à savoir la génération aléatoire des points de départs des rayons, est comparée à une autre méthode

performante d'intégration sur la surface : les points de Gauss [Beckers 2014, Nahon 2017]. La méthode d'intégration de Gauss pour le calcul des facteurs de vue consiste à calculer les facteurs de vue différentiels F_{x-A_j} à différents points stratégiques sur la surface du carreau d'origine. La moyenne des facteurs de vue différentiels obtenus sur chaque point de Gauss, pondérés selon leur poids, constitue les facteurs de vue. Ici, les résultats obtenus avec 1 (barycentre), 4 et 9 points de Gauss sont étudiés.

Deux cas sont utilisés pour cette comparaison. Le premier est un cube simple (Figure 2.21) et le second est une pièce standard avec une fenêtre exposée au Sud (Figure 2.15) déjà présenté en section 2.1.3. Dans le cube, aucun des carreaux n'est partiellement caché des autres. Dans la pièce, les carreaux de la scène sont en partie cachés par rapport au ciel.

Cas sans partie cachée : cube à 6 faces

Dans cette première comparaison, la précision des facteurs de vue obtenues avec les 4 méthodes est analysée. Différentes quantités de rayon sont lancées depuis chaque carreau : 10 000, 100 000 et 1 000 000. Les résultats théoriques exacts sont calculés grâce à une intégration par contour dans le cas point-surface, c'est-à-dire pour les points de Gauss [Beckers 2014], et à l'aide des formules exactes propres aux configurations rencontrées [Hottel 1933] dans le cas surface-surface, à savoir la méthode des points d'origine aléatoire. L'erreur relative comparée à la valeur exacte réelle sert ici d'indicateur de précision. Comme la méthode de distribution aléatoire des points d'origine donne des résultats qui peuvent varier à chaque calcul, les erreurs relatives mentionnées pour cette méthode correspondent à la moyenne des erreurs relatives obtenue avec 20 calculs.

Dans un cube, il n'existe que deux dispositions entre deux carreaux (Figure 2.21) : lorsque le carreau cible est perpendiculaire au carreau d'origine (Tableau 2.2), ici F_{ij} , et lorsque le carreau cible est parallèle au carreau d'origine (Tableau 2.3), ici F_{ik} .

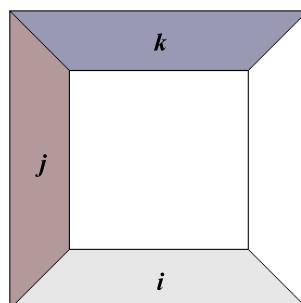


Figure 2.21 : Représentation des deux configurations testées dans un cube ; i est le carreau origine, j et k sont les carreaux cibles.

Avec une quantité infinie de rayons, la méthode de distribution aléatoire des points d'origine est logiquement la meilleure car elle donne la solution exacte. Si l'on s'intéresse aux points de Gauss, on s'aperçoit qu'avec 1 seul point de Gauss des approximations conséquentes sont faites. Les résultats s'améliorent nettement avec 4 points de Gauss. L'erreur relative passe de 4.95 % à 0.18 % dans le cas perpendiculaire et de 20.01 % à 0.73 % dans le cas parallèle. Avec 9 points, les résultats sont encore nettement améliorés et donnent une solution quasi-parfaite (erreur relative de 0.00 % dans le cas perpendiculaire et 0.01 % dans le cas parallèle).

Si l'on s'intéresse maintenant aux résultats obtenus avec différentes quantités de rayons, on voit que moins il y a de points d'intégration, plus les résultats convergent rapidement. Avec 10 000 rayons, une intégration avec 4 points de Gauss donne de meilleurs résultats que la distribution aléatoire. La distribution aléatoire devient plus précise que l'intégration avec 4 points de Gauss au-delà de 100 000 rayons. À quantité de rayons équivalente, l'intégration avec 9 points de Gauss est la plus précise des quatre méthodes testées lorsqu'il n'y a pas de partie cachée.

Tableau 2.2 : Erreurs relatives obtenues dans le calcul de F_{ij} avec différent nombre de rayons émis pour les 4 méthodes testées. Valeur exacte de $F_{ij} = 0.200044$.

Nb. rayons	1 point (Barycentre)	4 points de Gauss	9 points de Gauss	Origines aléatoires
10 000	5.07%	0.35%	0.24%	0.47%
100 000	4.99%	0.21%	0.06%	0.20%
1 000 000	4.97%	0.19%	0.01%	0.04%
∞	4.95%	0.18%	0.00%	-
	$(F_{ij} = 0.190136)$	$(F_{ij} = 0.200406)$	$(F_{ij} = 0.200039)$	$(F_{ij} = 0.200044)$

Tableau 2.3 : Erreurs relatives obtenues dans le calcul de F_{ik} avec différent nombre de rayons émis pour les 4 méthodes testées. Valeur exacte de $F_{ik} = 0.199825$.

Nb. rayons	1 point (Barycentre)	4 points de Gauss	9 points de Gauss	Origines aléatoires
10 000	20.25%	0.91%	0.46%	1.07%
100 000	20.05%	0.76%	0.11%	0.55%
1 000 000	20.01%	0.73%	0.01%	0.16%
∞	20.01%	0.73%	0.01%	-
	$(F_{ik} = 0.239818)$	$(F_{ik} = 0.198376)$	$(F_{ik} = 0.199844)$	$(F_{ik} = 0.199825)$

Cas avec parties cachées : pièce avec fenêtre

Dans l'exemple précédent, tous les carreaux sont visibles depuis n'importe quel autre carreau. Les configurations géométriques que l'on retrouve dans l'environnement bâti sont plus complexes. La vue entre deux éléments quelconques, peut être masquée entièrement ou partiellement par un autre élément. Différents points positionnés sur un carreau i peuvent voir un autre carreau j dans des proportions variables si un carreau k interfère. Une bonne intégration sur la surface du carreau d'origine est alors déterminante pour un calcul précis des facteurs de vue.

Le problème des parties cachées est illustré ici dans le cas déjà présenté en section 2.1.3. Figure 2.15. Il s'agit d'une situation architecturale courante : une pièce avec une ouverture sur l'extérieur. Différentes parties d'un même mur peuvent voir le ciel dans des proportions et dans des directions très différentes. La Figure 2.22 représente les éclairements reçus dans la pièce et sur le plan de travail virtuel à un moment ensoleillé. Des ombres très marquées apparaissent sur le mur. L'éclairement sur le mur est très discontinu : l'éclairement passe brusquement de 500 lux à 30000 lux selon que le mur est directement exposé ou non au soleil.

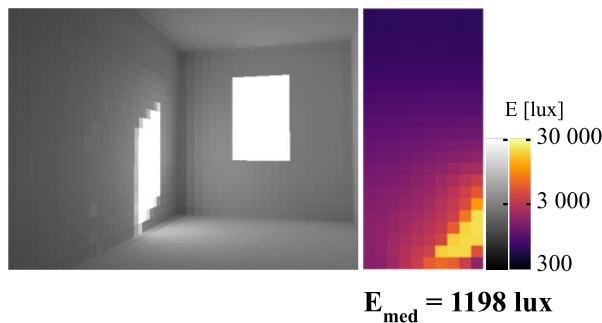


Figure 2.22 : Eclairage sur la scène, sur le plan de travail et éclairage médian sur le plan de travail E_{med} à un moment ensoleillé. Le maillage du haut est composé de carreau de $0.1x0.1m$.

Dans la Figure 2.23, les quatre méthodes précédentes sont une nouvelle fois comparées dans cette configuration mais avec un maillage beaucoup plus grossier possédant des carreaux de $3x3m$. La grille de capteur du plan de travail reste la même. L'objectif est de conserver la meilleure précision possible avec un minimum de carreaux. La comparaison se base sur les valeurs d'éclairements médians reçus sur le plan de travail, noté ici E_{med} . On considère le résultat obtenu avec le maillage fin comme référence. A noter qu'avec ce maillage fin, les résultats sont identiques pour les 4 méthodes testées. Les points d'intégration de Gauss sont représentés en rouge sur le carreau qui reçoit le soleil directement.

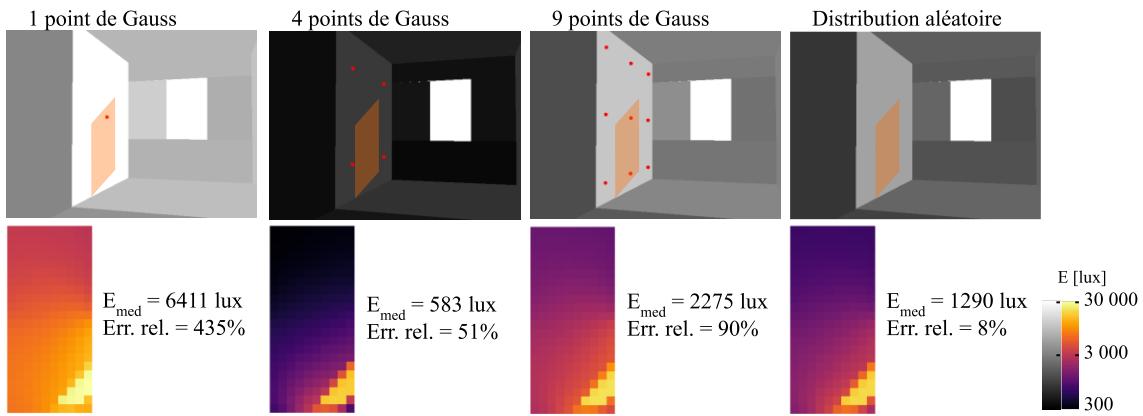


Figure 2.23 : ECLAIREMENTS CALCULÉS AVEC UN MAILLAGE GROSSIER COMPOSÉ DE CARREAUX DE 3x3m AVEC LES QUATRE MÉTHODES D'INTÉGRATION. L'ERREUR RELATIVE DE L'ECLAIREMENT MÉDIAN EST CALCULÉE EN PRENNANT L'ECLAIREMENT MÉDIAN DU MAILLAGE FIN (Figure 2.22) COMME RÉFÉRENCE ($E_{med} = 1\,198$ lux). LA REPÈRE ORANGE CORRESPOND À LA ZONE QUI REÇOIT LE SOLEIL DIRECTEMENT.

Avec un point de Gauss, l'éclairement est nettement surestimé à cet instant. Comme le barycentre est le seul point d'intégration pour le calcul des facteurs de vue, si ce point voit le soleil, cela revient à considérer que la totalité du carreau de 3x3m voit le soleil. Ici, les rayons du soleil atteignent le barycentre. L'éclairement du carreau mais également la lumière qu'il réfléchit dans la pièce sont surestimés ce qui donne un niveau d'éclairement trop important dans toute la pièce.

Avec 4 points de Gauss, c'est le problème inverse. Le soleil n'est pas vu depuis les 4 points d'intégration. L'éclairement du carreau, et par conséquent l'éclairement général de la pièce, sont sous-estimés. Avec 9 points de Gauss, l'éclairement est surestimé car le poids que représente les deux points qui perçoivent les rayons du soleil ne correspond pas exactement à la proportion de surface sur laquelle les rayons du soleil parviennent. Ainsi, en utilisant un nombre plus important de point de Gauss, l'erreur tend logiquement à être réduite.

Avec la distribution aléatoire des points d'origine, une erreur relative de 8 % est obtenue. L'intégration sur la surface avec cette méthode permet de bien prendre en compte les variations brusques de visibilité sur la surface des carreaux. Même si la distribution spatiale du rayonnement est grossièrement simplifiée avec un maillage de cette taille, les quantités globales d'éclairement reçue et réfléchi sur les carreaux, sur le plan de travail, et dans la scène en général sont correctement calculées.

Les résultats de la Figure 2.23 ne représentent qu'un seul instant dans l'année. Avec un ciel dégagé et des démarcations d'ombre nettes comme ici, les erreurs dues aux approximations des parties cachées sont amplifiées. Dans des conditions plus nuageuses, avec une distribution des luminances sur le ciel plus uniforme et une luminance du ciel moins forte, ces démarcations s'atténuent et l'erreur constatée avec les intégrations par point de Gauss est plus faible.

La Figure 2.24 montre la moyenne des erreurs relatives d' E_{med} obtenues durant une année entière avec un pas de temps d'une heure pour les quatre méthodes d'intégration. Plusieurs maillages sont aussi testés avec différentes dimensions de carreau : 0.1x0.1m, 0.2x0.2m, 0.375x0.375m, 0.75x0.75, 1.5x1.5m, et 3x3m.

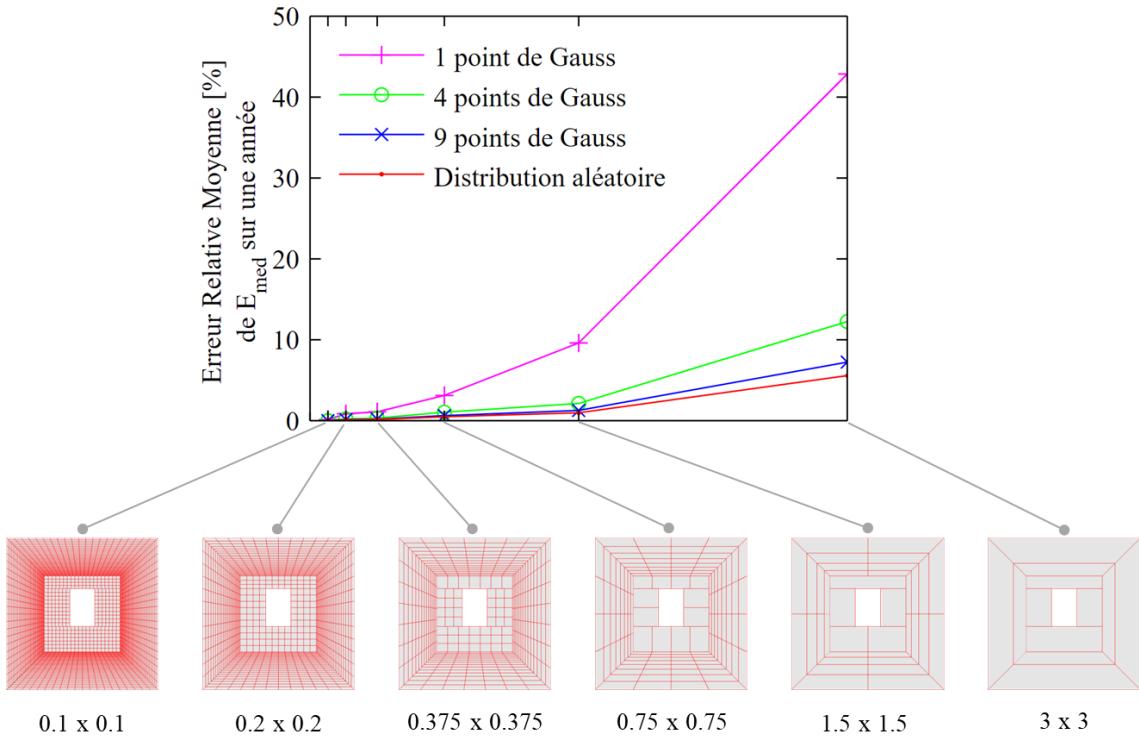


Figure 2.24 : Erreur relative moyenne de l'éclairement moyen au cours d'une année entière en fonction du maillage pour les 4 méthodes testées.

Sur une année entière, l'écart entre l'erreur relative moyenne obtenue avec 9 points de Gauss et la distribution aléatoire n'est pas aussi conséquent que ce que montre la Figure 2.23. La distribution aléatoire reste néanmoins la méthode la plus performante quelle que soit la qualité du maillage et se montre particulièrement efficace dans des maillages grossiers. C'est pour ces raisons que cette méthode a été retenue. Avec un maillage composé de carreaux de 1.5×1.5 m, l'erreur relative moyenne, comparée à un maillage très fin de 0.1×0.1 m, est inférieure à 1 % avec cette méthode. Conserver une bonne précision avec un maillage grossier représente un intérêt majeur en termes de performance de calcul (voir section 2.4.3).

2.3. Calcul des facteurs de vue étendus pour la prise en compte des échanges non-diffus

Cette section décrit la méthode de calcul des facteurs de vue étendus permettant la prise en compte des échanges par réflexion non-diffuse et transmission en radiosité. Cette méthode présente un grand intérêt pour le calcul de l'éclairage naturel et des apports solaires en architecture où l'environnement est souvent composé de matériaux autres que des éléments opaques diffus. Le calcul des facteurs de vue étendus est facilité par l'utilisation des programmes de lancer de rayons d'Embree [Wald 2014].

2.3.1. Modèle physique

Concept

[Sillion 1994] propose une formulation de l'équation du rendu en ne faisant apparaître que des radiances émises de manière diffuse (indépendantes des directions de sortie) et en séparant les modes de réflexion diffus et spéculaire. Un opérateur de réflexion diffuse \mathcal{R}_d représente l'effet d'une seule réflexion diffuse, et l'opérateur global des réflexions spéculaires \mathcal{R}_r^* , représente l'effet des inter-réflexions spéculaires (Éq. 2.12).

$$L_d = L_{em,d} + \mathcal{R}_d \mathcal{R}_r^* L_d \quad 2.12$$

L'équation de la radiosité associée (Éq. 2.13) inclut l'effet des inter-réflexions spéculaires grâce aux facteurs de vue étendus F_{ij}^{ext} . L'effet de la réflexion diffuse est représenté par le produit de la réflectance diffuse et des facteurs de vue, comme dans l'équation de la radiosité classique. Le facteur de vue étendu F_{ij}^{ext} est défini comme la fraction du rayonnement produit par le carreau j reçue par le carreau i directement et/ou après une ou plusieurs réflexions spéculaires.

$$B_i = M_i + \rho_{d,i} \sum_j F_{ij}^{ext} B_j \quad 2.13$$

Prise en compte de n'importe quel mode de réflexion et de transmission

Les deux modes de réflexion diffus et spéculaire sont séparés et les deux opérateurs \mathcal{R}_d et \mathcal{R}_r correspondent chacun à un des deux modes de réflexion. La BRDF f_r d'une surface s'écrit comme la somme des deux BRDF $f_{r,d}$ et $f_{r,r}$. De la même façon, la réflectance totale d'une surface ρ peut être exprimée comme la somme de la réflectance diffuse ρ_d et de la réflectance spéculaire ρ_r .

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = f_{r,d} + \underbrace{f_{r,r}(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi)}_{\mathcal{R}_r} \quad 2.14$$

$$\rho(\theta_i) = \rho_d + \underbrace{\rho_r(\theta_i)}_{\mathcal{R}_r} \quad 2.15$$

Dans la démonstration de [Sillion 1989 et 1994], l'opérateur \mathcal{R}_r représente seulement l'effet d'une réflexion spéculaire. Ce même raisonnement peut être étendu avec un opérateur \mathcal{R}_r représentant d'autres modes de réflexion mais également différents modes de transmissions. La

BRDF $f_{r,r}$ correspondante peut être remplacée par une BSDF f_s plus générale réunissant une BRDF f_r et une BTDF f_t quelconque. La BSDF générale f d'une surface se décompose sous cette forme (Éq. 2.16) :

$$\begin{aligned} f(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) &= f_{r,d} + \underbrace{f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi)}_{\mathcal{R}_r} + f_t(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) \\ &= f_{r,d} + \underbrace{f_s(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi)}_{\mathcal{R}_r} \end{aligned} \quad 2.16$$

La prise en compte de n'importe quel mode de réflexion et de transmission au sein du même algorithme de radiosité est alors possible avec cette méthode. Même si seulement les modes de réflexion et de transmission extrêmes (purement diffus et purement spéculaire et directe) sont utilisés dans les applications, il est possible d'introduire des BSDF plus complexes grâce au même principe. Les BSDF générales f de chaque surface, doivent néanmoins satisfaire les conditions de réciprocité (Éq. 2.17) et de conservation d'énergie (Éq. 2.18) pour que le calcul du rayonnement reste valide.

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = f(\theta, \varphi, \theta_i, \varphi_i) \quad 2.17$$

$$\int_{\Omega} f(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) d\omega \leq 1 \quad 2.18$$

Réciprocité et conservation d'énergie des modèles utilisés

Le choix a été fait de ne considérer que les modes de réflexions et de transmissions extrêmes. Les caractéristiques des éléments considérés (Tableau 2.4) sont décomposées en quatre composantes : la réflectance diffuse, la transmittance diffuse, la réflectance spéculaire, et la transmittance directe. La réflectance spéculaire et la transmittance directe sont soumises à une dépendance angulaire suivant la simplification de Schlick. Ces modèles restent parfaitement isotropes, c'est-à-dire que la réflexion et la transmission sont invariants à une rotation près de la surface de l'élément autour de sa normale. La condition de réciprocité est donc validée. La somme des réflectances et transmittances bidirectionnelles-hémisphériques doit être inférieure à 1 pour satisfaire la condition de conservation d'énergie.

$$\rho(\theta_i) + \tau(\theta_i) \leq 1 \quad 2.19$$

Si cette condition est respectée à l'angle d'incidence normal pour les 4 types d'éléments considérés ici (Tableau 2.1), (élément opaque diffus, élément opaque spéculaire, vitrage, et textile), elle l'est également quel que soit l'angle d'incidence.

Tableau 2.4 : Condition de conservation d'énergie à respecter pour chaque type d'élément.

Élément opaque diffus	$1 \geq \rho_d$
Élément opaque spéculaire	$1 \geq \rho_{r0}$
Élément de vitrage	$1 \geq \rho_{r0} + \tau_{r0}$
Élément textile	$1 \geq \rho_d + \tau_d + \tau_{r0}$

2.3.2. Modèle numérique

Le facteur de vue étendu F_{ij}^{ext} peut être décomposé en deux parties (Éq. 2.20).

$$F_{ij}^{ext} = F_{ij} + S_{ij} \quad 2.20$$

F_{ij}^{ext} est le facteur de vue étendu de i vers j . F_{ij} est le facteur de vue classique de i vers j . S_{ij} est défini comme la fraction de la radiosité produite par le carreau j reçue après une ou plusieurs réflexions spéculaires sur le carreau i . S_{ij} représente la partie du facteur de vue étendu correspondant aux réflexions et aux transmissions autres que parfaitement diffuses.

La Figure 2.25 illustre le concept dans un environnement urbain. Un carreau (jaune) situé au sol à l'intérieur d'un des bâtiments d'une rue voit directement les différents carreaux (verts) des murs, du plafond et de la fenêtre de la pièce dans laquelle il se situe. Les facteurs de vue classiques entre le carreau jaune et les carreaux verts sont alors différents de 0. Ce même carreau jaune voit grâce aux réflexions spéculaires et aux transmissions directes des fenêtres : une partie du plafond, la façade en vis-à-vis, l'intérieur des bâtiments en vis-à-vis, et également la façade du bâtiment dans lequel il se situe. Les différents carreaux correspondants sont représentés en bleu dans la Figure. La partie supplémentaire S de F^{ext} entre le carreau jaune et chaque carreau bleu est alors différente de 0. Au total, le carreau jaune voit l'ensemble des carreaux (rouges) vus directement et/ou après réflexions spéculaires et transmissions directes.

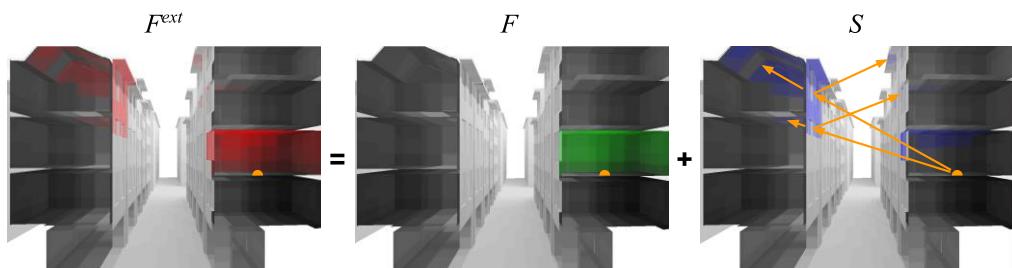


Figure 2.25 : Coupe transversale des bâtiments d'une rue de Bayonne. Le carreau marqué en jaune voit, directement ou indirectement, l'ensemble des carreaux rouges. Les carreaux vus directement (verts) et après réflexions spéculaires et transmissions directes (bleus) sont séparés dans les deux images de droite.

Suivant la méthode décrite en section 2.2, le calcul des facteurs de vue classiques depuis un carreau i peut être résumé ainsi : plusieurs rayons sont lancés depuis sa surface vers le reste de la scène dans des directions préalablement définies. Chaque rayon représente la même fraction de facteur de vue ΔF égale à l'inverse du nombre de rayon émis. Lorsqu'un rayon intersecte un carreau P_j , la valeur du facteur de vue F_{ij} correspondant est augmentée de ΔF . Le facteur de vue F_{ij} est ainsi égal à la somme des poids des rayons partant du carreau i qui intersectent directement le carreau j .

Le calcul de la partie supplémentaire S du facteur de vue étendu commence lorsqu'un rayon intersecte une surface qui réfléchit ou transmet le rayonnement autrement que de manière parfaitement diffuse. Si les rayons coupent un carreau possédant une réflectance spéculaire et/ou une transmittance directe, leur poids diminue en fonction de ses caractéristiques, à savoir $\rho_r(\theta_i)$ et $\tau_r(\theta_i)$, et leurs trajectoires sont prolongées dans les directions correspondantes. On considère

ici que les réflexions spéculaires et les transmissions directes sont produites dans les directions régulières exactes. Un seul rayon est nécessaire pour modéliser la réflexion spéculaire (ou la transmission directe) ce qui permet de tirer pleinement profit des performances du lancer de rayon conventionnel pour les réflexions spéculaires et les transmissions directes. Ce processus est répété jusqu'à atteindre une surface uniquement diffuse ou une tuile de ciel. La partie supplémentaire S_{ij} du facteur de vue étendu est alors égal à la somme des poids des rayons partant du carreau i qui intersectent le carreau j après une ou plusieurs réflexions spéculaires et transmissions directes.

Dans certaines circonstances, comme lorsque deux miroirs sont l'un en face de l'autre, des rayons peuvent avoir une trajectoire infinie par inter-réflexion spéculaire. Comme il est impossible de calculer l'infini des échanges non-diffus, il est nécessaire de définir une limite pour stopper le processus de calcul. Deux techniques simples sont envisageables. La première consiste à définir un poids de rayon relatif minimum à partir duquel sa trajectoire est stoppée en considérant que son influence devient négligeable. La deuxième consiste à fixer un nombre maximal de réflexion spéculaire / transmission directe. La première technique a l'avantage de ne pas avoir à calculer les échanges inutiles qui ne représentent qu'une faible part d'énergie, ce qui peut représenter un intérêt en termes de rapidité de calcul. La deuxième technique est cependant retenue car elle offre l'avantage de contrôler parfaitement le nombre maximum de réflexions spéculaires / transmissions directes prises en compte et permet une comparaison plus facile avec les autres méthodes de calcul.

2.3.3. Exemple du cube

Cette section détaille les résultats du calcul des facteurs de vue étendus dans un contexte très simple. A partir d'un cube composé de faces opaques parfaitement diffuses, des miroirs sont rajoutés au fur et à mesure. L'environnement est un cube où chaque surface n'est représentée que par un seul carreau. La matrice des facteurs de vue étendus \mathbf{F}^{ext} correspondante est une matrice carrée de 6 x 6. Le calcul est effectué en envoyant 1 000 000 rayons par carreau pour un temps de calcul total inférieur à une seconde. En premier lieu, la totalité des carreaux sont des éléments opaques diffus. Dans ce cas, les facteurs de vue classiques et les facteurs de vue étendus sont identiques.

		$\mathbf{F} = \mathbf{F}^{ext}$					
		Bas	Gauche	Arrière	Haut	Avant	Droite
Bas	Bas	0	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	Gauche	0.200	0	0.200	0.200	0.200	0.200
Arrière	Arrière	0.200	0.200	0	0.200	0.200	0.200
	Haut	0.200	0.200	0.200	0	0.200	0.200
Avant	Avant	0.200	0.200	0.200	0.200	0	0.200
	Droite	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0

Figure 2.26 : Matrice des facteurs de vue étendus dans un cube composé uniquement d'éléments opaques diffus. Les facteurs de vue et facteurs de vue étendus sont identiques.

Un seul miroir (1/6ème du cube)

Le carreau *Gauche* est à présent changé en miroir. Sa réflectance spéculaire ρ_r est de 90% et est soumise à la dépendance angulaire selon la simplification de Schlick. Cette fois, la matrice des facteurs de vue étendus et celle des facteurs de vue classiques sont différentes. Dans la Figure 2.27, les facteurs de vue, la partie supplémentaire des facteurs de vue étendus et les facteurs de vue étendus du carreau *Bas* sont représentées. Les flèches schématisent les deux chemins possibles de vue du carreau *Bas* vers le carreau *Haut*: La flèche rouge pour la vue directe, correspondant au facteur de vue $F_{\text{Bas-Haut}}$, et la flèche jaune pour la vue à travers le carreau *Gauche* par réflexion spéculaire, correspondant à la partie supplémentaire des facteurs de vue étendus $S_{\text{Bas-Haut}}$. Le facteur de vue $F_{\text{Bas-Haut}}^{\text{ext}}$ est la somme de ces deux composantes.

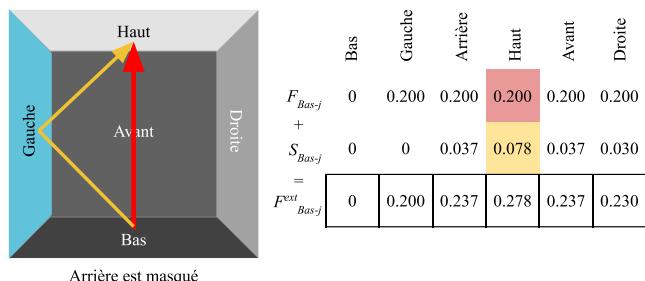


Figure 2.27 : Facteurs de vue (F), partie supplémentaire des facteurs de vue étendus (S), et facteur de vue étendu (F^{ext}) du carreau Bas. Le carreau bleu Gauche est un miroir.

Concernant la matrice \mathbf{F}^{ext} complète (Figure 2.28), plusieurs remarques peuvent être faites :

- Le carreau *Gauche* ne voit aucun carreau par réflexion spéculaire car il est le seul à avoir une réflectance spéculaire. Ses facteurs de vue classiques et étendus sont identiques.
 - Dans cette configuration, le carreau *Droite* se voit lui-même à travers le carreau *Gauche* situé devant lui par réflexion spéculaire. Cela se traduit par $F_{Droite-Droite}^{ext} \neq 0$. La diagonale de la matrice \mathbf{F}^{ext} peut ne pas être nulle, contrairement à celle de \mathbf{F} .
 - On remarque aussi que la somme des facteurs de vue étendus d'un carreau est supérieure à 1 contrairement à la somme des facteurs de vue classiques. Cette propriété, appelée propriété de fermeture, valable pour les facteurs de vue disparait pour les facteurs de vue étendus.

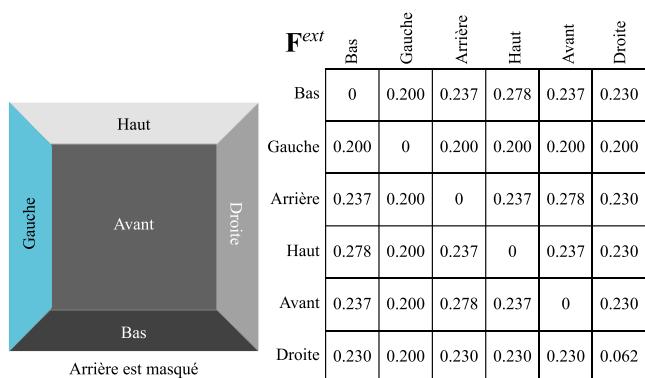


Figure 2.28 : Matrice des facteurs de vue étendus dans un cube. Toutes les surfaces sont diffuses sauf le carreau Gauche en bleu qui est un miroir.

Deux miroirs parallèles (2/6^{ème} du cube)

Le carreau *Droite* est à son tour un miroir. Comme précédemment, la flèche rouge représente la trajectoire de vue directe du carreau *Bas* vers le carreau *Haut*, et les flèches jaunes représentent les trajectoires par réflexion spéculaire (Figure 2.29). Contrairement au cas précédent avec un seul miroir, il existe une infinité de trajectoires pour parvenir du carreau *Bas* au carreau *Haut*.

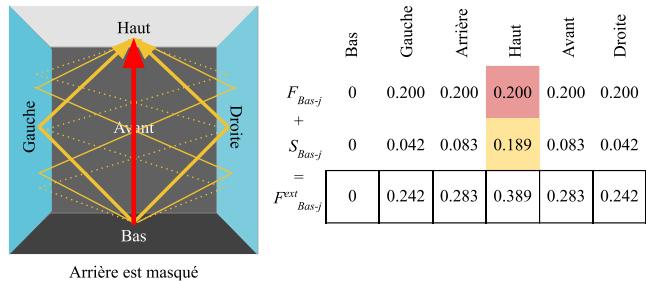


Figure 2.29 : Facteurs de vue (F), partie supplémentaire des facteurs de vue étendus (S), et facteur de vue étendu (F^{ext}) du carreau Bas. Les carreaux Gauche et Droite en bleu sont des miroirs.

Cette infinité des réflexions spéculaires ne peut pas être calculée et les réflexions sont donc obligatoirement limitées à un certain nombre, ici, à 10. Cette configuration avec deux miroirs en vis-à-vis parfaitement parallèles représente un cas critique où il existe une infinité de trajectoires à cause des inter-réflexions spéculaires. Cependant, sans prendre en compte cette infinité des réflexions spéculaires, le calcul des facteurs de vue étendus converge à partir de 10 réflexions avec une erreur relative de 0.02% (Figure 2.30). Cette convergence s'explique par le fait que :

- Un rayon voit son poids diminué au fur et à mesure qu'il rencontre un des deux miroirs en fonction des reflectances spéculaires. Plus un rayon est réfléchi, plus son poids diminue.
- Cette convergence s'explique aussi par le fait que plus un rayon est réfléchi, plus il a de chance de rencontrer une surface diffuse et ainsi finir son parcours. Après quelques réflexions, la portion de rayon qui continue d'inter-réfléchir entre les deux miroirs est très réduite.

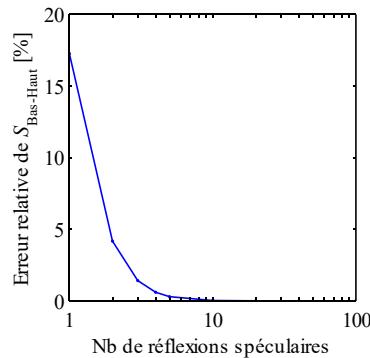


Figure 2.30 : Convergence de l'erreur relative du calcul de $S_{Bas-Haut}$ en fonction du nombre de réflexions spéculaires prises en compte dans le cas du cube avec les deux carreaux miroirs parallèles.

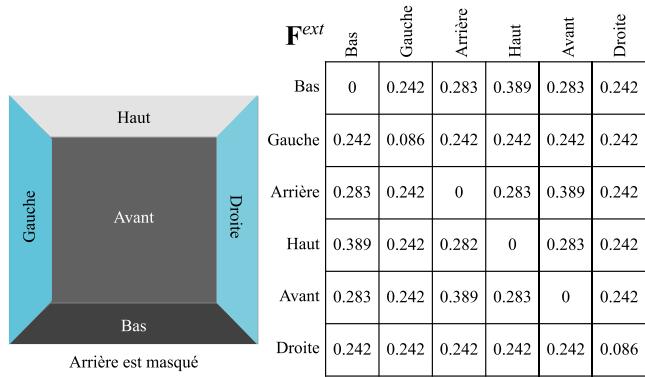


Figure 2.31 : Matrice des facteurs de vue étendus dans un cube. Toutes les surfaces sont diffuses sauf les carreaux bleus « Gauche » et « Droite » qui sont des miroirs.

Environnement principalement composé de miroirs (5/6ème et totalité du cube)

Deux configurations supplémentaires sont étudiées (Figure 2.32). Ces deux configurations représentent des cas extrêmes où l'environnement est principalement composé de miroirs. Dans l'un 6 carreaux sur 6 sont des miroirs, dans l'autre 5 carreaux sur 6 sont des miroirs, seul le carreau *Bas* n'en est pas.

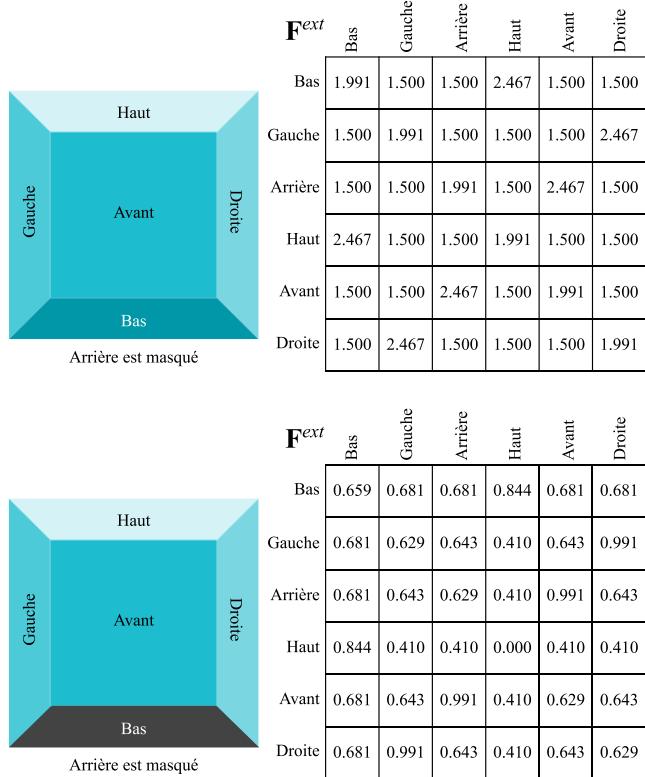


Figure 2.32 : Matrice des facteurs de vue étendus dans un cube composé uniquement de miroirs (haut), et dans un cube où un seul carreau n'est pas un miroir (bas).

Lorsque l'intégralité du cube est constituée de miroirs, on atteint des valeurs de facteurs de vue étendus très élevées. Le facteur de vue étendu entre le carreau *Bas* et *Haut* est égal à 2.467 dans

ce cas, tandis qu'il n'est que de 0.844 dans le cas où seul le carreau *Bas* est diffus. Logiquement, il s'agit du cas où le nombre de réflexions spéculaires à prendre en compte est le plus élevé.

Dans le premier graphique de la Figure 2.33, l'erreur relative du calcul de $S_{\text{Bas-Haut}}$ est représentée en fonction du nombre de réflexions spéculaires prises en compte. Pour calculer l'erreur relative, la valeur obtenue avec 200 réflexions spéculaires est considérée comme la valeur exacte. Même si ces deux environnements sont composés essentiellement de miroirs, le nombre de réflexions spéculaires nécessaire pour parvenir à une précision équivalente est nettement différent. Environ 60 réflexions permettent d'atteindre une erreur relative de 0.1% dans le cube tout miroir tandis que 10 suffisent à atteindre cette même précision dans l'autre cas.

Dans le cube tout miroir, il n'existe pas de possibilité que la trajectoire des rayons s'arrête car toutes les surfaces ont une réflectance spéculaire, ce qui explique cette nette différence. La seule variable qui fait converger le calcul est la diminution du poids des rayons à chaque réflexion. Dans l'autre cas, la présence d'un carreau diffus représente une possibilité d'arrêt de la trajectoire des rayons, ce qui fait nettement chuter le nombre de réflexions spéculaires.

La même raison permet d'expliquer les résultats du deuxième graphique de la Figure 2.33 montrant le temps de calcul de la matrice \mathbf{F}^{ext} en fonction du nombre de réflexions. Dans le cas de la boîte entièrement composée de miroirs, l'évolution du temps de calcul est parfaitement linéaire pour la simple raison qu'aucun rayon n'est stoppé. A chaque réflexion supplémentaire, la même quantité de rayons est produite. Dans l'autre cas, les rayons sont arrêtés lorsqu'ils rencontrent la surface diffuse. Plus les rayons se propagent, plus ils ont de chance de couper la surface diffuse et donc d'arrêter leur trajectoire. C'est pour cela que le temps de calcul converge à partir d'un certain nombre de réflexions spéculaires prises en compte. Heureusement, même dans les environnements bâtis les plus critiques, c'est-à-dire composés avec une majorité de surfaces spéculaires, type Manhattan, l'environnement n'est jamais uniquement composé de surfaces spéculaires : il existe toujours des éléments, le ciel, le sol, la plupart des murs, etc., sans composante spéculaire qui permettent au calcul des facteurs de vue étendus de converger.

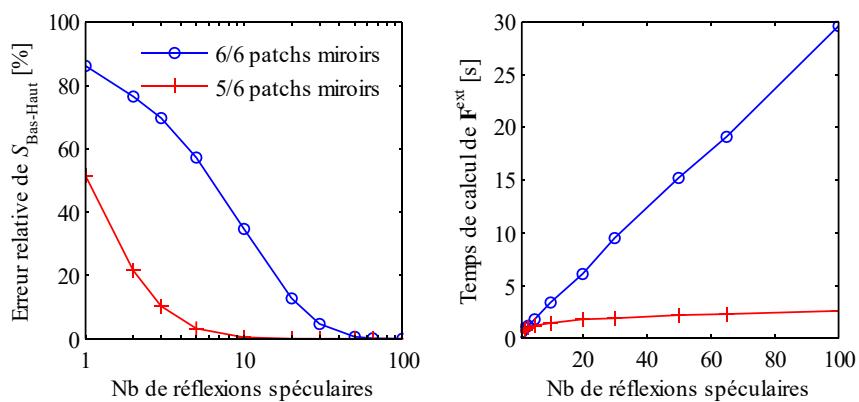


Figure 2.33 : Erreur relative de $S_{\text{Bas-Haut}}$ (gauche) et temps de calcul de \mathbf{F}^{ext} (droite) en fonction du nombre de réflexions spéculaires 6/6 et 5/6 des carreaux miroirs. Par carreau, 1 000 000 de rayons sont lancés initialement.

2.4. Système d'équations des irradiances

La dernière étape du calcul consiste à établir et résoudre le système d'équations linéaires des irradiances. C'est à cette étape que les échanges par réflexions et transmissions diffuses sont considérés. Pour rappel, les échanges par réflexion spéculaire et transmissions diffuses sont déjà pris en compte dans les facteurs de vue étendus. Cette section présente les étapes à franchir pour parvenir aux irradiances : la définition de l'équation de l'irradiance à partir de l'équation de la radiosité, la prise en compte des échanges par transmission diffuses, l'écriture et la résolution du système suivant les deux principales méthodes directes et itératives, et l'obtention des « *daylight coefficients* » pour des simulations à plusieurs pas de temps impliquant un nombre de conditions de ciel important. La dernière partie explique les hypothèses prises en compte pour le passage de l'irradiance reçue à la densité de flux absorbé par l'environnement bâti pour les études thermiques.

2.4.1. De l'équation de la radiosité à l'équation de l'irradiance

La méthode de radiosité repose sur la résolution du système d'équations linéaires du même nom (Éq. 2.21). La radiosité représente le rayonnement qui part d'un carreau de manière parfaitement diffuse par réflexion ou par sa propre émission.

$$B_i = M_i + \rho_{d,i} \sum_j F_{ij}^{ext} B_j \quad 2.21$$

Avec, B_i la radiosité du carreau i , M_i l'exitance du carreau i , $\rho_{d,i}$ la réflectance diffuse de i , et F_{ij}^{ext} le facteur de vue du carreau i vers le carreau j .

Cette grandeur est utile pour le rendu d'image de synthèse car on perçoit un objet grâce à la lumière qu'il nous renvoie. En revanche, pour des études d'éclairage naturel ou d'apport solaire, l'intérêt est porté sur le rayonnement que les différents éléments reçoivent. Il est caractérisé par l'irradiance, ou l'éclairement, E . L'irradiance et la radiosité sont deux grandeurs similaires. Toutes les deux représentent une densité de flux en W.m^{-2} et impliquent une distribution uniforme des radiances reçues, dans le cas de l'irradiance, et des radiances envoyées, dans le cas de la radiosité. Il est possible d'adapter l'équation de la radiosité afin d'obtenir l'équation de l'irradiance (Éq. 2.22).

$$E_i = \underbrace{\sum_j F_{ij}^{ext} M_j}_{\text{émission directe}} + \underbrace{\sum_j F_{ij}^{ext} \rho_{d,j} E_j}_{\text{réfléchis (dif)}} \quad 2.22$$

La Figure 2.34 représente chaque partie de l'équation de la radiosité et de l'équation de l'irradiance. Ces deux équations sont composées d'une composante correspondant au rayonnement émis directement et d'une composante correspondant à la partie réfléchie de manière diffuse du rayonnement avec le coefficient ρ_d . Cette partie réfléchie de l'irradiance d'un carreau dépend des irradiances reçues par les autres carreaux. Pour obtenir l'irradiance d'un carreau, la construction d'un système linéaire (Éq. 2.23) liant les irradiances de tous les carreaux est nécessaire.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^{ext} & F_{12}^{ext} & \cdots & F_{1n}^{ext} \\ F_{21}^{ext} & F_{22}^{ext} & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \\ F_{n1}^{ext} & & \ddots & F_{nn}^{ext} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11}^{ext} & F_{12}^{ext} & \cdots & F_{1n}^{ext} \\ F_{21}^{ext} & F_{22}^{ext} & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \\ F_{n1}^{ext} & & \ddots & F_{nn}^{ext} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{d,1} \\ \rho_{d,2} \\ \vdots \\ \rho_{d,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix}$$

$\Leftrightarrow \mathbf{E} = \mathbf{F}^{ext} \mathbf{M} + \mathbf{F}^{ext} \mathbf{R} \mathbf{E}$ 2.23

Avec, \mathbf{E} le vecteur des irradiances, \mathbf{M} le vecteur des exitances, \mathbf{F}^{ext} la matrice des facteurs de vue étendus, et \mathbf{R} la matrice carrée diagonale des réflectances diffuses.

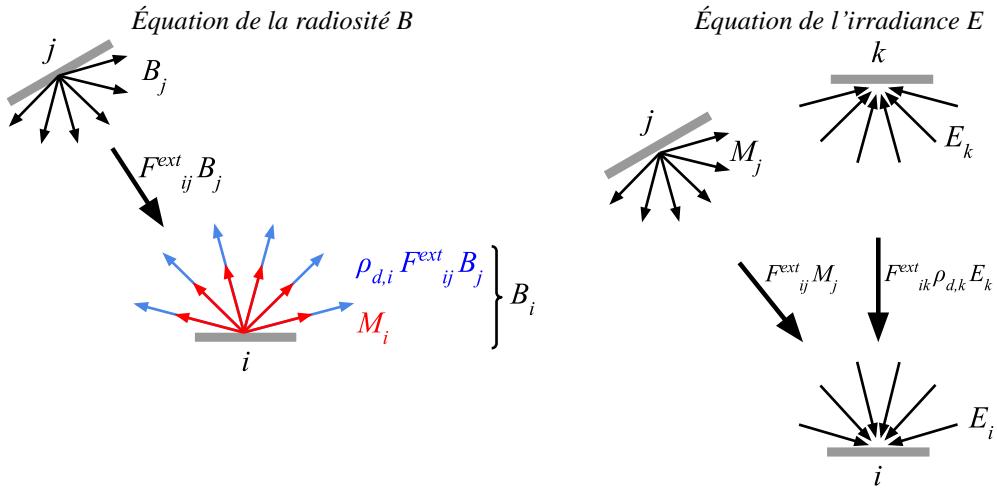


Figure 2.34 : Décomposition de l'équation de la radiosité (gauche) et de l'équation de l'irradiance (droite).

2.4.2. Prise en compte des transmissions diffuses

Comme pour les réflexions diffuses, il est possible d'introduire les transmissions diffuses dans l'équation de l'irradiance (Eq. 2.24). Dans la Figure 2.35, le carreau i voit le carreau l . Le carreau l est l'élément de surface d'un élément de fine épaisseur qui transmet la lumière de manière diffuse (exemple : textile) et possède donc un carreau correspondant l' sur son autre face avec sa propre transmittance diffuse $\tau_{d,l'}$. Le rayonnement émis par le carreau l par transmission diffuse dépend directement de ce que reçoit le carreau correspondant l' . Le produit entre l'irradiance et la transmittance diffuse de l' est égal au rayonnement émis par le carreau l par transmission diffuse.

$$E_i = \sum_j F_{ij}^{ext} M_j + \sum_j F_{ij}^{ext} \rho_{d,j} E_j + \sum_j F_{ij}^{ext} \tau_{d,j} E_{j'}$$
2.24

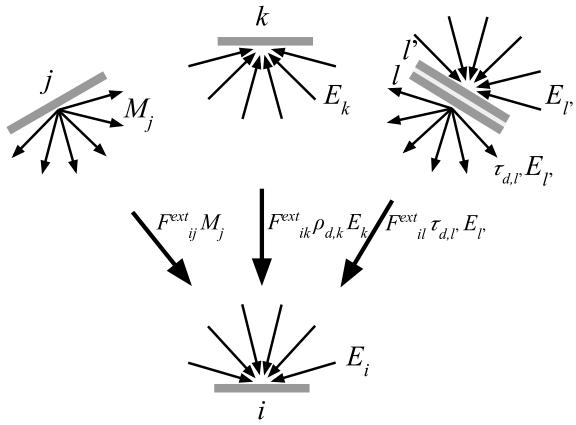


Figure 2.35 : Décomposition de l'équation de l'irradiance avec la transmission diffuse (carreaux correspondants l et l').

Le système (Éq. 2.25) correspondant à cette équation des irradiances comprend la nouvelle matrice carrée des transmittances diffuses \mathbf{T} . La matrice des réflectances diffuses \mathbf{R} et la matrice \mathbf{T} ne sont pas organisées de la même façon. Le rayonnement qui est réfléchi de manière diffuse par un carreau i dépend de l'irradiance reçue sur ce carreau et de sa propre réflectance. La matrice des réflectances diffuses \mathbf{R} est alors une matrice carrée diagonale où $R_{ii} = \rho_{d,i}$. Comme expliqué avant, le rayonnement qui est transmis par un carreau i dépend du rayonnement reçu sur son carreau correspondant i' (situé sur la face opposée de l'élément) et de sa transmittance diffuse. La matrice des transmittances diffuses \mathbf{T} est une matrice carrée symétrique et organisée de telle sorte que $T_{ii'} = \tau_{d,i'}$ et $T_{i'i} = \tau_{d,i}$.

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{F}^{\text{ext}} \mathbf{M} + \mathbf{F}^{\text{ext}} \mathbf{R} \mathbf{E} + \mathbf{F}^{\text{ext}} \mathbf{T} \mathbf{E} \\ &= \mathbf{F}^{\text{ext}} \mathbf{M} + \mathbf{F}^{\text{ext}} (\mathbf{R} + \mathbf{T}) \mathbf{E} \end{aligned} \quad 2.25$$

Avec, \mathbf{R} et \mathbf{T} définis comme suit :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \rho_{d,1} & & & \\ & \rho_{d,2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \rho_{d,n} \end{bmatrix} \Leftrightarrow R_{ii} = \rho_{d,i} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} & i & & i' \\ & \tau_{d,i'} & & \\ i' & & \ddots & \\ & \tau_{d,i} & & \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{array}{l} T_{ii'} = \tau_{d,i'} \\ T_{i'i} = \tau_{d,i} \end{array}$$

2.4.3. Écriture et résolution du système d'équation des irradiances

Écriture et réduction du système

Le système (Éq. 2.25) peut être réduit et simplifié afin de ne conserver que les parties des matrices et vecteurs qui jouent un rôle dans les échanges radiatifs. Les matrices \mathbf{F}^{ext} , \mathbf{R} et \mathbf{T} , ainsi que les vecteurs \mathbf{E} et \mathbf{M} , sont organisés en différentes sections correspondant aux trois types d'élément présentés en section 2.1 :

- c , les éléments de l'environnement bâti (*city*),
- s , les capteurs (*sensors*),
- k , les éléments du ciel et soleil (*sky*).

Par exemple, la composante \mathbf{F}_{ck}^{ext} de la matrice \mathbf{F}^{ext} correspond aux facteurs de vue étendus des carreaux de l'environnement bâti (c) vers les tuiles de ciel (k), la composante \mathbf{F}_{cc}^{ext} correspond aux facteurs de vue étendus entre les carreaux de l'environnement bâti (c), et la composante \mathbf{E}_s du vecteur \mathbf{E} correspond aux irradiances des capteurs (s).

Les composantes nulles des matrices et vecteurs sont définies à partir des caractéristiques de chaque type d'élément : Pour \mathbf{F}^{ext} , la ligne k et la colonne s sont nulles car les tuiles de ciel ne voient aucun élément et les capteurs ne sont vus par aucun élément. Pour \mathbf{R} et \mathbf{T} , seules les composantes \mathbf{R}_{cc} et \mathbf{T}_{cc} sont non-nulles car les éléments de l'environnement bâti sont les seuls à pouvoir réfléchir et transmettre le rayonnement. Pour \mathbf{E} , les composantes \mathbf{E}_c et \mathbf{E}_s sont conservées car l'environnement bâti et les capteurs sont les seuls à pouvoir recevoir du rayonnement. Pour \mathbf{M} , la composante \mathbf{M}_k est la seule à être non-nulle car le ciel et le soleil sont les seules sources qui émettent du rayonnement.

$$\begin{aligned}\mathbf{F}^{ext} &= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{cc}^{ext} & \mathbf{F}_{cs}^{ext} & \mathbf{F}_{ck}^{ext} \\ \mathbf{F}_{sc}^{ext} & \mathbf{F}_{ss}^{ext} & \mathbf{F}_{sk}^{ext} \\ \mathbf{F}_{kc}^{ext} & \mathbf{F}_{ks}^{ext} & \mathbf{F}_{kk}^{ext} \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{cc} & \mathbf{R}_{cs} & \mathbf{R}_{ck} \\ \mathbf{R}_{sc} & \mathbf{R}_{ss} & \mathbf{R}_{sk} \\ \mathbf{R}_{kc} & \mathbf{R}_{ks} & \mathbf{R}_{kk} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{cc} & \mathbf{T}_{cs} & \mathbf{T}_{ck} \\ \mathbf{T}_{sc} & \mathbf{T}_{ss} & \mathbf{T}_{sk} \\ \mathbf{T}_{kc} & \mathbf{T}_{ks} & \mathbf{T}_{kk} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_c \\ \mathbf{E}_s \\ \mathbf{E}_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_s \\ \mathbf{M}_k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{cc}^{ext} & 0 & \mathbf{F}_{ck}^{ext} \\ \mathbf{F}_{sc}^{ext} & 0 & \mathbf{F}_{sk}^{ext} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_c \\ \mathbf{E}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{M}_k \end{bmatrix}\end{aligned}$$

A partir de l'équation 2.25, les irradiances de l'environnement bâti et des capteurs, \mathbf{E}_c et \mathbf{E}_s , peuvent alors être exprimés ainsi :

$$\mathbf{E}_c = \mathbf{F}_{ck}^{ext} \mathbf{M}_k + \mathbf{F}_{cc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}) \mathbf{E}_c \quad 2.26$$

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{F}_{sk}^{ext} \mathbf{M}_k + \mathbf{F}_{sc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}) \mathbf{E}_c \quad 2.27$$

Avec, \mathbf{F}_{ck}^{ext} , \mathbf{F}_{sk}^{ext} , \mathbf{F}_{sc}^{ext} et \mathbf{F}_{cc}^{ext} respectivement les matrices des facteurs de vue de l'environnement bâti vers le ciel, des capteurs vers le ciel, des capteurs vers l'environnement bâti, et entre les éléments de l'environnement bâti, \mathbf{M}_k le vecteur des exitances des tuiles du ciel, et enfin \mathbf{R}_{cc} et \mathbf{T}_{cc} les matrices carrés des réflectances diffuses et des transmittances diffuses de l'environnement bâti.

Des deux équations 2.26 et 2.27, la seule qui constitue un système d'équations linéaires est celle des irradiances de l'environnement bâti (\mathbf{E}_c dépend de \mathbf{E}_c). En effet, les irradiances des capteurs sont obtenues directement à partir des irradiances de l'environnement bâti (\mathbf{E}_s ne dépend pas de \mathbf{E}_s et dépend de \mathbf{E}_c). Le cœur du calcul réside donc dans la résolution du système d'équation linéaire de \mathbf{E}_c . Pour cela, les deux méthodes de résolutions les plus courantes sont utilisées ici : la résolution directe par inversion de matrice et la résolution itérative avec la méthode de Jacobi.

Résolution directe par inversion

Le système peut être résolu par une simple inversion de matrice (Equation 2.28). En procédant ainsi, la solution exacte est obtenue. L'avantage majeur de cette méthode de résolution est que l'infinité des réflexions et des transmissions diffuses est directement prise en compte.

$$\mathbf{E}_c = \left(\mathbf{I} - \mathbf{F}_{cc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}) \right)^{-1} \mathbf{F}_{ck}^{ext} \mathbf{M}_k \quad 2.28$$

Le temps de calcul pour cette technique de résolution dépend de la taille de la matrice carrée $(\mathbf{I} - \mathbf{F}_{cc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}))$, qui elle-même dépend du nombre de carreaux dans l'environnement bâti. Le temps de calcul est proportionnel au carré du nombre de carreaux : doubler le nombre de carreaux revient à multiplier le temps de calcul environ par 8 ($=2^3$). Pour 30 000 carreaux, la résolution du système par inversion dure environ 3 minutes avec Matlab, 40 secondes avec 20 000 carreaux, et 5 secondes avec 10 000 carreaux. Au-delà de 30 000 carreaux, les temps de calcul et les besoins en mémoire pour stocker les matrices commencent à devenir significatifs. Le fait que la quantité de carreaux soit le principal facteur influençant la durée des calculs et des besoins en mémoires justifie l'intérêt de la méthode de calcul des facteurs de vue développée (section 2.2.). Rappelons qu'elle permet de conserver la meilleure précision possible tout en utilisant des maillages grossiers composés de peu de carreaux.

Résolution itérative avec la méthode Jacobi

L'autre méthode qui est également utilisée dans les chapitres suivants consiste à résoudre le système de manière itérative selon la méthode de Jacobi (Éq. 2.29).

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_c^{(t)} &= \mathbf{F}_{ck}^{ext} \mathbf{M}_k + \mathbf{F}_{cc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}) \mathbf{E}_c^{(t-1)} \\ \text{Avec } \mathbf{E}_c^{(0)} &= \mathbf{F}_{ck}^{ext} \mathbf{M}_k \end{aligned} \quad 2.29$$

Avec cette méthode, le nombre d'itération t correspond au nombre de réflexions (et transmissions) diffuses prises en compte et doit avoir une limite fixée. Contrôler le nombre de réflexions permet de faire des comparaisons avec le moteur de calcul RADIANCE à partir de simulations faites avec les mêmes hypothèses de calcul. Avant la première itération, c'est-à-dire lorsqu'aucune réflexion ou transmission diffuse n'est considérée, l'irradiance est composée uniquement de la partie directe $\mathbf{F}_{ck}^{ext} \mathbf{M}_k$. D'autres méthodes itératives permettent un calcul plus rapide, comme la méthode de Gauss-Seidel où le vecteur des irradiances est mis à jour au fur et à mesure que chaque nouvelle valeur d'irradiance est calculée.

Avec cette méthode, le temps de calcul dépend de nombreux facteurs : il est proportionnel au nombre d'itérations, à la densité de la matrice des facteurs de vue \mathbf{F}_{cc}^{ext} , et proportionnel au carré

du nombre de carreaux dans l'environnement bâti. Lorsque le système est trop gros pour être résolu par inversion de matrice, il existe toujours une possibilité de le résoudre par itération (en réduisant le nombre d'itérations par exemple) tout en conservant des temps de calcul convenables.

En revanche, le nombre d'itérations pris en compte a un impact sur la précision des calculs. En n'effectuant pas assez d'itérations, la partie réfléchie du rayonnement et transmise de manière diffuse est sous-estimée. Idéalement, l'infinie des itérations devrait être prise en compte. En général, le calcul des irradiances converge cependant à partir d'un certain nombre d'itérations. Ce nombre est variable selon la configuration de la scène et selon la précision souhaitée.

Solution pour toute condition de ciel

L'idée présentée ici est basée sur le concept des « *Daylight Coefficients* » proposé par [Tregenza 1983]. Pour le calcul d'indicateurs ou la réalisation de simulations dynamiques, il est nécessaire de calculer les irradiances pour une multitude de conditions de ciel différentes. Au lieu de résoudre le système à chaque condition de ciel, le système n'est résolu qu'une seule fois. De cette façon, le temps de calcul est indépendant du nombre de conditions de ciel qui doivent être simulées. Les équations 2.26 et 2.27 sont reformulées afin que l'irradiance soit exprimée comme le produit entre la matrice des « *daylight coefficients* » \mathbf{D} et le vecteur des exitances du ciel \mathbf{M} (Éq. 2.30 et 2.31).

$$\mathbf{E}_c = \mathbf{D}_{ck} \mathbf{M}_k \quad 2.30$$

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{D}_{sk} \mathbf{M}_k \quad 2.31$$

L'obtention de la matrice \mathbf{D}_{ck} peut se faire suivant les deux méthodes présentées avant. Par inversion (Éq. 2.32), il n'y a pas de changement : le temps de calcul est uniquement dépendant du nombre de carreaux dans l'environnement bâti. Par itération (Éq. 2.33), le problème est sensiblement différent : il y a autant de systèmes à résoudre qu'il y a de tuiles de ciel, contrairement à l'équation 2.32 qui consiste à ne résoudre qu'un seul système.

$$\mathbf{D}_{ck} = (\mathbf{I} - \mathbf{F}_{cc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}))^{-1} \mathbf{F}_{ck}^{ext} \quad 2.32$$

$$\mathbf{D}_{ck}^{(n)} = \mathbf{F}_{ck}^{ext} + \mathbf{F}_{cc}^{ext} (\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}) \mathbf{D}_{ck}^{(n-1)} \quad 2.33$$

L'irradiance des capteurs dépend des irradiances des carreaux de l'environnement bâti. Pour les « *daylight coefficients* » des capteurs, c'est la même chose. La matrice \mathbf{D}_{sk} est alors obtenue à partir de \mathbf{D}_{ck} (Éq. 2.34).

$$\mathbf{D}_{sk} = \mathbf{F}_{sk}^{ext} + \mathbf{F}_{sc}^{ext} ((\mathbf{R}_{cc} + \mathbf{T}_{cc}) \mathbf{D}_{ck}) \quad 2.34$$

2.4.4. De l'irradiance à la densité de flux absorbée

Afin de réaliser des études thermiques, il est nécessaire de calculer le flux énergétique absorbé par l'environnement bâti. A partir de l'irradiance et de l'absorptance de l'environnement bâti, il est possible de calculer la densité de flux absorbé (Éq. 2.35).

$$A = \alpha E \quad 2.35$$

Avec, A la densité de flux absorbé [W.m^{-2}], α l'absorptance hémisphérique, et E l'irradiance.

En procédant ainsi, l'absorptance est considérée comme constante quel que soit l'angle d'incidence (absorptance hémisphérique). C'est le cas des matériaux opaques diffus. En revanche, dans le cas des matériaux où la réflectance et la transmittance sont variables selon l'angle d'incidence, l'absorptance l'est aussi. On parle alors d'absorptance directionnelle. Cette dépendance angulaire n'est pas prise en compte ici et l'absorptance hémisphérique est utilisée [Nicodemus 1965]. Cette absorptance hémisphérique est alors représentative de toutes les directions d'incidence et permet de simplifier les calculs.

Cette étape n'intervient qu'une fois le calcul radiatif terminé. Même si cette simplification peut donner lieu à une surestimation ou à une sous-estimation des densités de flux absorbés sur certains carreaux, elle n'a aucun impact sur le calcul et la distribution des irradiances dans la scène.

2.5. Conclusion

Ce chapitre propose une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire dans des applications architecturales. L'utilisation du concept des facteurs de vue étendus permet de considérer les réflexions spéculaires et des transmissions directes, en plus des réflexions et transmissions diffuses déjà prises en compte par la formulation originale de la radiosité. Il est possible à partir de cette méthode de pouvoir considérer la plupart des éléments qui composent l'environnement bâti comme les vitrages, les miroirs ou les toiles d'ombrage. Les avantages de la méthode de radiosité propres à son approche éléments finis sont conservés : le calcul des irradiances et des éclairements est effectué directement sur l'ensemble des carreaux qui composent l'environnement et l'infinité des réflexions diffuses peuvent être calculées par inversion. Cette même approche la rend également très appropriée au concept des coefficients de lumière du jour très utiles pour des études d'éclairage et de thermique dynamiques impliquant un nombre important de pas de temps.

Le calcul des facteurs de vue étendus est effectué à partir de techniques de lancer de rayons. Les réflexions spéculaires et les transmissions directes, prises en compte lors de cette étape, sont modélisées avec précision grâce à ces techniques. Ces techniques offrent également d'autres avantages permettant notamment d'utiliser des maillages grossiers tout en conservant une bonne précision de calcul : le calcul de ces facteurs peut se faire de surface à surface entre les carreaux, permettant notamment d'éviter certaines approximations liées aux parties cachées ; également, la flexibilité de ces techniques offre la possibilité de suivre un modèle de distribution des directions des rayons générées précis et paramétrable selon la précision des facteurs de vue souhaitée [Beckers 2012].

À ce stade, la méthode proposée possède quelques limitations et plusieurs améliorations peuvent être envisagées :

- Une hypothèse est faite lors du calcul des densité de flux absorbé par chaque carreau. L'aspect directionnel de l'absorptance est négligé. La densité de flux absorbé est calculée comme étant le produit entre l'absorptance hémisphérique et l'irradiance reçue. L'impact de cette simplification n'a pas été étudié pour l'instant. Une piste envisagée pour résoudre ce problème serait le calcul d'une matrice de facteur d'absorption en suivant une approche similaire à celle proposée par [Aguerre 2020].
- Les échanges non-diffus pris en compte lors du calcul des facteurs de vue étendus sont limités aux réflexions spéculaires et aux transmissions directes pures. Le concept des facteurs de vue étendus laisse cependant la possibilité de prendre en compte toute sorte de BRDF et BTDF. Cet apport pourrait permettre de réaliser des études plus fines mettant en jeu des matériaux et des dispositifs de fenêtrage plus complexes.
- Nous utilisons les méthodes de résolution du système des irradiances les plus basiques : par itération (Jacobi) et par inversion directe. La méthode de résolution par inversion directe a l'avantage de calculer l'infinité des réflexions diffuses. Cependant, cette méthode n'est envisageable que lorsque l'environnement est constitué d'un nombre de carreaux suffisamment petit pour ne pas causer des problèmes de mémoire et des temps

de calcul trop long. La méthode par itération (Jacobi) n'est pas contrainte par le nombre de carreaux et permet de contrôler le nombre de réflexions diffuses considérées. Or, un nombre important d'itérations peut parfois être nécessaire pour converger, ce qui peut engendrer des temps de calcul longs. Des techniques plus puissantes et rapides pour la résolution de système linéaire de ce type ont été proposés dans la littérature et pourraient être utiliser pour accélérer les calculs.

Chapitre 3 – Application

Amélioration des Puits de Jour par Réflexion et Redirection de la Lumière Naturelle *

3.1.	Introduction	95
3.2.	Méthode	98
3.2.1.	Les modèles de puits de jour étudiés	98
3.2.2.	Indicateurs de performance proposés	101
3.2.3.	La simulation dans le contexte du puits de jour	103
3.3.	Influence des propriétés des surfaces	104
3.3.1.	Propagation de la lumière par réflexions diffuses	104
3.3.2.	Propagation de la lumière par réflexions spéculaires	106
3.3.3.	Avec un seuil d'éclairement plus élevé de 200 lux	109
3.4.	Performances des systèmes de redirection des rayons du soleil	111
3.4.1.	Amélioration des conditions d'éclairement en hiver	111
3.4.2.	Etude de sensibilité des paramètres d'orientation du dispositif	113
3.5.	Variations avec différentes géométries et sous différents climats	116
3.5.1.	Section étroite	116
3.5.2.	Latitude et couvert nuageux	117
3.6.	Validation et comparaison des résultats avec RADIANCE	120
3.6.1.	Présentation des hypothèses de calcul pour les deux méthodes	120
3.6.2.	Étude des paramètres de simulation	123
3.6.3.	Comparaison des résultats	126
3.6.4.	Comparaison des temps de calcul	129
3.7.	Conclusion	131

* Ce chapitre reprend et complète l'article « Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches » publié en août 2020 dans la revue *Solar Energy*.

[Bugeat 2020]

Résumé du chapitre

Le puits de jour est un concept architectural dont le but est de permettre à la lumière naturelle de parvenir au cœur des bâtiments. Par sa forme allongée caractéristique, la propagation de la lumière à travers le puits de jour est fortement dépendante des propriétés des parois qui le composent.

Cette étude analyse les améliorations des performances en éclairage naturel obtenues grâce à des interventions légères dans un puits de jour : changement des caractéristiques des surfaces et mise en place d'un dispositif de redirection des rayons du soleil.

L'évaluation des performances est effectuée à l'aide d'indicateurs annuels dynamiques permettant une prise en compte précise des trajectoires solaires pour les différentes villes testées. Le seuil d'éclairement est abaissé à 100 lux pour ces espaces d'habitation où recevoir une faible quantité de lumière durant la journée peut représenter un bénéfice majeur pour les habitants.

Les résultats montrent que de légers changements de la réflectance diffuse peuvent avoir des effets non-négligeables sur les conditions d'éclairement. Des améliorations conséquentes sont aussi obtenues grâce à l'utilisation de surfaces réfléchissant de manière spéculaire comme les miroirs. Les dispositifs de redirection se montrent particulièrement efficaces lors des périodes de l'année et pour des climats qui disposent de trajectoires solaires basses offrant des bonnes conditions d'éclairement réparties sur toute l'année.

La méthode de radiosité développée permet un calcul précis et rapide des inter-réflexions qui jouent ici un rôle primordial. Une comparaison avec le moteur de calcul de référence RADIANCE sur la précision et les temps de calcul permet de valider les simulations et de mettre en avant les performances de notre méthode.

3.1. Introduction

L'un des problèmes majeurs de la densification urbaine est la réduction de l'accès au rayonnement solaire et à la lumière du jour [Compagnon 2004, Mardaljevic 2013]. Un accès à la lumière du jour suffisant permet de réduire la consommation d'électricité pour l'éclairage [Mardaljevic 2009] et est essentielle pour la santé des occupants [Brown 2011, Aries 2013].

Le puits de jour permet d'apporter de la lumière dans les espaces situés au cœur des bâtiments dans les quartiers denses. Il est largement utilisé dans les centres-villes historiques [Panerai 2004] et dans des projets récents [Kotani 2003]. Un puits de jour est un espace ouvert vers le ciel sur plusieurs étages à l'intérieur du volume d'un bâtiment. Il est conçu pour fournir de la lumière et de la ventilation aux espaces intérieurs adjacents [Harris 2006]. La lumière du jour est reçue au sommet du bâtiment, se répand dans le puits et atteint finalement les zones adjacentes à travers les ouvertures. Même si la quantité de lumière est faible, sa présence est précieuse car elle fournit des informations sur la dynamique quotidienne de la lumière naturelle et régule ainsi notre rythme circadien [Aries 2013, Rea 2016].

État de l'art sur la conception des puits de jour

Les pièces situées aux étages inférieurs reçoivent une quantité limitée de lumière en raison de la forme allongée spécifique des puits de jour. La quantité de lumière qui atteint le fond dépend de deux facteurs principaux : la géométrie du puits de jour, qui affecte directement la quantité de lumière entrante, et les propriétés optiques des surfaces intérieures, qui influencent la diffusion de la lumière par inter-réflexion. La taille du puits de jour et plus particulièrement son rapport hauteur/largeur, à savoir le « Well Index » (WI) [Serres 1990, Calcagni 2004, Acosta 2013], ainsi que l'inclinaison des murs [Kristl 1999, Freewann 2014, Ahadi 2017], influencent fortement la quantité de lumière.

Cependant, dans un environnement déjà existant, il est difficile de modifier la géométrie du puits de jour. Les possibilités d'amélioration sont donc limitées à des modifications légères comme la modification des revêtements de surfaces. Les améliorations produites par de simples modifications, telles que l'utilisation de matériaux très blancs, de miroirs et de dispositifs de redirection, sont analysées à partir de simulations sur un modèle géométrique d'un puits de jour représentatif de ceux que l'on trouve dans la plupart des quartiers urbains historiques, comme Barcelone [Generalitat de Catalunya Departament de Territori i Sostenibilitat 2012] et Bilbao [Departamento de Vivienda y Asuntos Sociales 2002].

Plusieurs études ont déjà souligné l'importance de la composition des murs. Le positionnement des éléments possédant des réflectances différentes [Du 2011] ainsi que la taille et la position des fenêtres [Cole 1990, Matusiak 1999] ont un impact sur les conditions d'éclairage. Par exemple, augmenter la taille et la quantité d'ouvertures signifie diminuer les surfaces opaques qui peuvent réfléchir la lumière dans les espaces au fond du puits de jour [Littlefair 2002]. De plus, l'utilisation de matériaux réfléchissants spéculaires est efficace pour apporter plus de lumière dans la partie inférieure [Kristl 1999, Lau 2008]. Dans le même but de fournir de la lumière au fond du puits de jour, les dispositifs de redirection s'avèrent être des solutions efficaces [Kotani 2003, Freewann 2014]. La Figure 3.1 représente les photos extérieures et intérieures de trois puits de jour situés dans le centre historique de Bayonne.

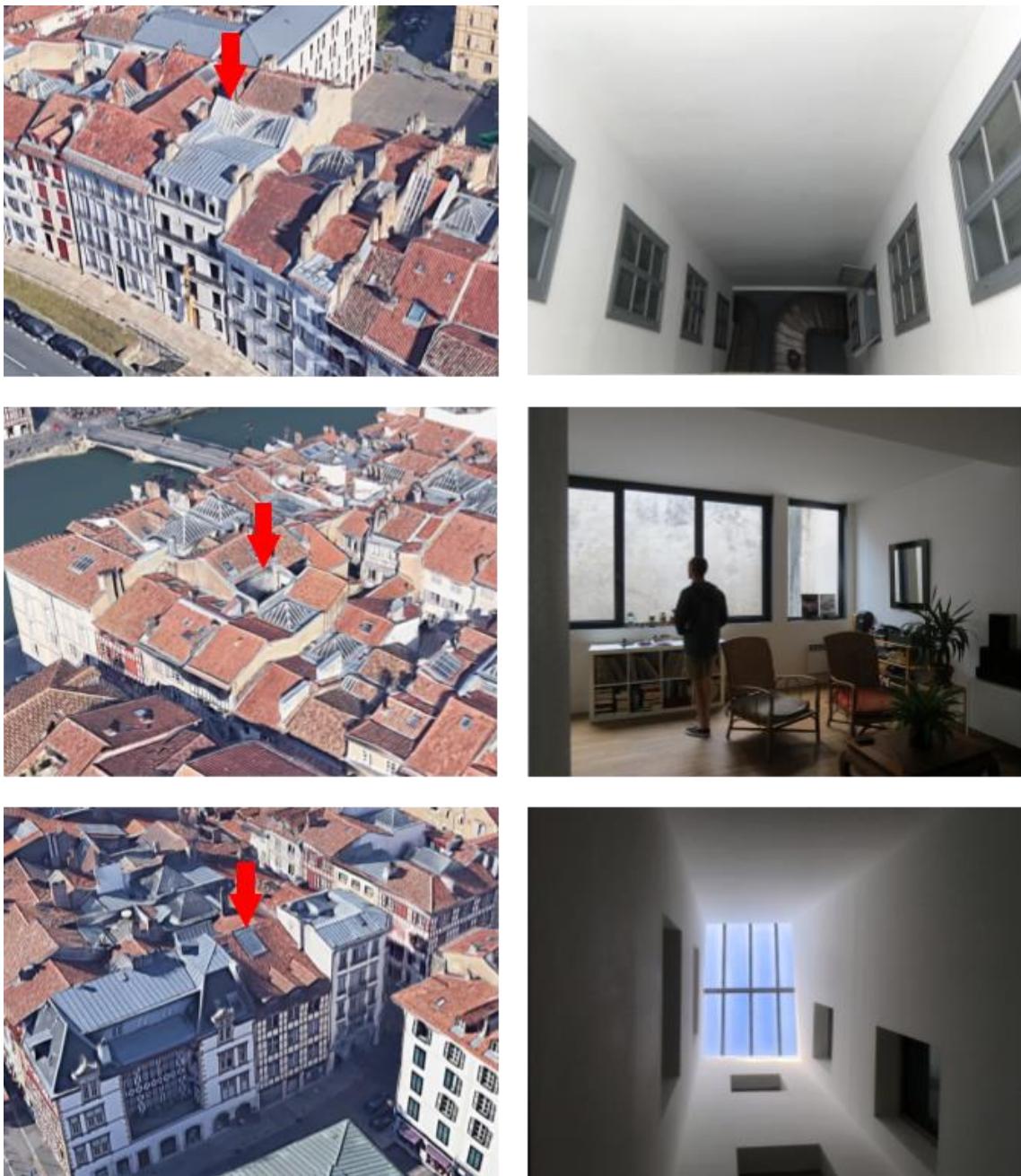


Figure 3.1 : Exemples de puits de jour situés à Bayonne boulevard du Rempart Lachepaillet (haut), quai Augustin Chaho (centre), et rue Port de Bertaco (bas).

La simulation du rayonnement et l'importance de la partie réfléchie dans le cas des puits de jour

Le puits de jour représente un contexte particulier pour les simulations de lumière. Les interréflexions jouent un rôle majeur dans l'éclairement total perçu et doivent être calculées avec précision. Avec un logiciel standard de « path tracing », comme RADIANCE, il est nécessaire de fixer le seuil du nombre de réflexions à une valeur suffisamment importante pour ne pas sous-estimer la partie réfléchie. L'augmentation du nombre de réflexions entraîne des temps de calcul de plus en plus long et affecte la fluidité du processus de conception. La méthode présentée dans

le chapitre 2 basée sur la radiosité et les facteurs de vue étendus est utilisée. Elle permet un calcul rapide et efficace des éclairements nécessaires pour l'obtention des indicateurs CBDM [Reinhart 2006c] avec une prise en compte précise des échanges par réflexions diffuses et spéculaires. RADIANCE reste cependant le moteur de calcul de référence pour les simulations de lumière naturelle.

Parmi les auteurs cités ci-dessus, [Ahadi 2017] sont les seuls à avoir utilisé des indicateurs CBDM pour évaluer la performance en éclairage naturel. Les autres études sont basées sur des expériences sur maquette [Kristl 1999, Lau 2008, Cole 1990, Matusiak 1999], des modèles prédictifs ou des simulations avec des conditions de ciel couvert [Serres 1990, Calcagni 2004, Acosta 2013, Du 2011, Littlefair 2002], des simulations ponctuelles [Freewann 2014], ou des enquêtes par questionnaire [Kotani 2003].

La conception de puits de jour avec des miroirs et des dispositifs de redirection nécessite d'analyser en détail les trajectoires solaires en fonction de la période de l'année et de la latitude. Les mesures CBDM telles que la Daylight Autonomy (DA) fournissent une évaluation précise des conditions d'éclairage en fonction de la latitude et de leurs variations au cours des jours et des saisons [Reinhart 2006c]. Les performances des solutions étudiées sont comparées sous différents climats. Afin de garantir un apport minimal de lumière du jour tout au long de l'année pour ces espaces de vie sombres, nous proposons une méthode d'évaluation tenant compte de cette faible disponibilité de la lumière du jour.

3.2. Méthode

3.2.1. Les modèles de puits de jour

Géométries

Le puits de jour étudié est représentatif de ceux que l'on retrouve dans les quartiers historiques des villes européennes (Figure 3.1 et 3.2). Avec une section de 3m x 3 m, il s'élève sur quatre étages pour une hauteur totale de 12 m ($WI = 4$). Huit pièces adjacentes réparties sur deux côtés opposés ont accès au puits de jour par des ouvertures de 1m x 1,5 m à travers un mur de 0,25 m d'épaisseur.

Seules les quatre pièces d'un côté sont étudiées. En effet, un des résultats de [Ahadi 2017] montre une variation des performances très faible, voire inexistante, des pièces en fonction de leur orientation. Lorsque la lumière atteint la partie inférieure après plusieurs réflexions, elle pénètre dans les pièces depuis une multitude de directions et l'orientation des espaces adjacents n'a plus d'influence. Ces pièces ont une profondeur de 4 m, une largeur de 3 m et une hauteur de 2,75 m. Les capteurs utilisés pour le calcul des mesures sont répartis à une hauteur de 80 cm au-dessus du sol et sont espacés de 25 cm avec un total de 140 capteurs par pièce.

Un puits de jour avec une section plus étroite de 1.5m x 1.5 m est étudié en section 5.1 (Figure 3.2). Pour garder le même rapport entre les surfaces d'ouverture et la surface des murs du puits de jour, les ouvertures en vis-à-vis sont supprimées. La géométrie du reste du puits de jour est identique : même hauteur, même disposition des pièces intérieurs, etc.

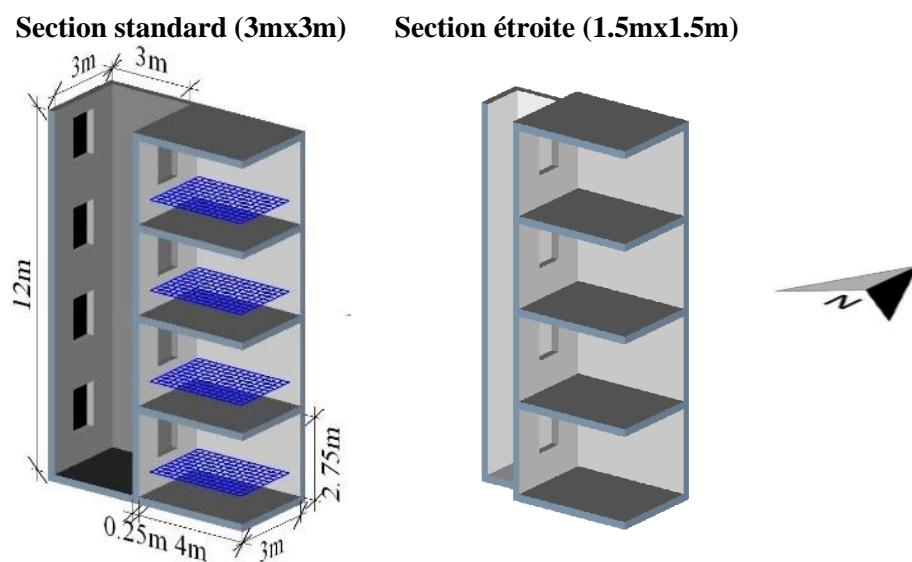


Figure 3.2 : A gauche : la géométrie du puits de jour de section 3mx3m ($WI = 4$) et les 4 pièces adjacentes avec leur grille de capteurs ; à droite : le puits de jour avec une section étroite de 1.5mx1.5m ($WI = 8$).

Matériaux

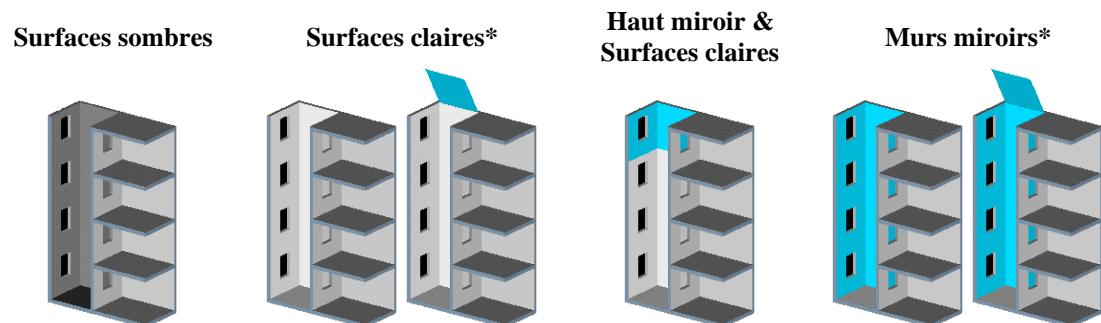
Les propriétés optiques des intérieurs suivent les normes habituelles (Tableau 3.1) : réflectance diffuse de 80 % pour le plafond, 70 % pour les murs et 30 % pour le sol. Les fenêtres sont composées d'un simple vitrage standard avec une réflectance spéculaire de 8 % et une transmittance directe de 88 %. La composition des surfaces adjacentes est la même dans tous les cas présentés.

A l'inverse, nous avons évalué plusieurs scénarios concernant les propriétés des surfaces des puits de jour. Deux variantes de matériaux de sols du puits de jour sont étudiées : un sol sombre avec une réflectance diffuse de 20 % et un sol clair avec une réflectance diffuse de 60 %. Pour les murs, des scénarios sombres et clairs sont également étudiés : la variante sombre correspond à une réflectance diffuse de 50 %, équivalente à un mur gris ou coloré, et la variante claire à une réflectance diffuse de 85 %, équivalente à un mur blanc standard (Figure 3.3).

Des configurations avec présence de miroirs sur les murs ou le sommet du puits de jour sont également étudiées. Les miroirs ont une réflectance spéculaire de 90 %. Ces propriétés optiques sont conformes aux valeurs mesurées habituelles [Di Laura 2011, Jakubiec 2016].

Tableau 3.1 : Caractéristiques des matériaux des surfaces intérieures et des surfaces extérieures pour les différentes configurations étudiées.

Matériaux intérieurs		Matériaux des puits de jour (4 variantes *+ 2 avec le dispositif de redirection)					
(Fixes)		Surfaces sombres	Surfaces claires*	Haut miroir & Surfaces claires	Murs miroirs*		
Plafond	$\rho_d = 80\%$	Murs	$\rho_d = 50\%$	Murs	$\rho_d = 85\%$	Murs	$\rho_r = 90\% \text{ (top)}$ $\rho_d = 85\%$
Murs	$\rho_d = 70\%$	Sol	$\rho_d = 20\%$	Sol	$\rho_d = 60\%$	Sol	$\rho_d = 60\%$
Sols	$\rho_d = 30\%$			<i>Dispo.</i> <i>Redirect.</i>	$\rho_r = 90\%$		<i>Dispo.</i> <i>Redirect.</i>
Fenêtres	$\tau_r = 88\%$ $\rho_r = 8\%$						



*variantes avec le dispositif de redirection

Figure 3.3 : Les 4 variantes étudiées et les 2 supplémentaires avec le dispositif de redirection. Les miroirs sont en bleu ciel.

Dispositif de redirection

En plus des murs réfléchissants diffus et spéculaires, nous proposons un dispositif passif (Figure 3.4) pour rediriger les rayons du soleil vers le fond pendant la partie la plus sombre de l'année. L'objectif est d'obtenir des conditions d'éclairage acceptables pendant un maximum de temps par jour tout au long de l'année.

Un miroir est placé en haut pour rediriger les rayons du soleil vers le bas. Il s'agit d'une surface plane, dont les dimensions sont identiques à la section du puits de jour. Il est conçu pour rediriger autant de lumière que possible vers le midi solaire pendant la moitié de l'hiver. Il est donc orienté vers le sud (dans le cas de l'hémisphère nord), et son inclinaison est déterminée pour rediriger les rayons du soleil dans une direction parfaitement verticale le jour le plus représentatif des trajectoires solaires du semestre d'hiver, c'est-à-dire vers le 10 novembre. Ce jour se situe à mi-chemin entre l'équinoxe d'automne et le solstice d'hiver.

La période d'optimisation proposée peut néanmoins être modifiée en fonction des besoins et des exigences de chaque projet. Des conceptions plus complexes, telles que les formes paraboliques pour la concentration de la lumière, qui ont déjà prouvé leur efficacité pour les applications photovoltaïques et d'éclairage naturel [Xuan 2019, Li 2020] ou les suiveurs solaires, peuvent également être envisagées pour l'optimisation du concept mais ne sont pas étudiées dans ce travail.

La sensibilité des performances du dispositif est étudiée en fonction de ses deux paramètres d'orientation, l'azimut, idéalement orienté vers le sud, et l'élévation, proposée ici pour la position du soleil le 10 novembre au midi solaire.

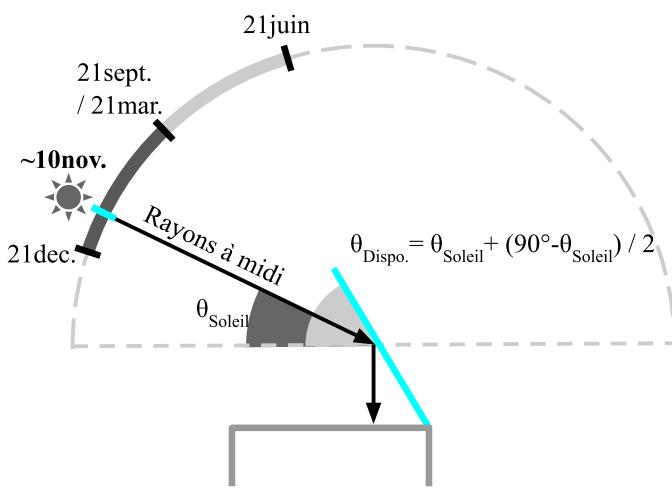


Figure 3.4 : Schéma de principe du dispositif de redirection des rayons du soleil pour la moitié hivernale de l'année.

Climats

Le modèle est d'abord étudié pour le climat de Barcelone (41°). D'autres endroits sont ensuite étudiés : Stockholm (60°), Bilbao (43°), Mexico (19°) et Quito (0°) (Figure 3.5). Barcelone et Bilbao ont quasiment la même latitude, mais Bilbao présente des conditions de ciel beaucoup plus nuageuses. À titre indicatif, l'éclairement normal direct annuel est 50 % plus élevé à Barcelone

qu'à Bilbao (Figure 3.6). De Quito à Stockholm, un intervalle d'environ 20 degrés sépare les latitudes des villes, offrant ainsi des trajectoires solaires très différentes.

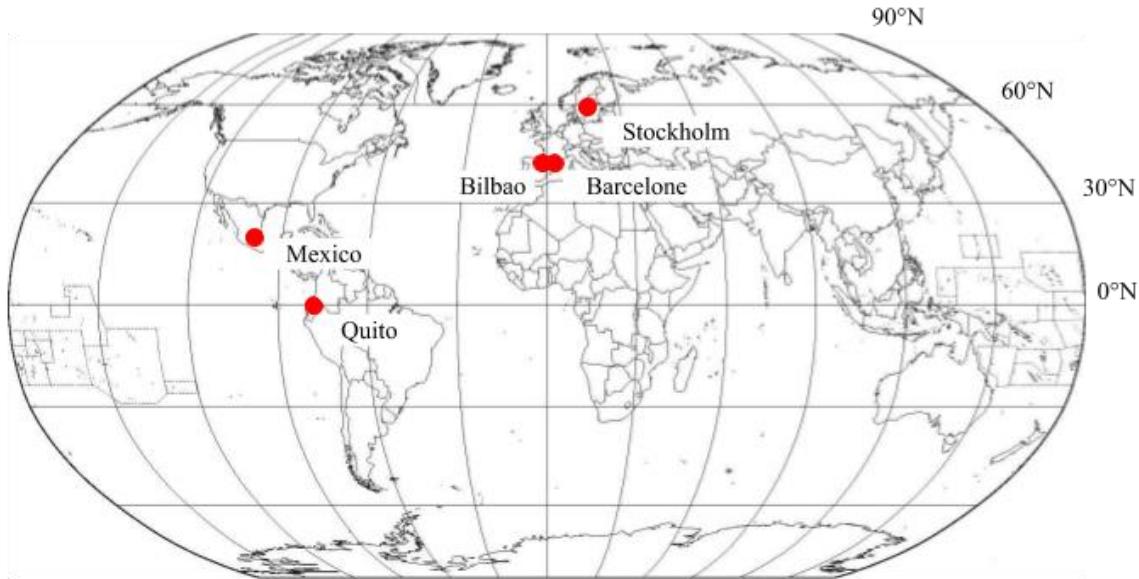


Figure 3.5 : Localisation de Stockholm (60°N), Bilbao (43°N), Barcelone (41°N), Mexico (19°N) et Quito (0°).

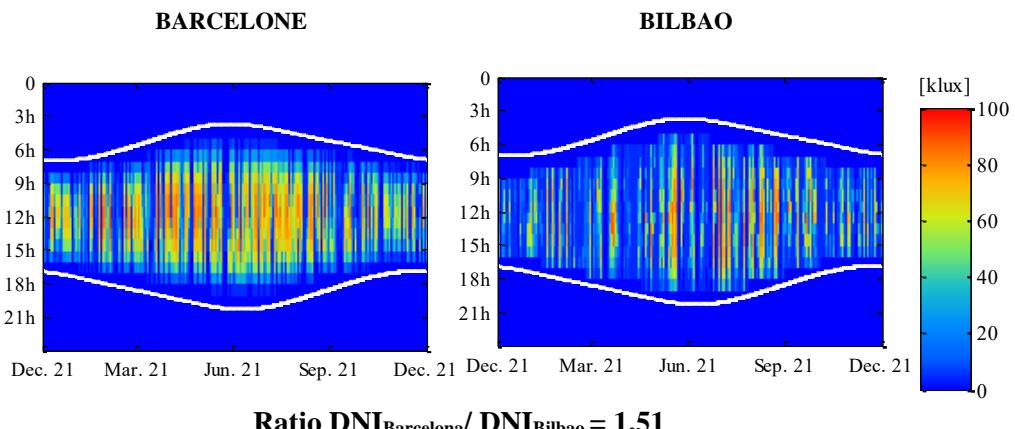


Figure 3.6 : Répartition annuelle des Éclairements Normaux Directes pour Barcelone et Bilbao.

3.2.2. Indicateurs de performance proposés

Les indicateurs dynamiques, dits CBDM présentés dans le chapitre 1, font aujourd’hui partie des méthodes de référence pour quantifier la performance de la lumière du jour dans les espaces intérieurs, et elles sont présentes dans les directives et normes de construction [EN 17037, IESNA 2012]. Elles permettent d’évaluer la lumière du jour sur toute l’année, en tenant compte de la nature dynamique des conditions d’éclairage en fonction du temps, de la saison et du climat pour

tout lieu [Reinhart 2006c, Mardaljevic 2009]. Pour cette étude, nous proposons une évaluation des performances basée sur les mesures suivantes :

- **DA₁₀₀** (et **DA₁₀₀ hiver**) [h / jour] – L'autonomie annuelle en éclairage naturel avec un seuil d'éclairement fixé à 100 lux. DA₁₀₀ est le rapport entre le nombre d'heures avec un éclairement supérieur à 100 lux et le nombre total d'heures par an. Il est calculé pour chaque capteur. Généralement exprimée en pourcentage du temps, cette quantité est rapportée en nombre moyen d'heures par jour pour permettre une meilleure représentation de sa distribution quotidienne. Le DA₁₀₀ hiver est également utilisé. Il représente la DA₁₀₀ mais seulement pour la moitié hivernale de l'année entre les équinoxes du 21 septembre et du 21 mars.
- **BD** [jour / année] – BD (pour Blind Days) est le nombre de jours par an où l'éclairement médian dans une pièce n'atteint pas 100 lux pendant la journée. En d'autres termes, un jour aveugle est un jour où la lumière naturelle n'est pas en mesure de fournir des conditions d'éclairage adéquates à l'intérieur d'une pièce. Avec cet indicateur, ce sont les jours qui sont comptés, et non les heures comme pour le DA. Cette distinction permet d'avoir des informations sur la répartition annuelle des jours où les conditions d'éclairage ne sont pas satisfaisantes.
- **E_{moy}** (et **E_{moy} hiver**) [lux] - Il s'agit de l'éclairement moyen sur l'année (ou pour la moitié hivernale). Comme pour le DA₁₀₀, il est calculé pour chaque capteur et la médiane de la grille des capteurs est utilisée pour indiquer la performance d'une pièce. Contrairement aux deux autres mesures, l'E_{moy} donne une évaluation basée sur les quantités absolues de lumière reçue. Il supprime les biais causés par la notion de seuil d'éclairement. Par exemple, une configuration qui apporte plus de lumière dans une pièce n'affecte pas le DA₁₀₀ si la pièce est déjà suffisamment éclairée ; dans ce cas, l'éclairement moyen enregistre plus précisément la contribution.
- **DA_{max,2000} [%]** - Avec l'utilisation de matériaux réfléchissants et de miroirs, la question de l'éblouissement dû à une quantité excessive de lumière se pose. Cet indicateur supplémentaire permet d'estimer les changements générés par les modifications. Le DA_{max,2000} est une variante du DA proposé ici qui comptabilise le temps où l'éclairement peut être considéré comme trop élevé et causer un inconfort visuel [Reinhart 2006c]. Le seuil d'éclairement perturbateur est choisi à 2000 lux [Nabil 2005].

La pièce du rez-de-chaussée est la moins éclairée, c'est donc celle qui nous préoccupe le plus. La plupart des valeurs des indicateurs présentées dans cette étude s'y réfèrent. Nous avons choisi d'utiliser la valeur médiane des résultats obtenus sur la grille des capteurs pour décrire la performance d'une pièce. La médiane sur le plan de travail permet de donner des informations spatiales : cela signifie que l'indicateur est plus grand dans 50 % de l'espace et plus faible dans l'autre moitié.

Choix du seuil d'éclairement

Un seuil d'éclairement horizontal de 100 lux est utilisé pour cette étude. Nous avons choisi d'utiliser un niveau d'éclairement considéré comme faible au vu des recommandations et normes d'éclairage habituelles qui se situent autour de 300 lux ou plus [EN 17037, IESNA 2012, Reinhart 2011].

En effet, l'objectif est d'améliorer les conditions d'éclairage des espaces de vie sombres où de faibles quantités de lumière supplémentaires sont très appréciées. Par exemple, des niveaux d'éclairage inférieurs à 100 lux, bien en dessous du niveau d'éclairement cible habituel utilisé pour les espaces de travail, peuvent être suffisants dans les salons et les salles à manger [Di Laura 2011].

Dans la définition de l'UDI [Nabil 2005], le seuil de 100 lux est également utilisé comme limite au-dessus de laquelle la lumière naturelle est efficace, soit comme seule source d'éclairage, soit en complément d'un éclairage artificiel.

L'autre raison de ce choix est que les personnes ont tendance à tolérer et à apprécier des niveaux d'éclairement beaucoup plus faibles en lumière naturelle qu'en lumière artificielle [Paule 2015, Jakubiec 2018].

Dans le chapitre 1 section 1.5.3, une revue plus complète des principaux travaux montrant l'intérêt visuel et non-visuel de considérer des niveaux d'éclairement de cet ordre est réalisée. La perception de niveaux de lumière naturelle même faibles dans ces espaces de vie sombres représente un avantage significatif pour le confort et la qualité de vie des habitants, et cela doit être pris en compte lors du processus de conception.

Afin de vérifier que les conclusions de l'étude ne soient pas totalement dépendantes et biaisées par le choix du seuil à 100 lux, les résultats obtenus avec un seuil plus élevé de 200 lux sont également présentés.

3.2.3. La simulation dans le contexte du puits de jour

Pour cette étude, les surfaces de l'environnement bâti sont maillées avec des carreaux de 25 cm x 25 cm, soit un total de 6 512 carreaux sans le dispositif de redirection. Cette petite quantité de carreaux pour l'environnement bâti permet de prendre en compte l'infinité des réflexions diffuses en résolvant le système de manière quasi-instantanée par inversion de matrice.

La voûte céleste est partitionnée en 5 000 tuiles. Les données météorologiques nécessaires pour le modèle All-Weather de [Perez 1993] et le modèle d'efficacité lumineuse de [Perez 1990] sont obtenus à partir des fichiers de données IWEC et SWEC, disponibles au format Energy Plus (.epw) à l'adresse energyplus.net/weather.

Pour le calcul des facteurs de vue, 200 000 rayons sont lancés par carreaux. Le temps de calcul total varie entre 1 minute, dans un puits de jour sans miroir, à 3 minutes dans le cas extrême avec tous les murs miroirs. Le matériel utilisé pour les simulations est un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel i7. Comme le temps de résolution du système de radiosité sous MATLAB® ne prend que 5 secondes, le calcul des facteurs de vue étendus est la partie la plus chronophage.

3.3. Influence des propriétés des surfaces

3.3.1. Propagation de la lumière par réflexions diffuses

Passage à des surfaces claires diffuses

La Figure 3.7 montre la répartition du DA₁₀₀ dans deux configurations de puits de jour avec différentes compositions de parois dont les surfaces sont diffuses. Le premier est composé de murs sombres avec une réflectance diffuse de 50 % et d'un sol avec une réflectance diffuse de 20 %. Le deuxième cas est composé de surfaces claires diffuses avec une réflectance diffuse de 85 % pour les murs et de 60 % pour le sol.

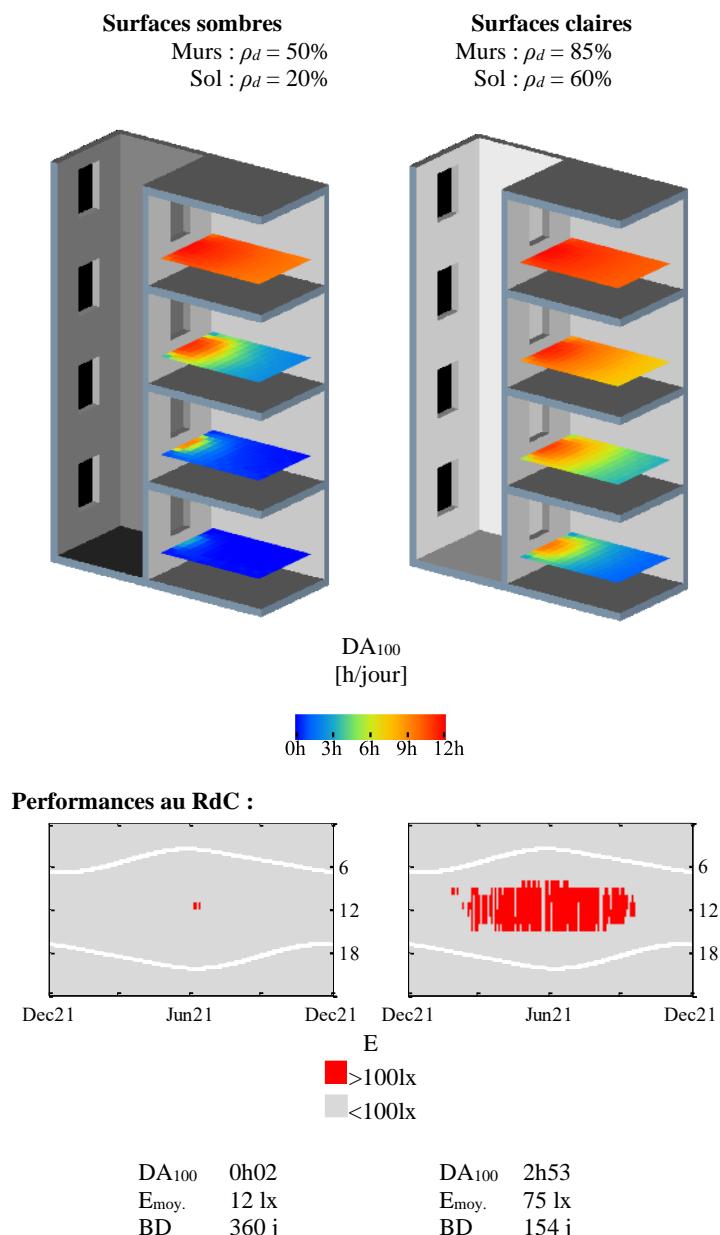


Figure 3.7 : Répartition des DA₁₀₀ dans les différents étages pour les différentes variantes de puits de jour avec des surfaces diffuses. Les performances du rez-de-chaussée sont présentées plus finement pour chaque cas.

La Figure comprend les calendriers des éclairements médians inférieurs ou supérieurs à 100 lux durant toute l'année. Chaque colonne correspond à un jour de l'année, à partir du solstice d'hiver jusqu'au solstice d'hiver. Chaque heure correspond à une ligne.

Dans le puits de jour avec les murs sombres, il y a une disparité importante entre les différents étages. Le dernier étage reçoit une quantité suffisante de lumière avec une durée moyenne de 10 h 35 par jour au-dessus de 100 lux. Dès l'étage juste en-dessous, cette durée tombe à 5 h 04, puis à 0 h 55 au premier étage et enfin à une valeur proche de zéro au rez-de-chaussée. En passant à des surfaces claires diffuses, les performances des étages inférieurs sont considérablement améliorées. Au rez-de-chaussée, la lumière atteint l'intérieur de la pièce par inter-réflexions, ce qui permet d'obtenir des conditions d'éclairage satisfaisantes pendant 2 h 53 par jour en moyenne.

L'indicateur des jours aveugles (BD) et le calendrier des niveaux d'éclairage supérieurs à 100 lux au rez-de-chaussée fournissent des informations sur la répartition annuelle des bonnes conditions d'éclairage. Dans le cas des surfaces sombres, les quelques heures où l'éclairage est supérieur à 100 lux se situent exactement autour du midi solaire et du solstice d'été. Dans le cas des surfaces claires, les heures avec une luminosité supérieure à 100 lux sont plus fréquentes, mais restent également centrées autour du midi solaire et du solstice d'été. Il existe une différence très marquée entre les périodes d'hiver et d'été.

Variations des performances en fonction de la réflectance diffuse des surfaces

Sur la Figure 3.8, chaque courbe représente les DA₁₀₀ et E_{moy} atteints à chaque étage en fonction de la réflectance diffuse des murs. La réflectance diffuse du sol est considérée constante et égale à 60 %. Les DA₁₀₀ de l'étage supérieur sont insensibles à la réflectance des murs car la plupart de la lumière provient directement du ciel ou du soleil. Cette lumière est suffisante pour produire un éclairage de plus de 100 lux à presque tous les moments de la journée.

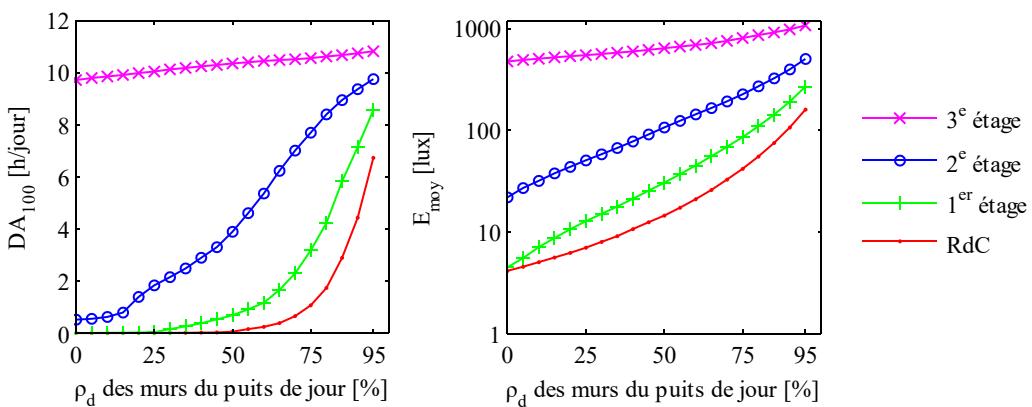


Figure 3.8 : Impact de la réflectance diffuse des murs du puits de jour sur les DA₁₀₀ (gauche) et sur l'éclairage moyen annuel (droite). La réflectance du sol du puits de jour est constante et égale à 60%.

Comme mentionné ci-dessus, le facteur de vue du ciel diminue considérablement dans les étages inférieurs, où la lumière réfléchie est prédominante. La forme des courbes des étages inférieurs illustre la forte influence de la réflectance des parois des puits de jour. Au rez-de-chaussée, le DA₁₀₀ est nul pour une réflectance de 0 à 50 % et croît ensuite de manière exponentielle. En

augmentant la réflectance de 10 %, de 75 % à 85 %, on triple le DA₁₀₀ au rez-de-chaussée (de 1 h à 2 h 53 par jour).

Les mêmes observations sont valables pour les courbes d'éclairement moyen. L'éclairement annuel moyen passe de 42 lux à 75 lux, avec la même légère augmentation de 10 % sur la réflectance des murs. Ces résultats soulignent également la nécessité d'utiliser les valeurs de réflectance les plus précises possibles à partir des données des constructeurs ou de mesures précises.

3.3.2. Propagation de la lumière par réflexions spéculaires

À partir de la configuration comportant des surfaces diffuses claires, des miroirs ont été ajoutés sur les murs. Les deux cas présentés à la Figure 3.9 comportent des matériaux de mur réfléchissant de manière spéculaire.

Quart supérieur des murs miroirs

Pour le premier des deux cas, le quart supérieur des murs est recouvert de miroir. Les miroirs ont été placés volontairement en partie supérieure du puits de jour, car il s'agit de la partie des murs la plus importante. En effet, pour parvenir au fond du puits de jour, le flux lumineux est contraint de passer par le haut. Ce sont ces premières surfaces que la lumière a alors la plus grande chance de rencontrer. En couvrant ces surfaces de miroirs, la direction de réflexion du flux lumineux direct provenant du ciel ou du Soleil se produit uniquement vers l'intérieur du puits de jour. Avec des surfaces réfléchissant de manière diffuse, une partie importante de ce flux lumineux réfléchi est renvoyée à l'extérieur du puits de jour.

Avec seulement le quart supérieur recouvert de miroirs, on observe une amélioration considérable de tous les indicateurs. Les jours aveugles sont considérablement réduits, passant de 154 à 33 jours, le DA₁₀₀ et le E_{moy} sont doublés.

Totalité des murs miroirs

Pour le deuxième cas de la Figure 3.9, la totalité des murs du puits de jour est couverte de miroirs. Dans cette configuration, le flux lumineux entrant est assuré d'être réfléchi dans la direction verticale depuis la partie supérieure vers le fond du puits de jour.

Si l'on compare cette configuration au cas avec celle comportant les surfaces diffuses claires, les indicateurs changent d'ordre de grandeur : pour la pièce du rez-de-chaussée, il n'y a plus aucun jour aveugle durant l'année, les DA₁₀₀ sont supérieurs à 9h par jour contre moins de 3h par jour dans le cas avec des surfaces diffuses claires et l'éclairement moyen passe de 75 lux à 343 lux. Les écarts de condition d'éclairement entre les étages supérieurs et les étages inférieurs sont considérablement diminués.

Ces résultats obtenus par la mise en place de miroirs dans le puits de jour mettent une nouvelle fois en relief le fort potentiel d'amélioration que constitue la modification des caractéristiques des surfaces. L'apport de surfaces permettant des réflexions spéculaires permettent d'améliorer considérablement les niveaux d'éclairement perçus aux étages les plus sombres. Les surfaces spéculaires disposent d'un net avantage sur les matériaux diffus.

Pour différentes raisons, la mise en place de ce type de surface n'est pas toujours envisageable : coût d'installation, contraintes architecturales... À noter que même si des quantités suffisantes de lumière parviennent aux étages les plus bas durant la période hivernale, un net déséquilibre des quantités de lumière perçue est également observé entre les différentes saisons comme c'est le cas pour les configurations avec des surfaces diffuses.

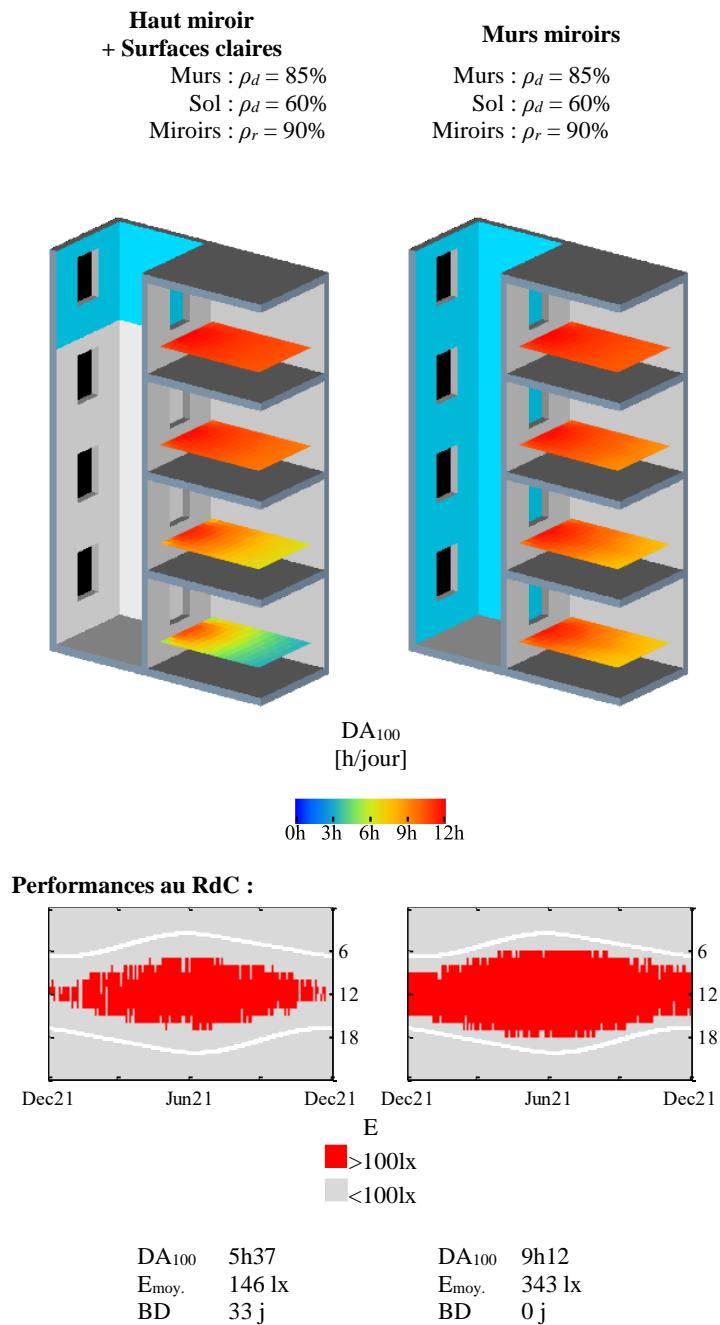


Figure 3.9 : Répartition des DA₁₀₀ dans les différents étages et détails des performances du rez-de-chaussée pour les différentes variantes de puits de jour avec des murs miroirs.

Visualisation du flux de lumière dans le puits de jour

La Figure 3.10 représente les éclairements obtenus dans la totalité de la scène lors d'une journée ensoleillée de novembre à midi. Les rayons du soleil viennent heurter la partie supérieure du mur du puits de jour orienté vers le Sud. Les inter-réflexions spéculaires sont nettement visibles dans la configuration des murs miroirs.

Concernant les différences d'éclairements reçus dans les espaces intérieurs, une remarque peut être faite concernant les étages supérieurs. Lorsque la lumière du soleil est réfléchie de manière diffuse dans toutes les directions, une partie pénètre à chaque fois dans les espaces intérieurs des étages supérieurs peu importe la direction des rayons du soleil. Lorsque la lumière du soleil est réfléchie de manière spéculaire, il faut que les ouvertures se situent dans la direction de réflexion pour que cette lumière parvienne dans les espaces intérieurs. Si ce n'est pas le cas, la lumière du soleil est redirigée plus bas et contribue à l'éclairage des espaces inférieurs. C'est la raison pour laquelle les étages supérieurs reçoivent moins de lumière avec les murs miroirs dans le cas présenté.

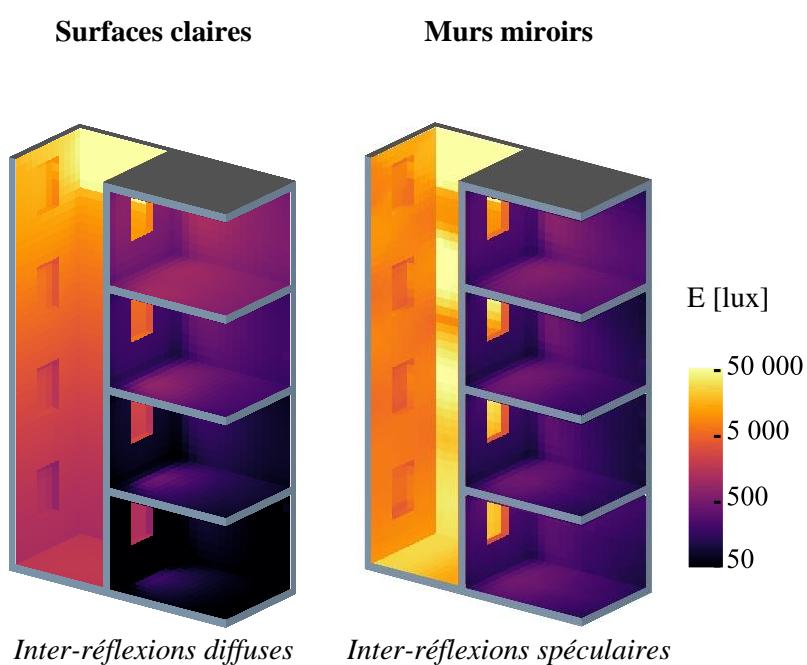


Figure 3.10 : Éclairements reçus au midi solaire, un jour ensoleillé de novembre. À gauche : surfaces diffuses claires ; à droite : murs miroirs.

Problèmes de surplus de lumière en partie supérieure

Avec des miroirs et des matériaux réfléchissants, le problème de l'éblouissement dû à des quantités excessives de lumière se pose. Dans la figure 3.11, les risques d'éblouissement selon l'indicateur $DA_{max,2000}$ sont comparés dans trois cas : le puits de jour avec des surfaces sombres diffuses, avec des surfaces claires diffuses et avec des murs miroir. Au dernier étage, niveau le

plus touché puisqu'il est le plus exposé, les valeurs du $DA_{max,2000}$ sont très faibles dans les 3 cas. Le passage à des miroirs ou à des murs réfléchissants blancs n'augmente que légèrement le risque d'éblouissement par rapport aux murs sombres. Dans les étages inférieurs, le passage aux miroirs n'a qu'un faible impact dans la zone très proche des ouvertures. À ces étages, le $DA_{max,2000}$ n'est même pas la moitié du niveau du dernier étage sans miroirs.

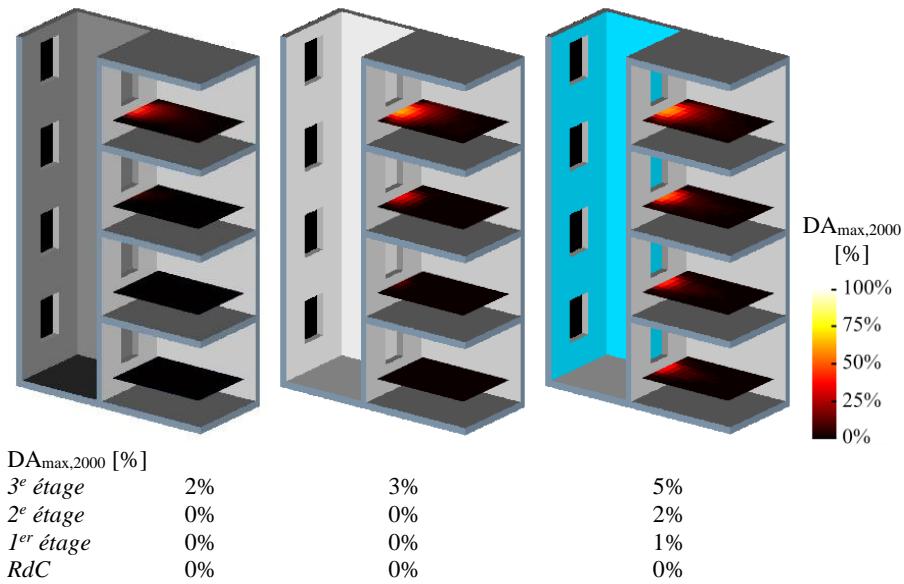
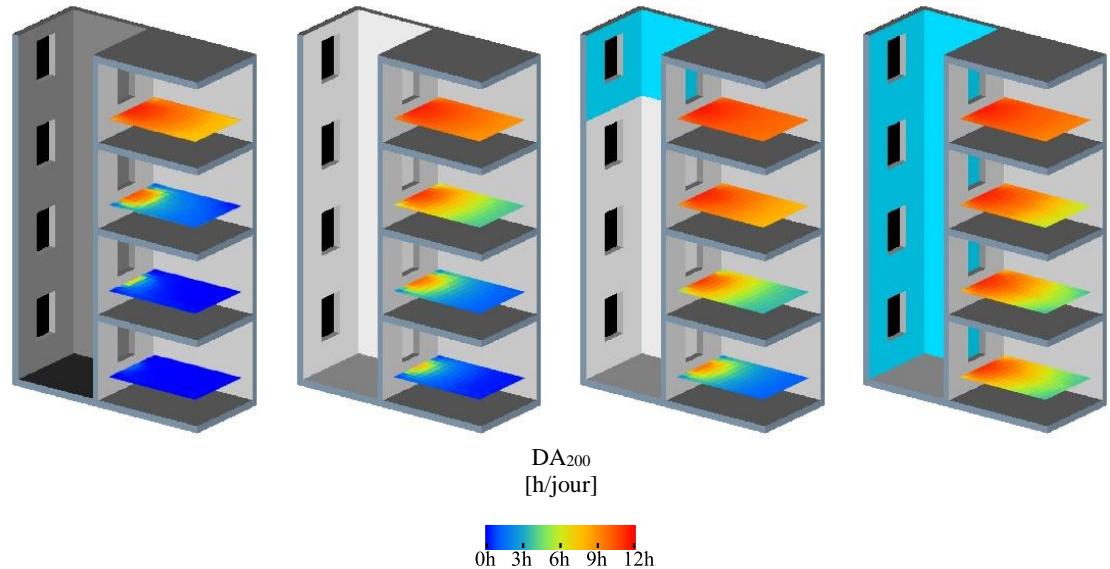


Figure 3.11 : Répartition des $DA_{max,2000}$ dans trois configurations : à gauche, surfaces sombres diffuses ; au milieu, surfaces claires diffuses ; à droite, murs miroir.

3.3.3. Avec un seuil d'éclairement plus élevé de 200 lux

Nous avons effectué les mêmes calculs d'indicateurs avec un seuil de 200 lux plus proche des standards habituels. Le but est de s'assurer qu'un choix différent de seuil ne conduise pas à des observations générales différentes. La Figure 3.12 est similaire aux Figures 3.7 et 3.9 mais avec un seuil de 200 lux. Logiquement, les résultats en DA sont inférieurs et le nombre de jours aveugles est supérieur avec ce nouveau seuil. Toutefois, les progressions observées sur les indicateurs dans les différents cas restent relativement similaires. Cela confirme les conclusions et la validité générale des observations faites avec le seuil de 100 lux et renforce ce choix d'utilisation.

Surfaces sombres	Surfaces claires	Haut miroir + Surfaces claires	Murs miroirs
Murs : $\rho_d = 50\%$ Sol : $\rho_d = 20\%$	Murs : $\rho_d = 85\%$ Sol : $\rho_d = 60\%$	Murs : $\rho_d = 85\%$ Sol : $\rho_d = 60\%$ Miroirs : $\rho_r = 90\%$	Sol : $\rho_d = 60\%$ Miroirs : $\rho_r = 90\%$



Performances au RdC :

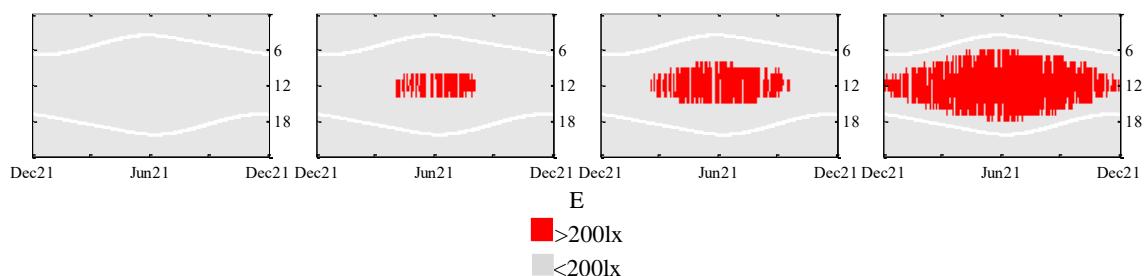


Figure 3.12 : Répartition des DA₂₀₀ dans les différents étages et détails des performances du rez-de-chaussée pour les différentes variantes de puits de jour avec un seuil de 200 lux.

3.4. Performances des systèmes de redirection des rayons du soleil

3.4.1. Amélioration des conditions d'éclairement en hiver

Constat

En modifiant les caractéristiques des parois du puits de jour, ses performances peuvent être considérablement améliorées, mais d'importantes disparités saisonnières subsistent. En raison des trajectoires solaires et des conditions du ciel dans le cycle annuel, la distribution de conditions d'éclairage satisfaisantes est centrée sur le solstice d'été alors que la période hivernale reste la moins bien desservie. L'éclairement médian peut ne pas atteindre 100 lux pendant plusieurs jours consécutifs au cours de cette période.

Visualisation du flux solaire avec le dispositif de redirection

La Figure 3.13 illustre l'effet du dispositif de redirection sur les éclairements instantanés lors d'une journée ensoleillée proche du 10 novembre au midi solaire. La tache solaire qui est redirigée vers le sol du puits de jour est parfaitement visible à ce moment.

L'ajout du dispositif augmente considérablement la quantité de lumière perçue dans les zones inférieures. Des niveaux d'éclairage d'environ 500 lux et plus sont atteints au rez-de-chaussée. Ces niveaux d'éclairage intérieur sont plus élevés qu'avec la configuration avec les murs miroirs (Figure 3.10). La différence entre les parties inférieure et supérieure est réduite. Les conditions d'éclairage au dernier étage ne sont que très légèrement modifiées.

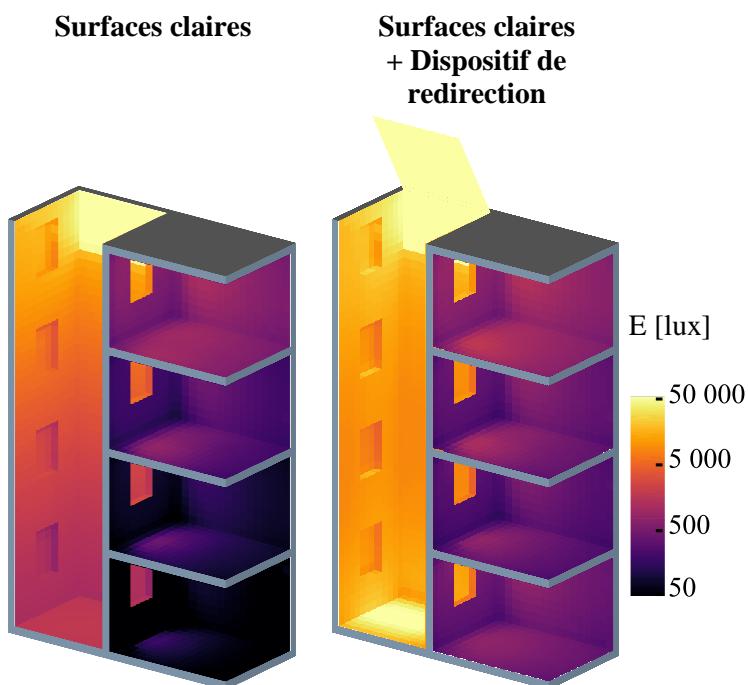


Figure 3.13 : Éclairements reçus au midi solaire, un jour ensoleillé de novembre. À gauche : surfaces diffuses claires ; à droite : surfaces diffuses claires plus dispositif de redirection.

Moitié hivernale de l'année

La Figure 3.14 donne des informations sur la capacité du dispositif de redirection du dispositif à fournir de bonnes conditions d'éclairage pendant toute l'année. Le DA₁₀₀ et l'E_{moy} de la Figure 3.14 sont obtenus pendant toute l'année et également pendant la moitié hivernale. Pendant la période hivernale, le dispositif de redirection joue un rôle décisif dans la pièce du rez-de-chaussée. Il permet de passer de 0 h 40 à 3 h 30 par jour avec un éclairement de plus de 100 lux.

La carte représentant la répartition des heures avec des niveaux d'éclairage supérieurs à 100 lux montre que presque tous les jours de l'année ont maintenant des conditions d'éclairage adéquates. Cette répartition annuelle plus uniforme des conditions d'éclairage est également illustrée par la diminution du nombre de jours sans visibilité, qui est passé de 154 à 42 jours.

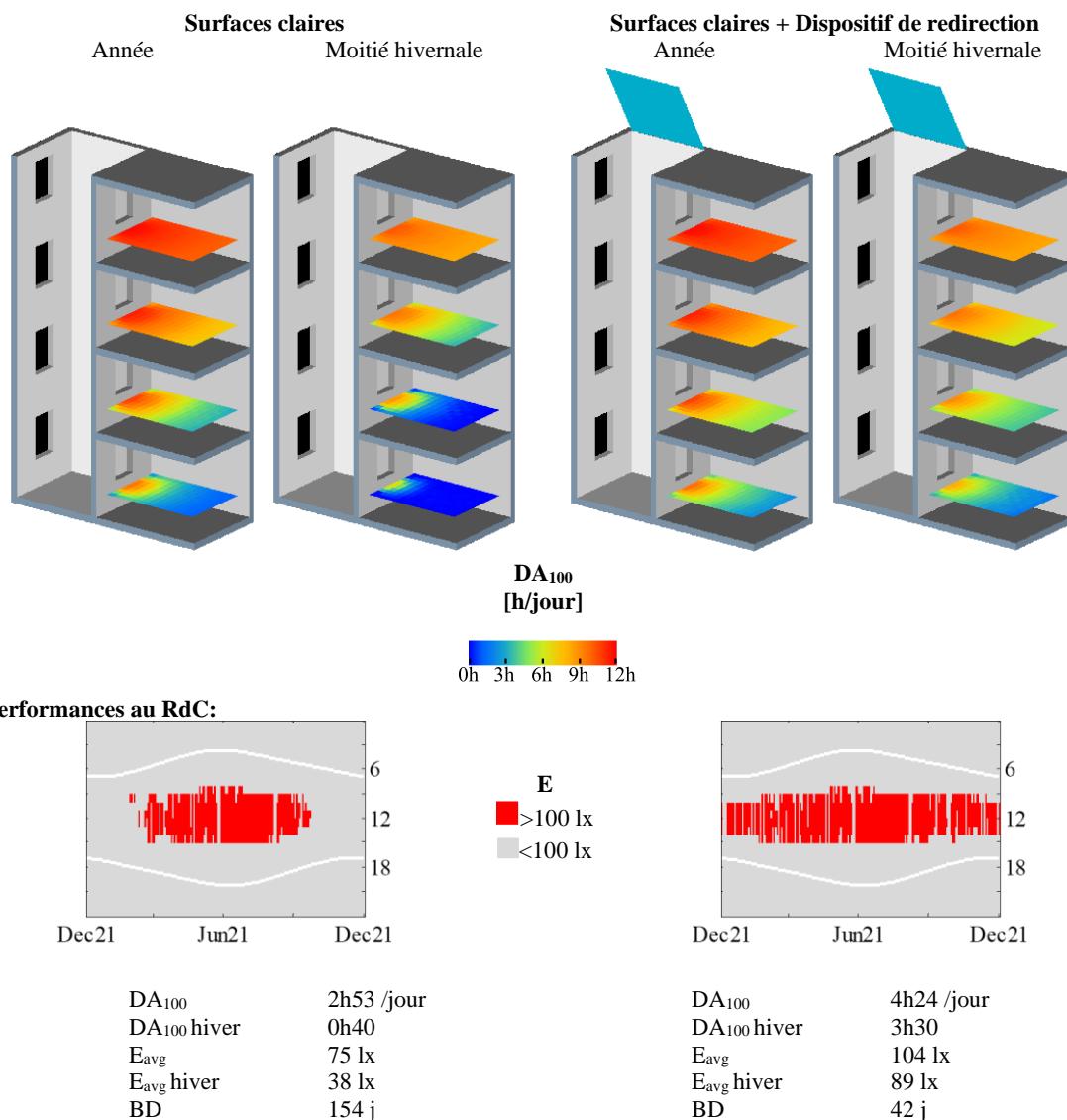


Figure 3.14 Distribution de DA₁₀₀ et détails des performances au rez-de-chaussée pendant l'année et pendant la moitié hivernale. Les deux cas comportent des surfaces claires diffuses. À droite, le dispositif de redirection est inclus.

Il est important de noter que le dispositif n'augmente pas la quantité de lumière reçue pendant le semestre d'été, car il agit alors comme un masque pour les rayons du soleil. Entre le 21 avril et le 21 août, l'altitude du soleil est supérieure à 61° (angle d'élévation de l'appareil). Il permet donc de limiter les apports indésirables de lumière et de chaleur pendant la période estivale. Cette ombre diminue la quantité de lumière reçue, mais la lumière du ciel est déjà suffisante à cette période pour atteindre des niveaux d'éclairement adéquats.

Les simulations ont montré de très faibles variations de $DA_{max,2000}$ à tous les étages avec l'ajout du dispositif de redirection. La lumière supplémentaire fournie par le dispositif est trop faible pour dépasser le seuil de 2000 lux dans les étages inférieurs. Les variations occasionnelles du $DA_{max,2000}$ concernent principalement l'espace très proche des fenêtres et le dernier étage où les rayons du soleil sont redirigés dans la pièce seulement quelques heures dans l'année.

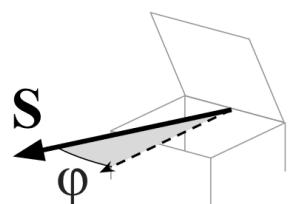
3.4.2. Etude de sensibilité des paramètres d'orientation du dispositif

Les Tableaux 3.2 et 3.3 montrent les performances du dispositif en fonction des deux paramètres d'orientation : l'azimut, idéalement orienté vers le sud, et l'élévation, idéalement considérée à 61° selon le système de conception proposé. L'évaluation est basée sur le DA_{100} et l' E_{moy} en hiver, et sur le nombre annuel de jours sans visibilité.

Angle azimutal

Le Tableau 3.2 concerne l'angle azimutal. Il présente les performances de six configurations avec une différence d'azimut de $+ 10^\circ$ entre chacune d'elles, allant d'une orientation Sud parfaite ($+ 0^\circ$) à une orientation Sud-Est ($+ 50^\circ$). Les différences de performances du dispositif sont faibles jusqu'à un angle de 40° , puis commencent à diminuer sensiblement à partir de 50° . Les résultats montrent que l'azimut ne joue pas un rôle significatif dans les performances du dispositif. En effet, la hauteur du soleil en hiver reste la majeure partie de la journée très proche du maximum journalier. Cependant, une autre orientation de l'appareil modifie le moment où l'appareil prend effet.

Tableau 3.2 : Influence de l'orientation par rapport au Sud sur les performances du dispositif dans un puits de jour avec des surfaces claires.



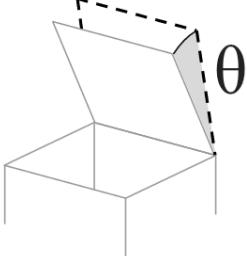
AZIMUT ϕ	0°	10°	20°	30°	40°	50°
DA₁₀₀ hiver [h/jour] 21 septembre – 21 mars	3h30	3h30	3h30	3h23	3h16	2h45
E_{moy} hiver [lx] 21 septembre – 21 mars	89 lx	89 lx	88 lx	85 lx	81 lx	72 lx
BD [j/an]	42 j	42 j	42 j	44 j	45 j	51 j

Angle d'élévation

Le Tableau 3.3 concerne l'angle d'élévation. Il présente les performances des configurations avec des décalages de 5° et 10° dans les deux directions. De faibles changements de performances sont enregistrés avec une position du dispositif plus verticale. En effet, bien que la lumière du soleil ne soit pas redirigée de manière optimale vers le fond du puits de jour, elle est néanmoins redirigée vers les murs, qui diffusent ensuite la lumière.

Cependant, l'inclinaison de l'appareil dans une position plus horizontale a un effet négatif sur les performances. En effet, une grande partie du ciel est cachée dans une position plus horizontale. Le soleil est la source de lumière dont nous voulons bénéficier, mais ce n'est pas la seule. Le ciel joue également un rôle précieux dans l'illumination générale du puits de jour. Une trop grande inclinaison du dispositif limite le facteur de vue du ciel depuis les surfaces du puits de jour et entraîne des niveaux d'éclairement plus faibles.

Tableau 3.3 : Influence de l'angle d'élévation du dispositif sur les performances dans un puits de jour avec des surfaces claires.



ELEVATION θ	-10°	-5°	0°	5°	10°
DA100 hiver [h/jour] 21 septembre – 21 mars	2h50	3h25	3h30	3h29	3h29
E_{moy.} hiver [lx] 21 septembre – 21 mars	57 lx	72 lx	89 lx	90 lx	86 lx
BD [j/an]	59 j	44 j	42 j	42 j	39 j

Choisir un seuil d'éclairement différent peut conduire à une orientation optimale différente du dispositif. La Figure 3.15 montre la répartition des heures avec des éclairements supérieurs à 200 lux. Dans la configuration sans dispositif, la période aveugle s'étend au-delà des équinoxes. Avec l'orientation suggérée ($+0^\circ$), les deux périodes d'inter-saison autour du 21 mars et du 21 septembre disposent d'un éclairement qui n'atteint pas le seuil objectif de 200 lux. La mise en place du dispositif dans une position plus verticale ($+5^\circ$ et $+10^\circ$) permet d'obtenir de meilleures performances annuelles. En fait, cela revient à étendre la période hivernale d'optimisation au-delà des équinoxes.



Figure 3.15 : Performances au rez-de-chaussée avec différents angles d’élévation du dispositif. Le seuil est de 200 lux.

3.5. Variations avec différentes géométries et sous différents climats

Les résultats des sections précédentes ont permis de montrer le fort potentiel que représentent la modification des compositions des surfaces et la mise en place d'un dispositif de redirection des rayons du Soleil. Les performances évoquées sont évidemment relatives aux paramètres du cas étudié et plus précisément à deux facteurs importants : la forme du puits de jour et le climat auquel il est soumis. Deux puits de jour identiques sous des conditions climatiques distinctes peuvent nécessiter des interventions totalement différentes pour atteindre un niveau de performance équivalent. Le même raisonnement s'applique aussi à deux puits de jour situés dans la même ville mais avec des dimensions différentes. Les deux sections suivantes donnent des informations sur la sensibilité des résultats par rapport aux paramètres géométriques et climatiques.

3.5.1. Section étroite

Dans les Tableaux 3.4 et 3.5, l'apport du dispositif de redirection durant la moitié hivernale est étudié dans des configurations avec des murs diffus clairs et des murs miroirs pour deux sections différentes de puits de jour. Les dimensions du puits de jour du Tableau 3.4 sont identiques à celui présenté depuis le début c'est-à-dire avec une section de 3 m x 3 m, soit un rapport WI égal à 4. Le puits de jour du Tableau 3.5 possède une forme plus élancée avec une hauteur identique mais une section plus petite de 1.5 m x 1.5 m, soit un rapport WI égal à 8.

Tableau 3.4 : Performances au rez-de-chaussée durant la moitié hivernale avec et sans dispositif de redirection dans deux puits de jour, l'un diffus clair et l'autre composé de miroirs. Section 3 x 3m ; WI = 4.

WI = 4	Surfaces Claires	+ Dispositif	GAIN	Murs Miroirs	+ Dispositif	GAIN
DA₁₀₀ hiver [h/jour] <i>21 septembre – 21 mars</i>	0h40	3h30	+2h50	7h17	7h29	+0h11
E_{moy.} hiver [lx] <i>21 septembre – 21 mars</i>	38 lx	89 lx	+51 lx	172 lx	246 lx	+74 lx
Jours Aveugles [j/an]	154 j	42 j	+112 j	0 j	1 j	-1j

Tableau 3.5 : Performances au rez-de-chaussée durant la moitié hivernale avec et sans dispositif de redirection dans deux puits de jour, l'un diffus clair et l'autre composé de miroirs. Section 1.5x1.5m ; WI = 8.

	WI = 8	Surfaces Claires + Dispositif	GAIN	Murs Miroirs + Dispositif	GAIN
DA₁₀₀ hiver [h/jour] <i>21 septembre – 21 mars</i>	0h00	0h40	+0h40	2h17	4h23
E_{moy.} hiver [lx] <i>21 septembre – 21 mars</i>	7 lx	22 lx	+15 lx	58 lx	109 lx
Jours Aveugles [j/an]	365 j	280 j	+85 j	73 j	31 j
					+42j

Comme cela a été montré pour le plus grand puits de jour (WI = 4), le bénéfice créé par l'ajout du dispositif dans la configuration avec des parois diffuses claires est conséquent. Dans la configuration avec des murs composés de miroirs, l'apport du dispositif est discutable si l'on se fie au DA₁₀₀ et au nombre de jours aveugles, car des niveaux d'éclairement déjà importants sont atteints tout au long de l'année. On peut tout de même noter l'effet du dispositif sur l'éclairement moyen qui, lui, est bel et bien augmenté.

Dans le puits de jour de section plus faible, l'utilisation de parois diffuses claires ne permet pas d'atteindre des conditions d'éclairement suffisantes durant une durée significative sans et avec le dispositif de redirection. Plus le puits de jour est étroit et plus le recours à des surfaces réfléchissant de manière spéculaire est essentiel pour atteindre des niveaux de performance corrects dans les parties inférieures. Dans cette configuration géométrique plus contraignante, la combinaison des murs miroirs et du dispositif de redirection montre un intérêt bien plus marqué. La mise en place du dispositif de redirection permet notamment de doubler les DA₁₀₀ et l'éclairement moyen durant la moitié hivernale.

3.5.2. Latitude et couvert nuageux

Dans le Tableau 3.6, la configuration sélectionnée des puits de jour précédemment analysés dans les conditions climatiques de Barcelone est maintenant étudiée dans différentes villes : Stockholm, Bilbao, Mexico et Quito.

Couvert Nuageux

À latitude équivalente, une couverture nuageuse plus prononcée réduit uniformément tous les indicateurs de performance pour tous les puits de jour étudiées. Pour toutes les configurations, l'éclairement annuel moyen est 20 % plus élevé à Barcelone qu'à Bilbao. Il est intéressant de voir que le dispositif de redirection reste très efficace à Bilbao malgré des conditions plus nuageuses. Pour les murs diffusant la lumière, pendant le semestre d'hiver, l'E_{moy} est plus que doublé grâce au dispositif, tant à Bilbao qu'à Barcelone.

Cependant, si nous fixons un objectif de 3 heures par jour de DA₁₀₀ pendant la période hivernale et un maximum de 1/6ème de jours aveugles par an, les recommandations sont différentes pour ces deux villes. À Barcelone, ces deux objectifs sont atteints grâce à des surfaces de lumière diffuse et à l'installation d'un dispositif de redirection. À Bilbao, ces mêmes dispositions ne sont pas suffisantes et l'utilisation de miroirs sur les murs est alors nécessaire.

Tableau 3.6 : Performances de différentes configurations de puits de jour à Stockholm, Bilbao, Barcelone, Mexico, and Quito.

		Surfaces Sombres	Surfaces Claires	+ Dispositif	Murs Miroirs	+ Dispositif
DA₁₀₀ [h/jour] RdC	<i>Stockholm 59°N</i>	0h00	1h22	2h49	6h45	7h04
	<i>Bilbao 43°N</i>	0h00	1h51	3h12	7h56	7h58
	<i>Barcelone 41°N</i>	0h02	2h53	4h24	9h12	9h11
	<i>Mexico 19°N</i>	0h45	5h03	5h54	10h01	10h00
	<i>Quito 0°</i>	0h22	4h54	-	9h52	-
DA₁₀₀ hiver [h/jour] RdC	<i>Stockholm 59°N</i>	0h00	0h00	1h54	2h04	3h10
	<i>Bilbao 43°N</i>	0h00	0h11	2h21	5h35	6h06
	<i>Barcelone 41°N</i>	0h00	0h40	3h30	7h17	7h29
	<i>Mexico 19°N</i>	0h02	3h54	5h35	9h21	9h22
	<i>Quito 0°</i>	0h17	4h43	-	9h47	-
E_{avg} [lux] RdC	<i>Stockholm 59°N</i>	7 lx	42 lx	62 lx	245 lx	268 lx
	<i>Bilbao 43°N</i>	9 lx	61 lx	86 lx	291 lx	306 lx
	<i>Barcelone 41°N</i>	12 lx	75 lx	104 lx	343 lx	356 lx
	<i>Mexico 19°N</i>	26 lx	134 lx	148 lx	449 lx	453 lx
	<i>Quito 0°</i>	21 lx	119 lx	-	432 lx	-
E_{avg} hiver [lux] RdC	<i>Stockholm 59°N</i>	3 lx	17 lx	49 lx	67 lx	113 lx
	<i>Bilbao 43°N</i>	5 lx	31 lx	69 lx	139 lx	199 lx
	<i>Barcelone 41°N</i>	7 lx	43 lx	101 lx	194 lx	278 lx
	<i>Mexico 19°N</i>	12 lx	82 lx	124 lx	364 lx	371 lx
	<i>Quito 0°</i>	20 lx	113 lx	-	404 lx	-
BD [jours/an] RdC	<i>Stockholm 59°N</i>	365 j	253 j	113 j	104 j	59 j
	<i>Bilbao 43°N</i>	365 j	204 j	92 j	22 j	21 j
	<i>Barcelone 41°N</i>	360 j	154 j	42 j	0 j	1 j
	<i>Mexico 19°N</i>	236 j	2 j	0 j	0 j	0 j
	<i>Quito 0°</i>	297 j	5 j	-	0 d	-
DA_{max,2000} [%] Dernier étage	<i>Stockholm 59°N</i>	2%	3%	3%	4%	3%
	<i>Bilbao 43°N</i>	2%	3%	4%	4%	3%
	<i>Barcelone 41°N</i>	2%	3%	5%	5%	4%
	<i>Mexico 19°N</i>	2%	4%	5%	5%	4%
	<i>Quito 0°</i>	2%	3%	-	5%	-

Latitude

En ce qui concerne la latitude, il existe des différences significatives entre les performances d'un même puits de jour situé à Stockholm ou à Quito, tant sur les quantités absolues de lumière reçue que sur la répartition quotidienne et annuelle des éclairements satisfaisants. À Mexico et à Quito, la simple application de surfaces lumineuses diffuses permet d'atteindre facilement le double

objectif proposé précédemment. À Stockholm, l'utilisation de murs miroir et de dispositifs de redirection est incontournable pour atteindre ces objectifs. La cause principale est la différence des trajectoires solaires.

Sous les latitudes tropicales (Quito et Mexico), les rayons du soleil atteignent les parties inférieures des murs de lumière tout au long de l'année grâce à des trajectoires solaires très verticales. Aux latitudes plus hautes (Stockholm), la propagation de la lumière par inter-réflexion entre les murs est beaucoup plus longue et plus difficile, car les rayons du soleil atteignent l'intérieur du puits de jour à des positions plus élevées et avec des trajectoires très horizontales.

Concernant la question de l'excès de lumière indésirable, la fréquence de l'éclairement supérieur à 2000 lux à l'étage supérieur reste faible et ne présente que de légères différences entre les 5 climats et également pour toutes les configurations étudiées. Ces résultats permettent de conclure que l'utilisation de matériaux réfléchissants n'a que peu d'influence sur le risque d'inconfort visuel et thermique. En revanche, des différences plus notables sont observées entre les différentes villes sur la base de l'éclairement annuel moyen, même s'il atteint très rarement des niveaux critiques. Dans le cas du puits de jour avec des surfaces lumineuses diffuses, l'éclairement annuel moyen de la ville de Mexico est plus de deux fois supérieur à celui de Bilbao, et le passage aux murs en miroir augmente les niveaux d'éclairement d'un facteur 4 pour tous les climats.

Dans ces villes situées en zones tropicales, les conditions climatiques sont plus contraignantes pour le maintien du confort thermique et les apports solaires supplémentaires créés par l'utilisation de matériaux réfléchissants peut devenir pénalisant. Pour identifier ces éventuels risques de surchauffe dans les climats chauds, une étude thermique complète est nécessaire, impliquant un calcul précis des apports solaires et de la ventilation naturelle par des simulations CFD, ce qui est essentiel dans ce type d'environnement architectural [Muhsin 2017].

3.6. Validation et comparaison des résultats avec RADIANCE

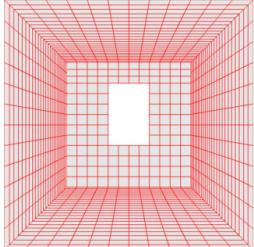
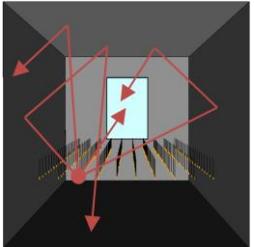
3.6.1. Présentation des hypothèses de calcul pour les deux méthodes

Rappel des modèles numériques

Dans l'approche par lancer de rayons utilisée dans RADIANCE, plus précisément par path-tracing avec Monte Carlo dans sa commande *rfluxmtx*, un grand nombre de rayons sont lancés à partir de chaque capteur pour trouver le chemin menant aux sources de lumière, soit directement, soit après réflexions et transmissions. À partir de ces trajets, on obtient l'impact des sources de lumière sur l'éclairement des capteurs ou, plus précisément, les « *daylight coefficients* » dans le cas d'un calcul annuel de l'éclairage naturel [Tregenza 1983, Mardaljevic 2000, Reinhart 2001]. Cette méthode robuste et flexible a l'avantage de prendre en compte tout type de réflexion ou de transmission. Cependant, elle présente quelques faiblesses pour des applications spécifiques, telles qu'ici avec les puits de jour, où l'accès de la lumière jusqu'aux zones d'intérêt est difficile. Dans ce cas, un grand nombre de réflexions doit être pris en compte pour obtenir un résultat final correct. De plus, les rayons émis pour le calcul de l'éclairement d'un capteur ne sont utiles que pour ce capteur et ne peuvent être réutilisés pour d'autres.

La radiosité, méthode développée dans cette thèse, traite le problème selon une approche de style éléments finis : l'environnement est discrétement en éléments de surface, et un système d'équations linéaires reliant les éclairements de chacun de ces éléments est établi. La solution de ce système donne directement les éclairements pour l'ensemble de la scène. Dans le cas des puits de jour, le grand avantage de cette méthode est qu'elle prend en compte l'infinie de réflexions diffuses en peu de temps. Elle donne aux utilisateurs la possibilité d'évaluer confortablement une multitude de configurations. Le point faible de cette méthode, dans sa formulation originale, est qu'elle ne peut prendre en compte que des modèles de réflexion ou de transmission parfaitement diffus. Cependant, les facteurs de vue étendus proposés par [Sillion 1989] permet d'étendre son utilisation à des environnements composés de surfaces spéculaires comme les miroirs et des vitrages. Cette méthode, combinée au concept des *daylight coefficients*, a déjà démontré son efficacité pour les études d'éclairage naturel dans des environnements urbains denses [Bugeat 2019].

Tableau 3.7 : Récapitulatif général du fonctionnement de la méthode de radiosité et de la méthode par path-tracing avec Monte Carlo.

Radiosité	Path-tracing avec Monte Carlo
	
Commande RADIANCE : rfluxmtx	
Principe : <ul style="list-style-type: none"> • Maillage de l'environnement • Calcul des facteurs de vue (étendus) entre chaque carreau • Solution du système liant les éclairements des carreaux 	Principe : <ul style="list-style-type: none"> • Tracé de plusieurs rayons depuis chaque capteur • Leur chemin est prolongé jusqu'aux sources de lumière • Leur contribution dépend des surfaces rencontrées
Paramètres importants : <ul style="list-style-type: none"> • Finesse du maillage • Calcul des facteurs de vue 	Paramètres importants : <ul style="list-style-type: none"> • Nombre de rayons émis (-ad) • Nombre de réflexions prises en compte (-ab, -lr)

Hypothèses de calcul communes

Afin d'effectuer une comparaison la plus juste possible, nous avons pris le maximum d'hypothèses de calcul communes entre les deux méthodes. Elles concernent :

- *Les modèles des puits de jour.* La géométrie, les caractéristiques des matériaux et leurs modèles de réflexion sont les mêmes dans les deux méthodes. Seuls les modèles de transmission sont différents : Pour la dépendance angulaire de la transmittance, RADIANCE utilise les équations de Fresnel en considérant le vitrage comme un simple vitrage alors qu'une simplification de la dépendance angulaire basée sur [Schlick 1994] est utilisée pour notre modèle de vitrage.
- *Le modèle de ciel.* La partition du ciel ainsi que le modèle de distribution des luminances du ciel sont identiques. Dans RADIANCE, le ciel ne peut être discréteisé qu'avec la partition de Tregenza (145 tuiles) ou ses sous-divisions. La partition de Tregenza/Reinhart en 2305 tuiles ($= 1+144*2^4$) est utilisée ici et a été implantée dans notre programme pour cette comparaison. Concernant le modèle de distribution des radiances du ciel, le modèle « All-Weather » de [Perez 1993] est utilisé dans les deux méthodes grâce à la commande de RADIANCE gendaymtx. Les données météo IWEC de Barcelone sont utilisées.

Cas d'étude pour la comparaison

Trois configurations de puits de jour sont utilisées pour la comparaison (Figure 3.15). Chacune d'elles comporte des spécificités différentes pour la simulation, allant du cas comportant le plus de surfaces diffuses, jusqu'au cas comportant le maximum de surfaces spéculaires supposé le plus critique pour la méthode de radiosité. Les différentes caractéristiques des surfaces sont mentionnées dans le Tableau 3.1.

- *Surfaces claires diffuses.* Avec cette variante, l'intérêt est porté sur les inter-réflexions diffuses qui jouent un rôle primordial.
- *Surfaces claires diffuses + le dispositif de redirection :* Avec la mise en place du dispositif de redirection, une réflexion spéculaire importante est ajoutée à la simulation.
- *Murs miroirs.* Avec cette variante, des inter-réflexions spéculaires se produisent entre les murs du puits de jour.

Les comparaisons sont faites sur les éclairements reçus sur les plans de travail à chaque étage. Pour chacun des trois cas, une première comparaison est faite avec un calcul d'éclairement instantané durant une journée ensoleillée de novembre au midi solaire. Les éclairements obtenus dans la scène sont représentés en Figure 3.16. Une seconde comparaison concerne les éclairements durant toute l'année. Le but est de voir si le fait d'être sous d'autres conditions de ciel produit des erreurs différentes.

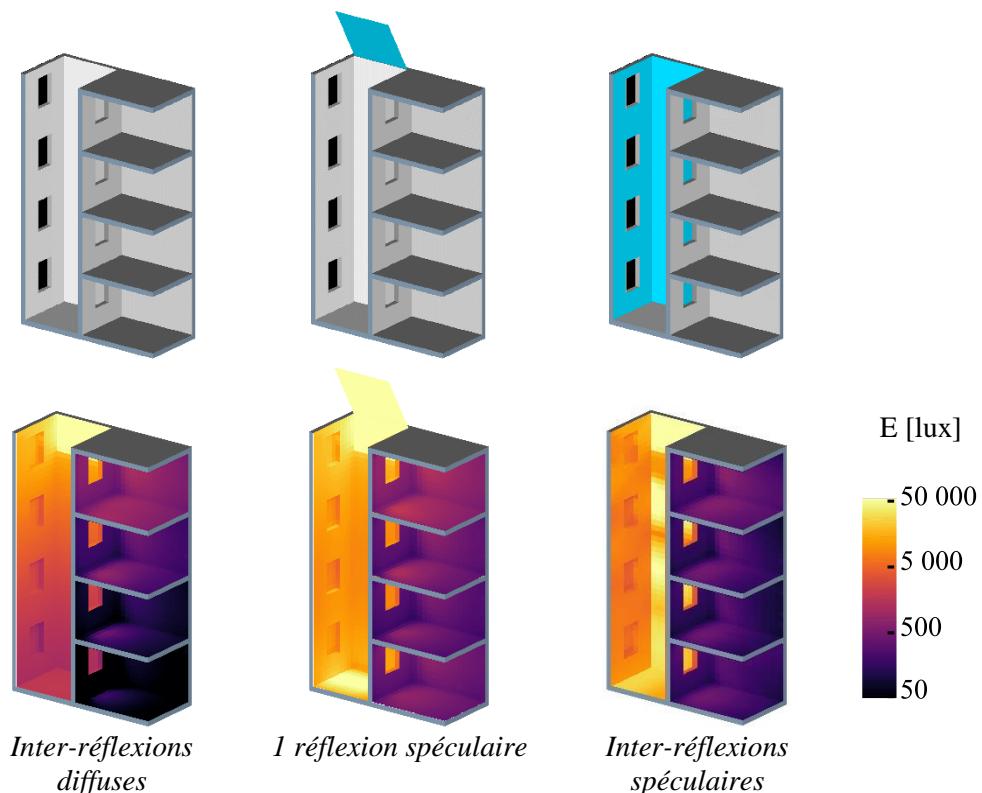


Figure 3.16 : Les trois variantes de puits de jour utilisées pour la comparaison.

3.6.2. Étude des paramètres de simulation

Avant de comparer les résultats, on évalue les paramètres de simulation de RADIANCE. Le but est d'identifier les paramètres de simulation menant à des calculs d'une bonne précision pour la comparaison.

Nombre de rayons (Paramètres RADIANCE -ad)

Un des deux paramètres les plus importants pour les simulations par *path-tracing* est le nombre de rayon émis, c'est-à-dire le nombre de trajets, défini par le paramètre -ad dans les commandes RADIANCE. La Figure 3.17 montre les résultats obtenus avec différentes quantités de rayons : 10 000, 100 000, 1 000 000, et 10 000 000.

Plus important est le nombre de rayons émis, plus le calcul est précis. En utilisant un nombre de rayons insuffisant, du bruit apparaît dans les résultats comme on le voit avec 10 000 rayons. A partir de 1 000 000 le bruit a presque disparu. Augmenter le nombre de rayons revient à allonger proportionnellement les temps de calcul.

En revanche, le nombre de rayons n'a pas d'effet sur les quantités globales de rayonnement perçues : même si la simulation avec 10 000 rayons produit beaucoup de bruits, les éclairements moyens sur les plans de travail sont très proches de ceux qui sont obtenus avec les autres simulations.

Pour les comparaisons, nous retenons -ad 1 000 000.

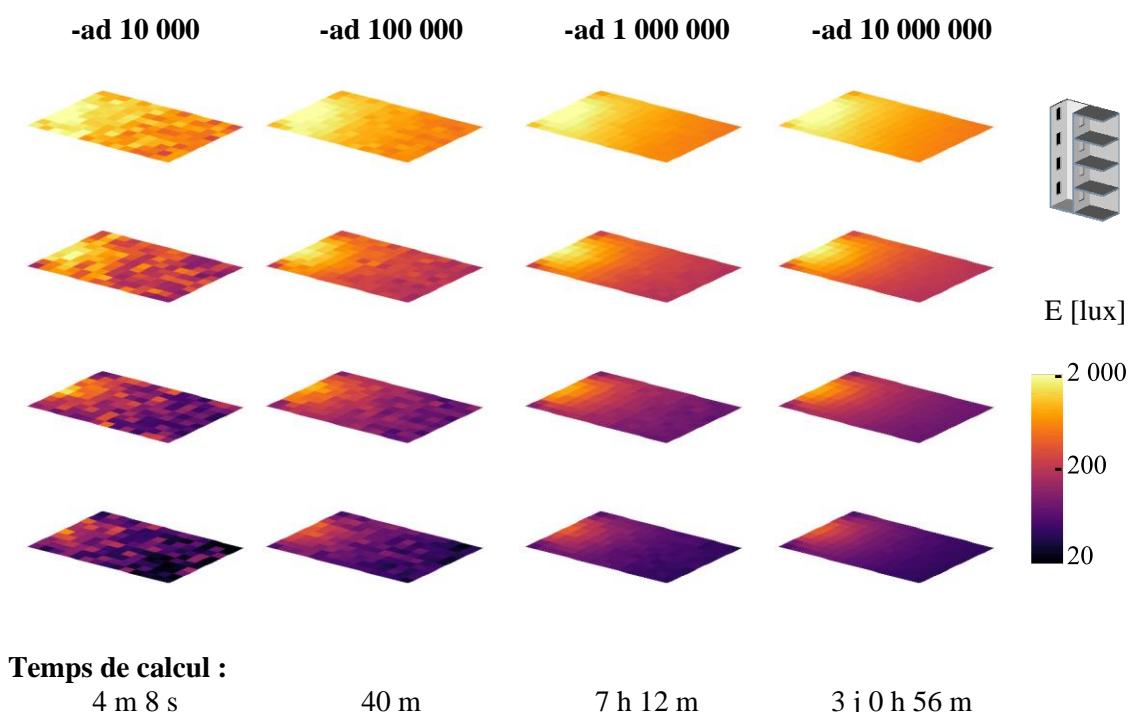


Figure 3.17 : Résultats et temps de calcul de simulations RADIANCE des éclairements instantanés sur les quatre plans de travail avec différentes quantités de rayons émis par capteur (paramètre -ad). (30 réflexions sont prises en compte)

Nombre de réflexions prises en compte (Paramètres RADIANCE -ab, -lr)

L'autre paramètre de simulation important concerne la quantité de réflexions prises en compte (paramètres -ab et -lr au-delà de la limite par défaut). La Figure 3.18 montre les résultats obtenus avec différents nombres de réflexions : 0 (uniquement la lumière directe), 2, 5, 15, et 30 réflexions.

Contrairement au nombre de rayons, le nombre de réflexions a un effet direct sur les quantités globales de rayonnement perçues. Il apparaît clairement que dans le contexte du puits de jour, utiliser un nombre de réflexions entre 2 et 5, valeurs couramment utilisées dans les logiciels commerciaux, revient à négliger une partie importante de la lumière réfléchie dans les espaces les plus bas. A partir de 15 réflexions, les résultats semblent converger et la différence entre 15 et 30 réflexions apparaît légère.

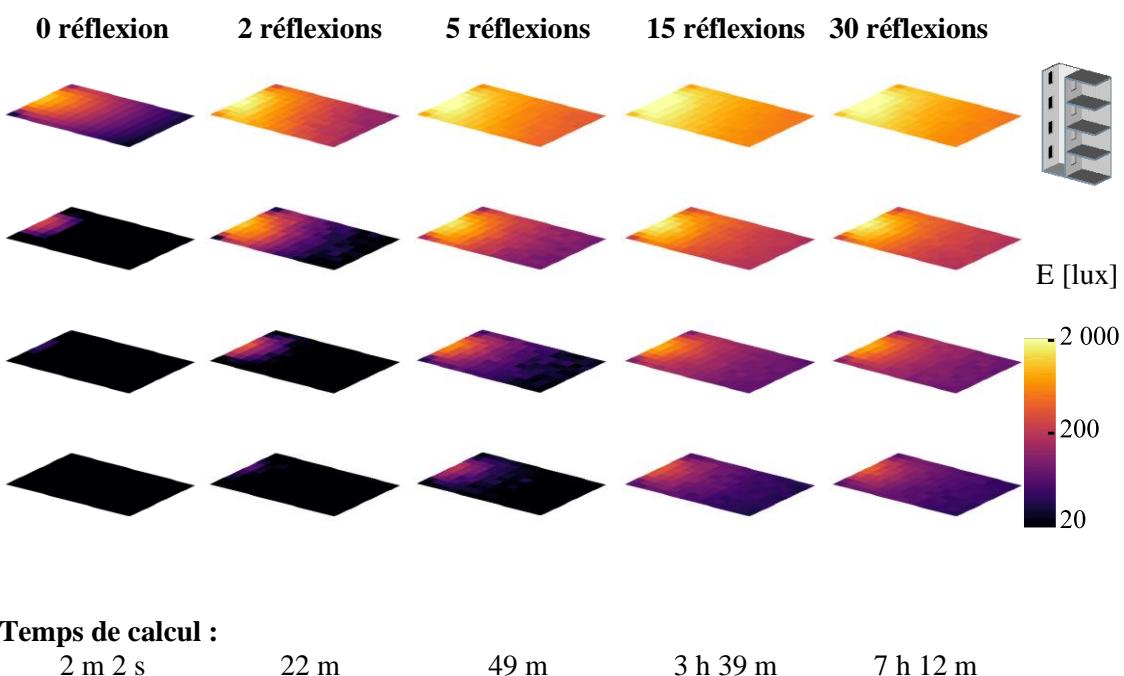


Figure 3.18 : Résultats et temps de calcul de simulations RADIANCE des éclairements instantanés sur les plans de travail avec différent nombres de réflexions (paramètres -ab et -lr). (1 000 000 rayons sont tirés)

La Figure 3.19 montre l'influence du nombre de réflexions diffuses sur la précision des calculs du DA₁₀₀ dans un puits de jour composé de surfaces claires. Les résultats sont séparés entre la moitié hivernale et estivale de l'année. Pour cette figure, nous n'avons pas utilisé RADIANCE mais notre méthode de radiosité. La méthode de résolution itérative de Jacobi a été utilisée uniquement pour produire ces résultats. Avec cette méthode, chaque itération correspond à une réflexion diffuse supplémentaire.

$$\text{Erreur [\%]} = \frac{\text{DA}_{100, n \text{ reflections}} - \text{DA}_{100, \infty \text{ reflections}}}{\text{DA}_{100, \infty \text{ reflections}}} \times 100 \quad 3.1$$

Le nombre de réflexions nécessaires pour faire converger les résultats de DA_{100} est plus élevé pendant le semestre d'hiver. En effet, comme les rayons du soleil atteignent des positions plus hautes dans le puits de jour, le chemin vers le fond est plus long et plus de réflexions sont nécessaires. 28 réflexions sont nécessaires pour amener le pourcentage d'erreur (Éq. 3.X) en dessous de 1%. Cette quantité conséquente entraîne de longs temps de calcul avec les techniques de « *path-tracing* » (Figure 3.18). Nous retiendrons 30 réflexions diffuses pour les comparaisons suivantes.

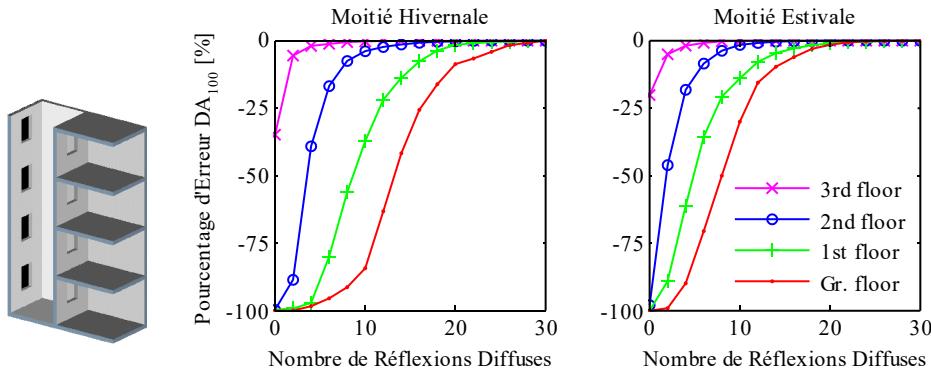


Figure 3.19 : Convergence des résultats de DA_{100} dans les 4 étages d'un puits de jour avec surfaces claires durant la moitié estivale et hivernale en fonction du nombre de réflexions diffuses prises en compte.

Cependant, il n'est pas possible de considérer l'infinie de réflexions spéculaires avec le concept de facteurs de vue étendus. Heureusement, la lumière se propage plus rapidement en profondeur dans les puits de jour par réflexion spéculaire. Le nombre de réflexions spéculaires nécessaires à prendre en compte est alors plus petit. Les deux graphiques de la Figure 3.20 montrent l'influence du nombre de réflexions spéculaires dans un puits de jour avec des murs miroirs. Comme le calcul de l'infinie des réflexions spéculaires n'est pas possible, les DA_{100} obtenus avec 30 réflexions spéculaires remplacent le $DA_{100, \infty \text{ refl.}}$ dans l'équation 3.1. Nous avons choisi de limiter le nombre de réflexions spéculaires à quinze pour le calcul des facteurs de vue étendus. Avec ce nombre, l'erreur du DA_{100} tombe en dessous de 1% dans la pièce du rez-de-chaussée.

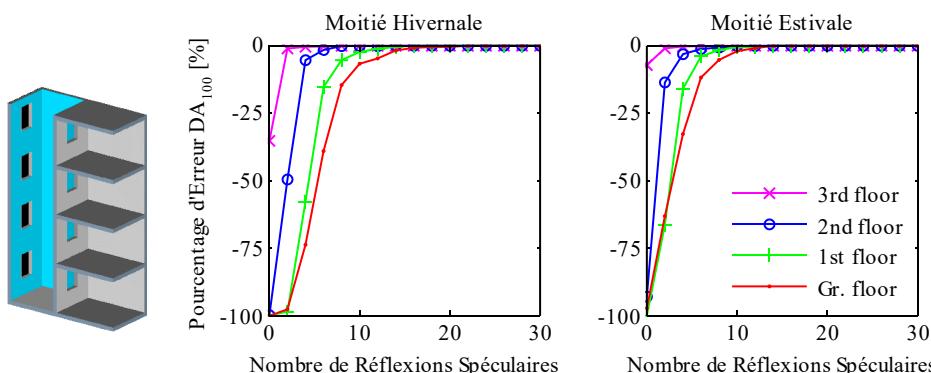


Figure 3.20 : Convergence des résultats de DA_{100} dans les 4 étages d'un puits de jour avec murs miroirs durant la moitié estivale et hivernale en fonction du nombre de réflexions spéculaires.

3.6.3. Comparaison des résultats

Proximité des éclairements à un instant

Les Figures 3.21, 3.22 et 3.23 représentent les éclairements obtenus sur les plans de travail de chaque étage avec la méthode de radiosité et avec RADIANCE dans les trois configurations étudiées. Il s'agit des éclairements obtenus au même moment que dans la Figure 3.15 (journée ensoleillée de novembre au midi solaire). Les éclairements moyens sur les plans de travail sont mentionnés pour la méthode de radiosité et pour RADIANCE ainsi que la différence relative entre les deux (Éq. 3.2).

$$\text{Diff. rel. } [\%] = \frac{E_{\text{moy, radiosité}} - E_{\text{moy, RADIANCE}}}{E_{\text{moy, RADIANCE}}} \times 100 \quad 3.1$$

Les Figures 3.21, 3.22 et 3.23 montrent une forte proximité entre les résultats des deux méthodes. Tout d'abord, la répartition des éclairements sur les plans de travail et les niveaux d'éclairement semblent quasiment identiques dans les trois configurations. La différence relative entre les éclairements moyens ne dépasse pas les 2% pour tous les plans de travail. Cette différence relative est relativement constante selon les différents niveaux mais également selon les trois configurations testées. La présence d'inter-réflexions spéculaires dans la variante avec les murs miroirs n'engendre pas de différence supplémentaire et met en avant les performances de la méthode des facteurs de vue étendus.

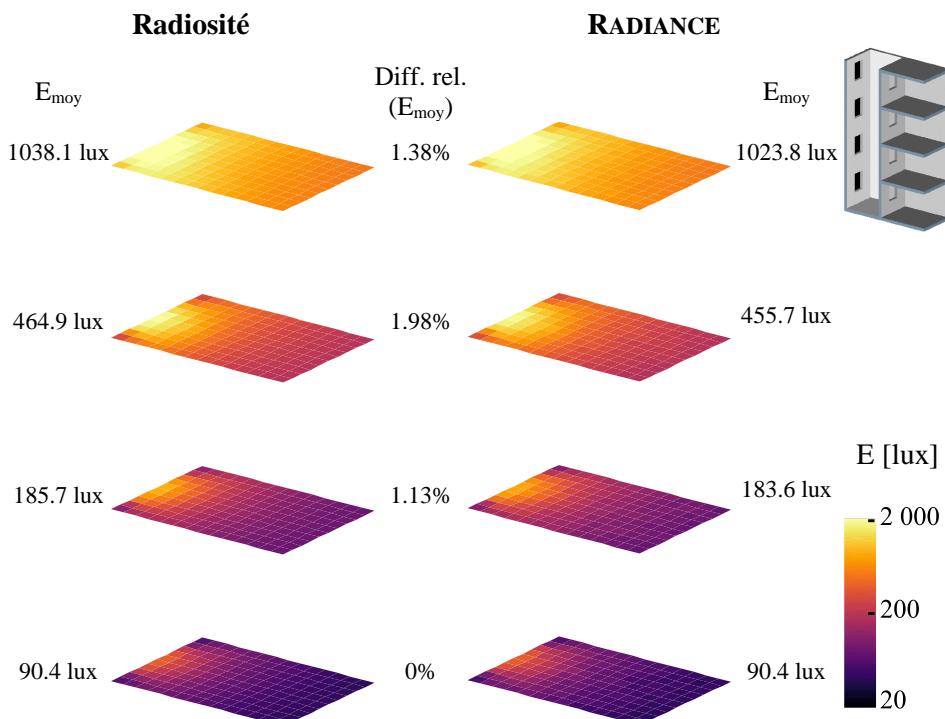


Figure 3.21 : Comparaison des résultats d'éclairements instantanés entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE pour la variante avec surfaces claires.

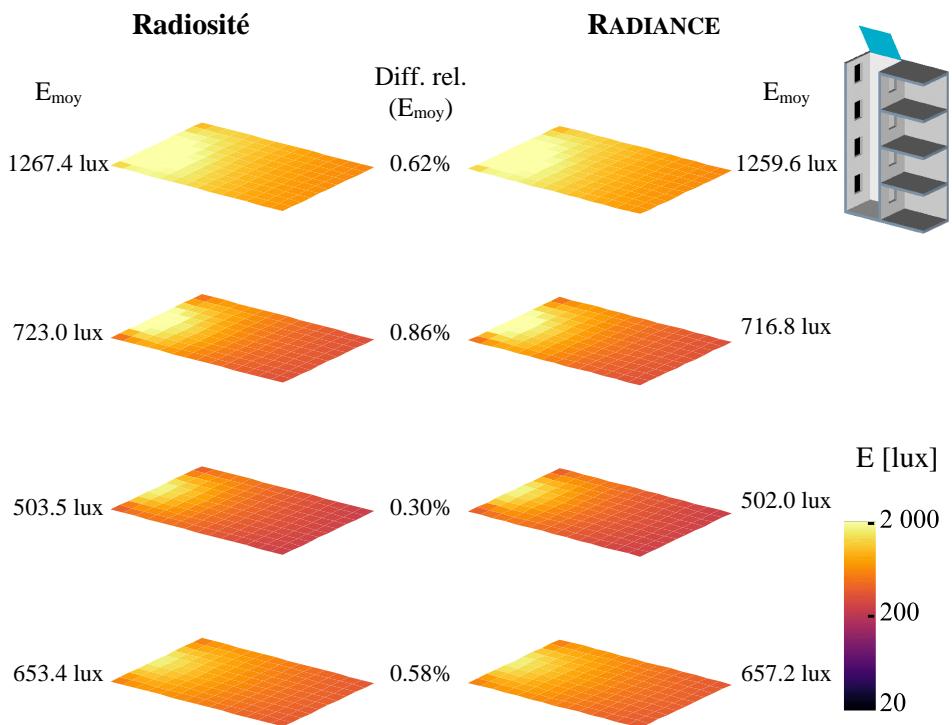


Figure 3.22 : Comparaison des résultats d'éclairements instantanés entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE pour la variante avec surfaces claires et le dispositif de redirection.

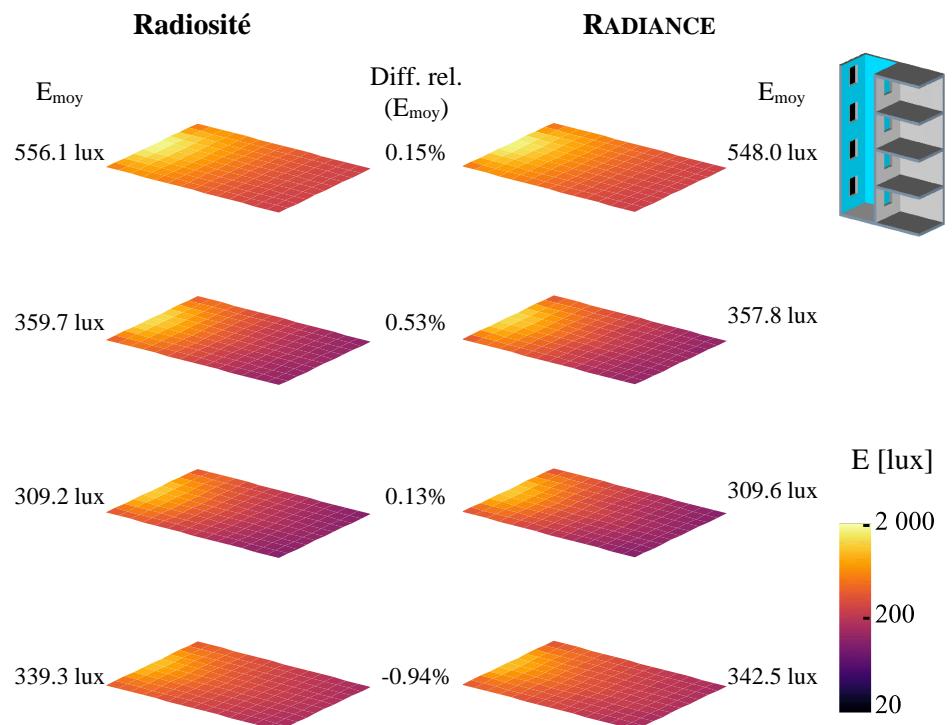


Figure 3.23 : Comparaison des résultats d'éclairements instantanés entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE pour la variante avec murs miroirs.

ECLAIREMENTS MOYENS PENDANT L'ANNÉE

Le Tableau 3.8 fournit les indicateurs d'erreur entre les éclairements moyens sur le plan de travail à chaque heure de l'année calculés avec la méthode de radiosité et RADIANCE. L'erreur moyenne MBE (Mean Bias Error) (Éq. 3.3) indique si la méthode de radiosité a tendance à sous-estimer ou à surestimer les éclairements au cours de l'année par rapport à RADIANCE. L'erreur moyenne relative (MBE_{rel}) (Éq. 3.4) sert à donner une pondération de l'erreur en fonction des ordres de grandeurs des éclairements.

Les résultats selon ces deux indicateurs montrent une légère tendance de notre méthode à surestimer les éclairements. Une des causes de cette surestimation peut être la différence dans le modèle de transmission du vitrage : la simplification de Schlick utilisée dans notre modèle surestime légèrement la transmittance directe des vitrages pour les angles d'incidence élevés. Mais cette erreur est faible et le MBE_{rel} ne dépasse pas 1.6%.

$$MBE \text{ [lux]} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{moy,i} - E_{moy,i,ref} \quad 3.3$$

$$MBE_{rel} \text{ [%]} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_{moy,i} - E_{moy,i,ref}}{E_{moy,i,ref}} \times 100 \quad 3.4$$

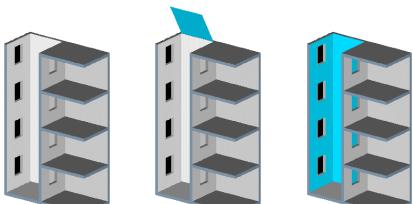
L'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) (Éq. 3.5) donne une information sur les fluctuations des erreurs de notre méthode autour de l'erreur moyenne. Comme pour MBE_{rel} , l'erreur quadratique moyenne relative RMSE_{rel} (Éq. 3.6) sert à donner la même indication en tenant compte de l'ordre de grandeur des quantités de lumière.

Les résultats de MBE_{rel} et de $RMSE_{rel}$ sont très proches, ce qui illustre une précision relativement constante quel que soit le pas de temps considéré. Parmi les trois variantes étudiées, de manière assez surprenante, les erreurs sont les plus importantes dans le puits de jour avec les surfaces claires diffuses. L'ajout de surface spéculaire à l'intérieur n'engendre pas d'erreur supplémentaire et renforce une fois de plus l'efficacité du concept des facteurs de vue étendus.

$$RMSE \text{ [lux]} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{moy,i} - E_{moy,i,ref})^2} \quad 3.5$$

$$RMSE_{rel} \text{ [%]} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_{moy,i} - E_{moy,i,ref}}{E_{moy,i,ref}} \right)^2} \times 100 \quad 3.6$$

Tableau 3.8 : Indicateurs d'erreur des éclairements moyens sur le plan de travail de toute l'année calculés avec la méthode de radiosité par rapport à RADIANCE.



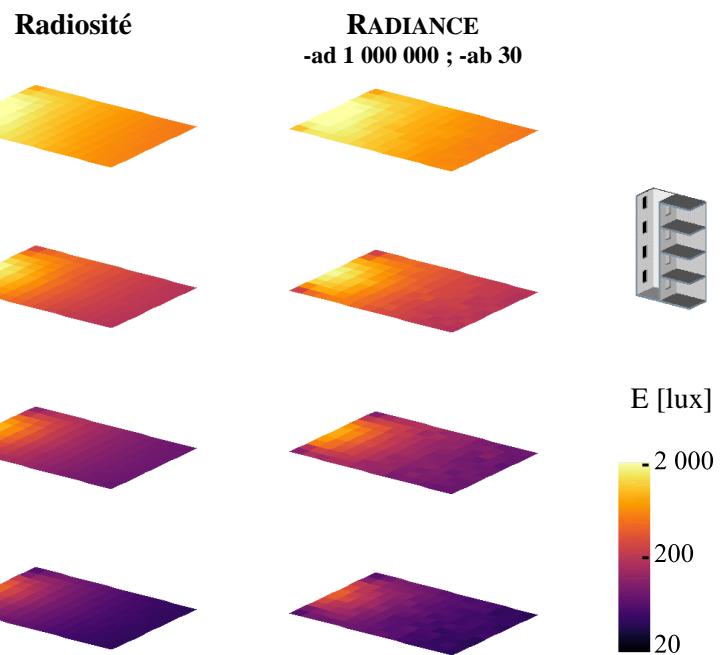
	21.7 lux	20.8 lux	25.7 lux
MBE [lux]	7.2 lux 2.3 lux	6.5 lux 2.1 lux	9.5 lux 5.6 lux
1 lux	0.4 lux	0.4 lux	-0.6 lux
MBE _{rel} [%]	1.5 % 1.6 % 1.4 %	1.3 % 1.2 % 1.1 %	1.8 % 1.0 % 0.5 %
	1.2 %	0.6 %	-0.6 %
RMSE [lux]	50.5 lux 17.9 lux 6.0 lux	50.8 lux 18.4 lux 7.0 lux	53.6 lux 34.7 lux 27.7 lux
	4.2 lux	4.3 lux	17.0 lux
RMSE _{rel} [%]	1.8 % 1.9 % 2.6 %	1.7 % 1.7 % 2.4 %	2.1 % 2.1 % 1.6 %
	3.7 %	2.6 %	1.9 %

3.6.4. Comparaison des temps de calcul

Deux approches sont proposées ici pour mettre en avant la rapidité de la méthode de radiosité développée.

La première consiste à effectuer des simulations produisant des résultats de précision équivalente (Figure 3.24). Les paramètres requis par RADIANCE, à savoir nombre de rayon et nombre de réflexions, pour atteindre une précision équivalente aux résultats de la méthode de radiosité sont importants. Le temps de calcul qui en résulte est d'un tout autre ordre de grandeur : 1 minute avec la méthode de radiosité, 7 heures et 12 minutes pour RADIANCE.

La deuxième approche consiste à comparer la précision en effectuant des simulations avec des temps de calcul du même ordre de grandeur (Figure 3.25). Pour cela, les deux principaux paramètres de RADIANCE ont été diminués indépendamment dans deux calculs. En conservant le bon nombre de réflexions, le nombre de rayons doit être réduit à 10 000 environ ce qui produit un bruit très important dans les résultats. Et en conservant le bon nombre de rayon, le nombre de réflexion doit être réduit à 0 et toute la partie réfléchie de la lumière est alors négligée.

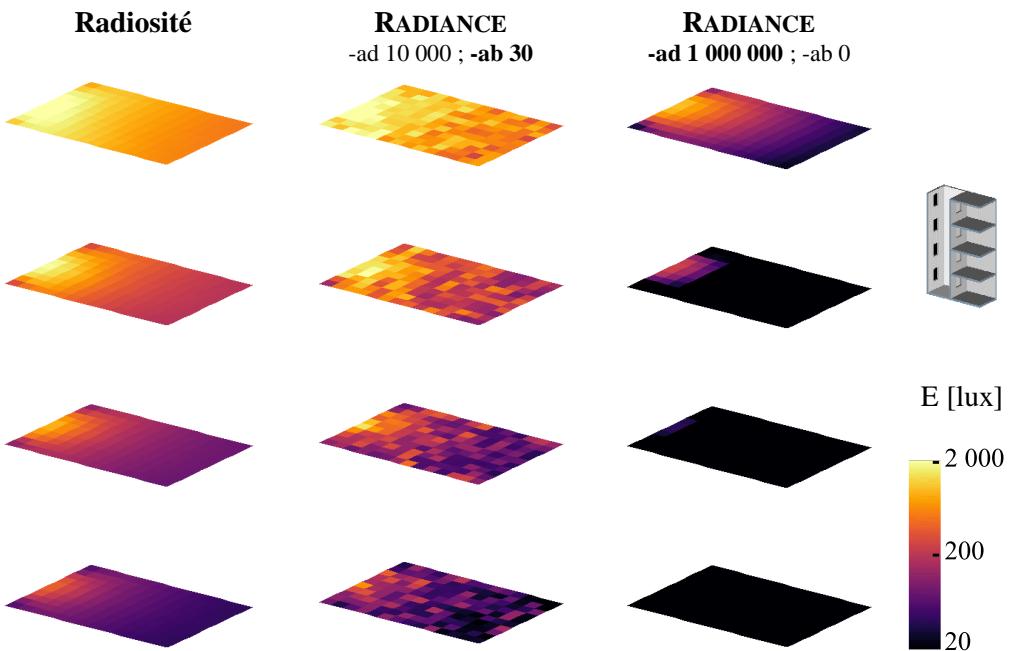


Temps de calcul :

1 m 5 s

7 h 12 m

Figure 3.24 : Comparaison des temps de calcul à précision équivalente entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE.



Temps de calcul :

1 m 5 s

4 m 8 s

2 m 2 s

Figure 3.25 : Comparaison des résultats de la méthode de radiosité développée et de RADIANCE à temps de calcul équivalents. Deux simulations RADIANCE sont présentées : la première avec un nombre de rayons diminué, la seconde avec un nombre de réflexion diminué.

3.7. Conclusion

La modification des caractéristiques des surfaces ou l'ajout de dispositifs de réorientation sont des mesures efficaces pour améliorer les performances annuelles d'un puits de jour. Cette étude a montré que les indicateurs CBDM calculés à l'aide de notre méthode de radiosité donnent une évaluation rapide et précise des quantités de lumière reçues et de leur variation annuelle et quotidienne pour les différentes configurations de puits de jour testées.

Importance de la partie réfléchie et des matériaux

Les résultats montrent une très grande sensibilité de la performance par rapport à la réflectance diffuse des surfaces des puits de jour. Comme les pièces adjacentes ont une vue directe limitée sur le ciel, la partie réfléchie de la lumière prend une importance majeure. Des variations de 10 % sur la réflectance diffuse des murs peuvent produire des différences d'éclairement annuel moyen allant jusqu'à un facteur deux dans les pièces du rez-de-chaussée.

Des augmentations considérables des niveaux d'éclairement sont obtenues avec des murs miroirs. Les réflexions spéculaires permettent à une plus grande quantité de lumière de pénétrer plus profondément dans le puits de jour. L'utilisation de murs miroirs est particulièrement nécessaire dans les puits de jour étroits. Les ordres de grandeur des améliorations obtenues pour tous les climats sont les suivants : le passage de murs sombres à des murs blancs standard augmente uniformément le niveau d'éclairement moyen d'un facteur 5, et le passage à des murs miroirs d'un facteur 30.

Importance des trajectoires solaires

Un facteur clé sur les performances est la hauteur du soleil dans le ciel. Avec un soleil bas, les rayons directs n'atteignent que la partie supérieure du puits de jour, ce qui pénalise fortement la propagation de la lumière vers les étages inférieurs. Cela entraîne d'importantes différences saisonnières dans les niveaux d'éclairement, ce qui se traduit par une période hivernale très sombre aux latitudes moyennes et élevées. L'utilisation du dispositif de redirection produit une augmentation, localisée dans le temps et dans l'espace, des éclairements qui assure dans les parties les plus basses des conditions d'éclairage satisfaisantes tout au long de l'année, à des latitudes critiques comme Stockholm et même sous des climats nuageux. Les performances du dispositif ne sont pas très sensibles aux changements d'orientation autour de la solution choisie (inclinaison et azimut) ; ils sont donc bien adaptés à la plupart des tissus urbains.

À différentes latitudes, un même puits de jour peut produire des conditions d'éclairage très inégales. Dans les régions tropicales, comme Mexico ou Quito, des murs blancs avec une réflectance diffuse élevée sont tout à fait suffisants pour obtenir de bonnes conditions d'éclairage tout au long de l'année. À des latitudes plus élevées, comme à Barcelone, Bilbao ou Stockholm, la faible hauteur du soleil suggère de combiner les murs à haute réflexion avec des dispositifs de réorientation pour obtenir des conditions d'éclairage adéquates tout au long de l'année.

Cette étude montre l'importance des inter-réflexion ou de la réorientation de la lumière du jour dans les puits de jour lors de projets architecturaux et d'urbanisme. Il est possible d'obtenir de bons niveaux de performance sans modifier la géométrie et la forme des bâtiments, ce qui permet d'éviter les travaux lourds et la réduction de l'espace habitable. Même si les performances sont

connues pour être sensibles aux aspects climatiques et géométriques, le potentiel d'amélioration offert par la modification des caractéristiques des surfaces et des dispositifs de réorientation est toujours important.

Intérêt de la méthode de radiosité dans le contexte du puits de jour

Cette étude propose également une comparaison de la méthode de radiosité développée avec le moteur de calcul RADIANCE, référence dans le domaine de la lumière naturelle. Les simulations ont montré que notre méthode produit des résultats identiques avec des temps de calcul très raccourcis dans ce contexte. La raison principale des temps de calcul plus longs avec RADIANCE est la nécessité de prendre en compte un nombre important de réflexions. Le fait d'avoir un outil de simulation performant offre la possibilité aux concepteurs d'évaluer avec précision les différentes solutions architecturales envisagées, et ce, en un plus grand nombre et dans un temps court.

Chapitre 4 – Application

Analyse de la Partie Réfléchie du Rayonnement Solaire dans la Ville de Cordoue*

4.1.	Introduction	135
4.2.	Méthode	136
4.2.1.	Le climat de Cordoue	136
4.2.2.	Modèles du quartier et de la rue	137
4.2.3.	Variantes	138
4.2.4.	Indicateurs	140
4.3.	Echelle du quartier : simulations du rayonnement solaire	143
4.3.1.	Stratégie de maillage	143
4.3.2.	Temps de calcul, mémoire utilisée, et densité des matrices de facteurs de vue étendus	145
4.3.3.	Nombre de réflexions	146
4.4.	Echelle du quartier : résultats	148
4.4.1.	Différences de potentiel solaire annuel	148
4.4.2.	Différence de la distribution du rayonnement solaire à un instant	149
4.5.	Echelle de la rue : simulation du rayonnement solaire	151
4.5.1.	Stratégie de maillage	151
4.5.2.	Temps de calcul, mémoire utilisée, et densité des facteurs de vue étendue	151
4.5.3.	Nombre de réflexions	154
4.6.	Échelle de la rue : résultats	156
4.6.1.	Effets produits par des modes de réflexion différents	156
4.6.2.	Effets produits par des réflectances différentes	159
4.6.3.	Application de toile d'ombrage dans la rue claire	161
4.7.	Discussion et Conclusion	163

* Ce chapitre reprend partiellement et complète l'article « Benefits of street sun sails to limit building cooling needs in a mediterranean city » publié en Janvier 2021 dans la revue *Building & Environment*.

[Garcia-Nevado 2021]

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de souligner à la fois la sensibilité de la distribution du rayonnement solaire vis-à-vis des propriétés des matériaux ainsi que l'importance de la partie réfléchie sur le potentiel solaire et les performances thermique et d'éclairage naturel des bâtiments. Pour cela, la méthode de radiosité développée dans cette thèse est utilisée dans deux modèles 3D urbains à différentes échelles : le modèle d'un quartier et d'une rue du centre-ville de Cordoue. Plusieurs variantes de ces deux modèles sont étudiées pour mettre en avant les différences engendrées par des réflectances et des modes de réflexions différents, diffus et spéculaire. L'effet d'un dispositif d'ombrage traditionnellement utilisé dans la ville de Cordoue pour limiter le rayonnement solaire est également étudié dans le modèle de la rue.

Différents critères sont utilisés pour évaluer les différentes variantes : à l'échelle du quartier, le potentiel solaire à partir du rayonnement solaire annuel reçu sur les surfaces est calculé et à l'échelle de la rue, des indicateurs d'éclairage naturel dynamiques annuels et les températures de surface et d'air intérieur. Ces températures sont calculées à partir de simulations thermiques par éléments-finis avec le programme Cast3M. La méthode de radiosité développée dans cette thèse permet de calculer deux éléments nécessaires à ces simulations : les densités de flux absorbé par la peau du maillage volumique exposé au rayonnement solaire ainsi que les facteurs de vue entre les carreaux du modèle pour le calcul radiatif à grande longueur d'onde à l'intérieur de Cast3M. Le détail du calcul du rayonnement solaire et l'impact que représentent certaines hypothèses comme limiter le nombre de réflexion sont discutés.

Les résultats montrent une contribution très importante de la partie réfléchie du rayonnement allant jusqu'à constituer la moitié du rayonnement total reçu sur les façades dans les configurations avec les plus fortes réflectances. La présence de matériaux réfléchissant de manière spéculaire au niveau des façades a pour conséquence d'augmenter ou de diminuer localement le rayonnement solaire perçu par les bâtiments, ce qui peut impacter les performances en éclairage naturel et causer des différences de températures de surfaces et d'air intérieur notables.

4.1. Introduction

La simulation du rayonnement solaire global reçu sur les enveloppes des bâtiments notamment pour l'évaluation du potentiel en éclairage naturel et du chauffage solaire actif ou passif a fait l'objet d'une grande attention ces dernières années [Compagnon 2004, Redweik 2013, Aguerre 2018]. Plusieurs études ont été menées en ce qui concerne les effets de la forme urbaine sur le potentiel d'énergie solaire [Robinson 2006 et Sarralde 2015] à des échelles variant du bâtiment puis du quartier jusqu'à la ville entière. Ces études abordent principalement les effets de la forme urbaine sur le potentiel solaire en négligeant, pour la plupart, la partie réfléchie du rayonnement solaire. Peu de travaux s'intéressent aux effets, positifs ou négatifs, produits par les inter-réflexions entre les surfaces et aux différences de quantité et de distribution du rayonnement solaire produites par différentes propriétés de surface. La distribution du rayonnement solaire par réflexion et ses effets sont étudiés dans le centre-ville dense de Cordoue en Espagne grâce à la méthode de radiosité développée dans cette thèse.

Deux modèles à échelle différente ont été utilisés : un quartier du centre-ville et une rue. Plusieurs variantes de ces modèles sont comparées. Chaque variante se différencie des autres par les propriétés optiques des surfaces qui la composent. Deux variantes comportant des façades produisant des réflexions dans les deux modes opposés, diffus et spéculaire, sont analysées et comparées. De plus, deux variantes comportant pour l'une des surfaces urbaines claires très réfléchissantes et pour l'autre des surfaces sombres très absorbantes sont comparées.

Le premier modèle est à l'échelle du quartier. Il représente une partie du centre-ville dense de Cordoue et s'étend sur une surface de 30 hectares. A partir de ce modèle purement surfacique, on calcule le potentiel solaire annuel du quartier et la distribution du rayonnement à un instant sur les façades ainsi que le sol et les toitures. L'objectif est d'évaluer les tendances globales des changements du comportement radiatif obtenus. L'effet produit sur les températures et les éclairages par la mise en place de toile d'ombrage traditionnel dans la ville de Cordoue est également étudié sur le modèle de la rue.

Le deuxième modèle utilisé dans ce chapitre est à une échelle plus petite. Il représente une rue avec des dimensions représentatives du centre de Cordoue. Ce modèle possède un niveau de détail plus élevé comprenant les espaces intérieurs des bâtiments donnant sur la rue. Les impacts engendrés par les différentes propriétés de surface sont analysés plus finement. Les performances en éclairage naturel sont mesurées à partir d'indicateur dynamique annuel tel que la DA₅₀₀ et l'UDI₃₀₀₋₂₀₀₀. Le comportement thermique des bâtiments de la rue est analysé à partir de simulations par éléments-finis en considérant le problème thermique complet. Ces simulations permettent d'obtenir les températures de surface et d'air des intérieurs au cours d'une période ensoleillée autour de l'équinoxe de septembre.

4.2. Méthode

4.2.1. Le climat de Cordoue

Cordoue ($37,8^{\circ}\text{N}$, $4,8^{\circ}\text{W}$) est une ville historique d'Andalousie située au Sud de l'Espagne qui dispose d'un climat méditerranéen chaud. Selon les données recueillies depuis la station météorologique de l'aéroport de Cordoue, les hivers y sont généralement doux et les conditions climatiques en été sont chaudes et sèches. La température moyenne de l'air en juillet et août atteint 28°C , avec des maximums moyens allant jusqu'à 37°C . Les vagues de chaleur et les pics de température de plus de 40°C sont récurrents. Récemment, la température de l'air a atteint $46,9^{\circ}\text{C}$ le 13 juillet 2017.

Le nombre de jours ensoleillés sans couverture nuageuse est très élevé. Cela se traduit par un fort rayonnement direct du soleil tout au long de l'année sur la ville et contribue grandement à son climat très chaud. La Figure 4.1 représente les irradiances directes normales du fichier des données météorologiques de Cordoue utilisé pour les simulations. A titre de comparaison, on présente également les irradiances directes normales de Bilbao, ville d'Espagne avec un climat plus nuageux.

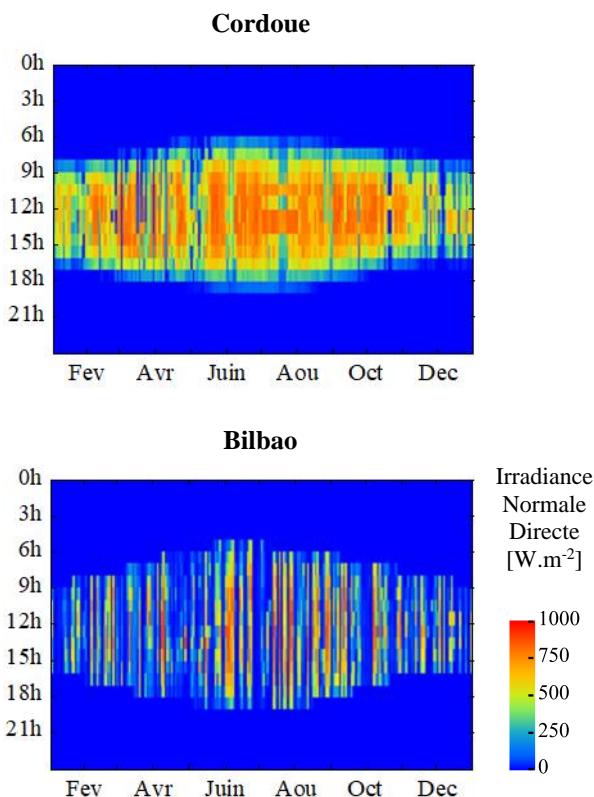


Figure 4.1 : Répartitions annuelles des irradiances normales directes de Cordoue et de Bilbao.

Pour atténuer ces conditions estivales extrêmes, chaque année, le conseil municipal et une association commerciale locale organisent l'installation de toile d'ombrage (Figure 4.2) sur plusieurs rues commerciales du centre-ville pour améliorer le confort des piétons en les protégeant du rayonnement direct du soleil [Garcia-Nevado 2020]. Ce même type de dispositif est aussi

utilisé dans les villes alentours disposant d'un climat similaire. L'effet de ce dispositif sur l'équilibre thermique et sur les conditions d'éclairement est étudié à l'échelle de la rue.



Figure 4.2 : Toiles d'ombrage dans la rue Sierpes à Séville en 1918 et dans la rue Gondomar à Cordoue en 2018.

4.2.2. Modèles du quartier et de la rue

À l'échelle du quartier

La première étude réalisée à l'échelle du quartier est effectuée à partir d'un modèle surfacique (Figure 4.3 et 4.4) d'une partie du centre-ville dense de Cordoue. L'implantation des bâtiments a été obtenue à partir du site OpenStreetMap et les hauteurs de bâtiment ont ensuite été générées de manière aléatoire entre 7 et 14 m pour obtenir un tissu urbain représentatif du quartier à partir des dimensions moyennes des bâtiments.

Ce modèle s'étend sur 541 m par 560 m soit une surface couverte de 302 960 m² (30 hectares). En tenant compte de toutes les surfaces que représentent les façades, le sol des rues et les toitures la surface totale du modèle est de 561 590 m². Les façades représentent 46 % de la surface totale, les rues 16 %, et les toitures 38 %. Il s'agit d'un quartier très dense avec un taux de d'occupation par les bâtiments de 70 %.



Figure 4.3 : Image satellite et facteurs de vue du ciel dans le modèle de Cordoue.

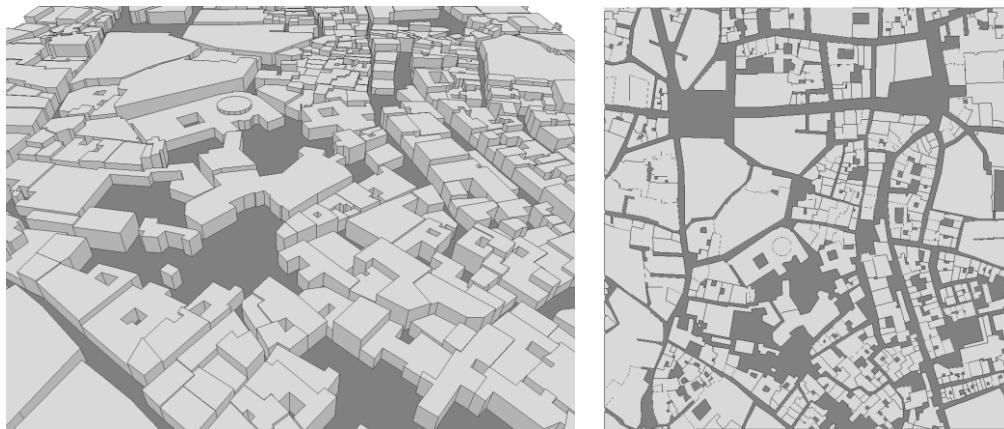


Figure 4.4 : Modèle du quartier de Cordoue. Les deux vues sont orientées vers le nord.

À l'échelle de la rue

La deuxième étude est effectuée à une échelle plus petite, sur un modèle de rue, avec un niveau de détail plus important où les intérieurs des bâtiments sont pris en compte. Le modèle consiste en une rue symétrique Est-Ouest, comprenant deux façades orientées vers le sud et le nord (Figure 4.5). Deux rangées de cinq bâtiments sur trois étages sont modélisées avec un rapport largeur/hauteur de la rue de 0.6.

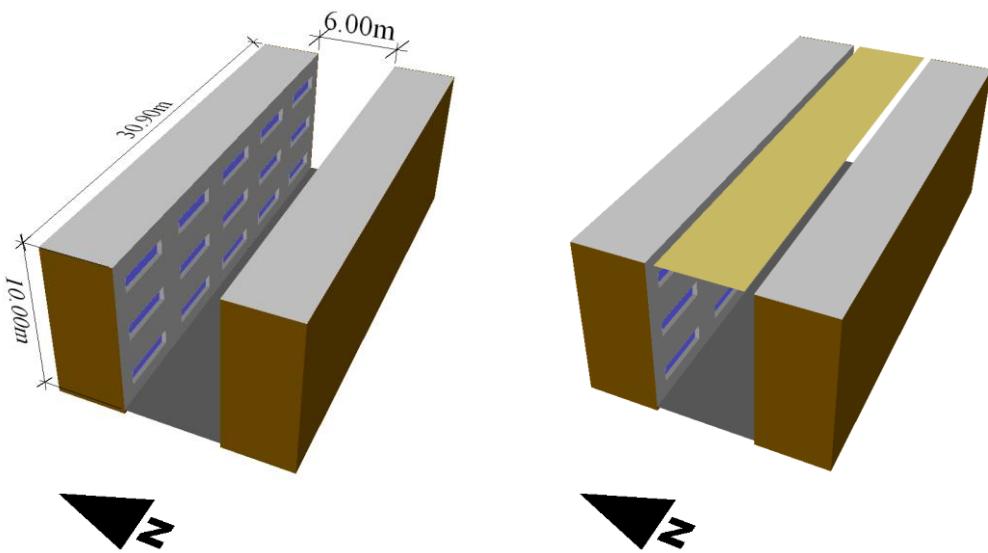


Figure 4.5 : Modèle de la rue avec et sans toile d'ombrage.

Les dimensions des espaces intérieurs sont identiques pour chacun de ces espaces avec une profondeur de 4 m, une largeur de 6 m et une hauteur sous plafond de 3 m. Les ouvertures font 4 m de large pour 1 m de hauteur et leur allège est placée à une hauteur de 1 m. Les épaisseurs de chaque élément sont détaillées plus loin en Figure 4.7.

Chaque rangée de bâtiments n'a que deux faces affectées par le rayonnement : le toit et la façade qui donne sur la rue (gris), avec un taux de vitrage de 20% (bleu). Les autres faces extérieures des

bâtiments sont soit des planchers de sous-sol en contact avec la terre, soit des murs de séparation considérés ici comme adiabatiques (marron) et n'interviennent donc pas dans le calcul radiatif.

Les vues en coupe du modèle présentées dans les résultats sont toutes orientées en direction de l'Est. La façade Sud se trouve donc à gauche et la façade nord à droite.

4.2.3. Variantes

À l'échelle du quartier

L'objectif est d'analyser l'effet de la partie réfléchie du rayonnement. Quatre variantes avec différentes propriétés de surface sont étudiées. Ces différences produisent des changements dans la distribution du rayonnement à l'intérieur du modèle.

Trois variantes possèdent uniquement des surfaces opaques qui réfléchissent de manière diffuse : *normale diffuse*, *claire diffuse* et *sombre diffuse*. La différence entre chacune de ces trois variantes se trouve dans les valeurs de réflectance du sol et des façades.

La quatrième variante *normale spéculaire* possède des valeurs de réflectance égale à la variante normale diffuse. En revanche, toutes les façades réfléchissent de manière spéculaire. Ce type de façade peut être assimilé à des revêtements métalliques, des façades vitrées réfléchissantes, ou des bardages photovoltaïques. Dans toutes ces variantes, seule la réflectance des toitures reste constante. Comme ces surfaces ne voient quasiment que le ciel, elles interagissent très peu avec les autres surfaces. Changer leurs propriétés n'est donc pas justifié dans cette étude où l'intérêt est porté sur la partie réfléchie du rayonnement. Les propriétés des surfaces sont répertoriées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Récapitulatif des propriétés des surfaces des 4 variantes du quartier.

Normal diffuse	Normale spéculaire	*Claire diffuse	Sombre diffuse
Façades $\rho_d = 50\%$	Façades $\rho_r = 50\%$	Façades $\rho_d = 70\%$	Façades $\rho_d = 30\%$
Sol $\rho_d = 30\%$	Sol $\rho_d = 30\%$	Sol $\rho_d = 50\%$	Sol $\rho_d = 10\%$
Toits $\rho_d = 85\%$			

À l'échelle de la rue

La même procédure est utilisée pour l'étude de la rue. Quatre variantes (Tableau 4.2) sont considérées : *normale diffuse*, *normale spéculaire*, *claire diffuse*, et *sombre diffuse*. À ces quatre variantes se rajoutent deux supplémentaires avec la présence de toile d'ombrage dans le cas de la rue claire diffuse. Deux toiles sont étudiées, une toile blanche et une toile noire. On considère que ces deux toiles ont le même taux d'ouverture, soit une transmittance directe identique. En revanche, du fait de leur couleur, elles n'ont pas les mêmes réflectances diffuses ni transmittances diffuses. Les propriétés des surfaces intérieures et du toit sont identiques dans toutes les variantes étudiées.

Tableau 4.2 : Récapitulatif des propriétés des surfaces intérieures et extérieures des 6 variantes de la rue.

Matériaux intérieurs		Matériaux extérieurs de la rue (4 variantes *+ 2 avec les toiles d'ombrage)					
(Fixes)		Normal diffuse	Normale spéculaire	*Claire diffuse	Sombre diffuse		
Plafond	$\rho_d = 85\%$	Façades $\rho_d = 50\%$	Façades $\rho_r = 50\%$	Façades $\rho_d = 70\%$	Façades $\rho_d = 30\%$		
Murs	$\rho_d = 85\%$	Sol $\rho_d = 30\%$	Sol $\rho_d = 30\%$	Sol $\rho_d = 50\%$	Sol $\rho_d = 10\%$		
Sols	$\rho_d = 40\%$	Toits $\rho_d = 85\%$	Toits $\rho_d = 85\%$	Toits $\rho_d = 85\%$	Toits $\rho_d = 85\%$		
Vitrages	$\tau_r = 80\%$ $\rho_r = 10\%$				<i>*Toile blanche</i> $\tau_r = 18\%$ $\tau_d = 12\%$ $\rho_d = 62\%$		
					<i>*Toile noire</i> $\tau_r = 18\%$ $\tau_d = 0\%$ $\rho_d = 8\%$		

4.2.4. Indicateurs

À l'échelle du quartier – potentiel solaire

- *Potentiel solaire*

Le rayonnement solaire annuel [$\text{kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$] reçu et absorbé par les façades, les toitures et le sol est calculé afin d'évaluer les différences dans la distribution du rayonnement à l'échelle du quartier. Dans le but de quantifier la contribution des inter-réflexions la partie du rayonnement reçue après réflexion est mentionnée. Ces grandeurs calculées sur l'enveloppe des bâtiments permettent d'estimer le potentiel d'éclairage et de chauffage solaire passif et actif (production d'électricité photovoltaïque et solaire thermique pour le chauffage des locaux et de l'eau) [Compagnon 2004, Mohajeri 2016].

Les différences instantanées de distribution du rayonnement sont aussi analysées. Les irradiances totales, les densités de flux absorbé, et la partie reçue par réflexion sont calculées à un moment donné durant la journée ensoleillée du 26 septembre.

À l'échelle de la rue – éclairage naturel et températures

Avec la présence des espaces intérieurs, des analyses plus fines sont effectuées sur les performances en éclairage naturel et sur le comportement thermique des variantes étudiées :

- *Eclairage naturel*

Les éclairements instantanés sont calculés au cours de la même journée (26 septembre). Ils permettent de donner un ordre de grandeur des quantités de lumière perçues entre les différentes variantes et de visualiser la propagation du rayonnement solaire à l'intérieur du modèle.

Les indicateurs dynamiques annuels DA_{500} et $\text{UDI}_{300-2000}$ sont aussi calculés pour évaluer les performances de chaque variante au cours de l'année. Ces deux indicateurs sont obtenus sur des

plans de travail virtuels dans les intérieurs des bâtiments composés chacun de 308 mailles de 25 cm x 25 cm situés à 80 cm du sol (Figure 4.6).

Par simplification, les propriétés optiques des éléments de la scène sont considérées comme identiques dans le spectre visible et dans le spectre solaire : $\tau_e, \rho_e = \tau_v, \rho_v$.

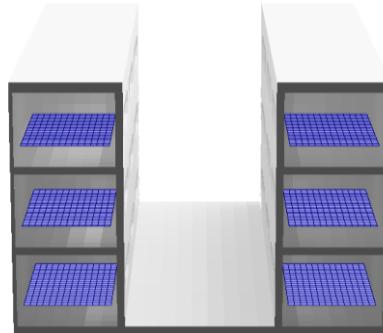


Figure 4.6 : Plans de travail pour le calcul des indicateurs dynamiques annuels d'éclairage naturel.

- *Températures d'air intérieur et de surface**

Pour montrer l'influence des apports solaires sur le comportement thermique du modèle, les températures de surface et d'air intérieur sont calculées pour les différentes variantes de la rue au cours d'une période de 5 jours, entre le 21 et le 26 septembre. Le programme éléments finis Cast3m a été utilisé pour réaliser les simulations thermiques et obtenir ces températures. Le problème thermique complet est considéré. Il inclut les échanges par convection, par conduction et par rayonnement. L'équation de la chaleur est résolue en régime transitoire permettant la prise en compte de l'inertie thermique. Il s'agit d'un travail d'équipe en cours. La contribution de cette thèse à ce travail concerne la partie radiative.

Deux parties distinctes du rayonnement sont considérées : le rayonnement à grande longueur d'onde et le rayonnement à courte longueur d'onde, c'est-à-dire les apports solaires.

Les apports solaires, calculés à partir de la méthode développée dans cette thèse, sont considérés comme des conditions limites : à partir des densités de flux absorbé calculés sur tous les carreaux de la peau du maillage volumique exposé au rayonnement, un flux est imposé sur chacun des nœuds correspondants.

Les échanges radiatifs à grande longueur d'onde sont calculés selon une méthode de radiosité classique du programme Cast3m en considérant les éléments comme des corps gris. Pour cela, les facteurs de vue calculés pour les apports solaires sont réutilisés.

Seules les propriétés optiques en ondes courtes varient selon les différents cas de la rue étudiée (Tableau 4.2). Les autres hypothèses de calcul sont identiques dans chacun des cas. Les propriétés des matériaux à savoir la conductivité k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], la densité d [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], la capacité thermique spécifique c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], et l'émissivité ε [-] sont mentionnées dans la Figure 4.7.

* La construction du modèle de la rue et l'attribution des propriétés thermiques ont été faites par Elena Garcia-Nevado et les simulations aux éléments finis ont été produites par Nicolas Duport.

Les simulations ont été réalisées avec un pas de temps d'une heure sur la période de 5 jours autour de l'équinoxe de septembre. Dans toutes les simulations, la température initiale des surfaces et de l'air à l'intérieur des bâtiments sont égales à celle de l'air extérieur. Pour éviter toute influence des conditions initiales, nos analyses reposent sur les résultats obtenus le dernier jour de la période étudiée.

Deux types de conditions aux limites doivent être définis pour résoudre le problème de transfert de chaleur. Les conditions aux limites de Dirichlet consistent à imposer la température de certains nœuds. Précisément, la température de l'air extérieur et du sol à 1.5 mètre de profondeur, extraites du fichier météorologique de Cordoue, sont imposées. Les conditions aux limites de Neumann consistent à imposer des flux sur des contours du domaine : le rayonnement provenant du ciel, à la fois en ondes courtes et en ondes longues. De plus, l'enceinte formée par la rue et le ciel n'est pas fermée du fait de leurs tailles. Ainsi, nous supposons que le modèle de la rue est entouré d'un sol infini à la température de l'air.

Afin d'obtenir la température de l'air intérieur des bâtiments, de nouveaux nœuds sont ajoutés au modèle. Ces nœuds échangent de l'énergie avec les surfaces environnantes de la pièce par convection. Selon les conditions de vent faible typiques de Cordoue, les coefficients de transfert de convection h extérieure sont constants et égaux à $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les toits et $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les surfaces à l'intérieur du canyon. Selon la réglementation thermique, les coefficients de convection intérieure sont égaux à $2.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les murs et $0.7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les surfaces horizontales (en supposant un flux descendant). Nous avons fixé un taux de renouvellement d'air constant égal à 1 vol.h^{-1} .

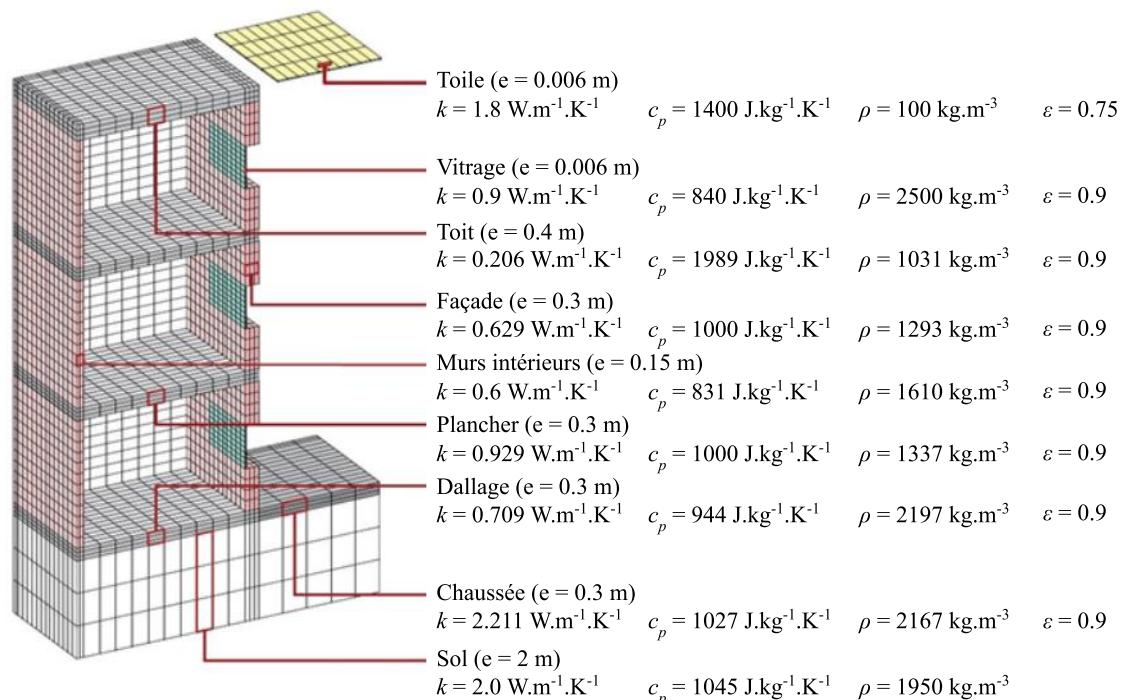


Figure 4.7 : Coupe du maillage volumique éléments finis et propriétés des matériaux de la rue.

4.3. Échelle du quartier : simulations du rayonnement solaire

4.3.1. Stratégie de maillage

Le modèle a été maillé finement pour permettre une évaluation spatiale précise de la distribution du rayonnement sur les différentes surfaces de la scène. Le maillage (Figure 4.8) réalisé avec le logiciel Rhinoceros est composé de 266 245 carreaux de dimension moyenne de 1.5 m x 1.5 m. Avec cette quantité de carreaux, la résolution par inversion du système des irradiances, de taille 266 245², est impossible (Figure 4.9).

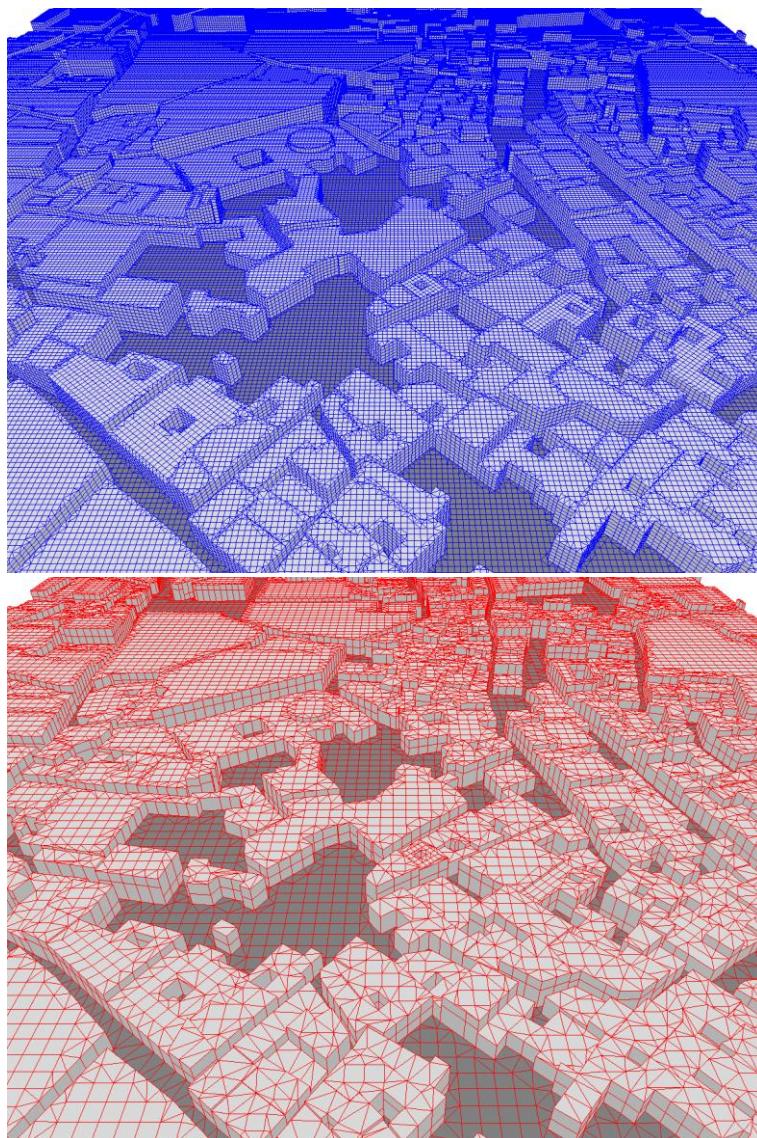


Figure 4.8 : Maillage fin (bleu) composé de 266 245 carreaux d'une surface moyenne de 2.10 m² et maillage secondaire (rouge) composé de 32 614 carreaux d'une surface moyenne de 17.22 m².

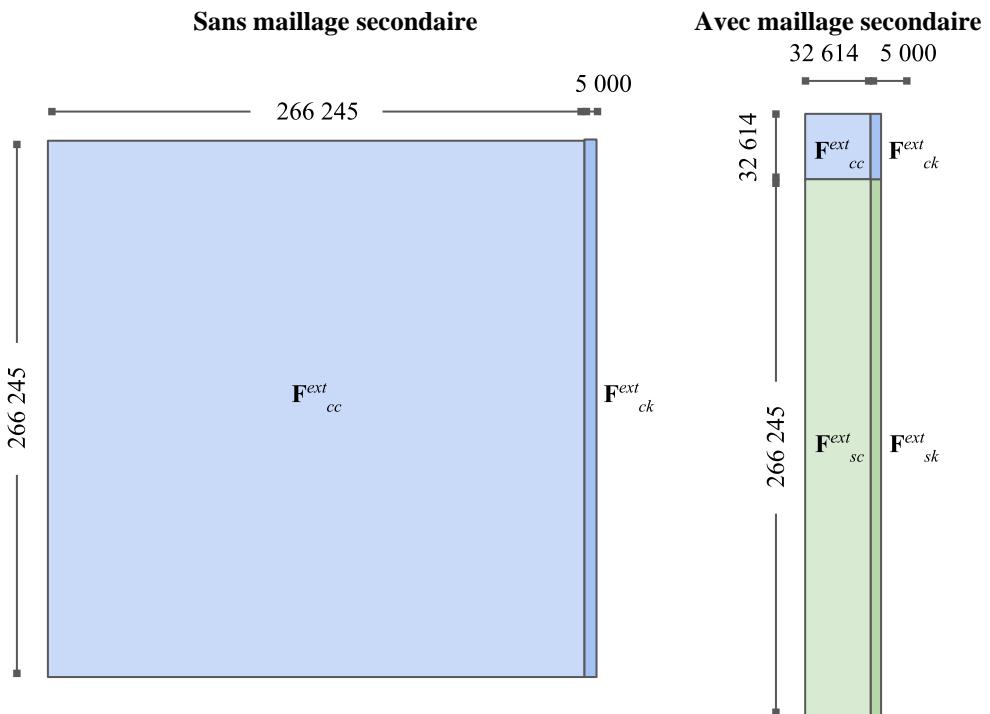


Figure 4.9 : Dimensions des matrices des facteurs de vue étendus avec et sans maillage secondaire. La représentation est proportionnelle aux dimensions des matrices.

Un maillage secondaire plus grossier est utilisé afin de pouvoir calculer les irradiances avec l’infinité des réflexions sur le maillage fin et réduire la consommation de mémoire. La méthode consiste à considérer les carreaux du maillage fin comme des capteurs à l’intérieur du maillage secondaire. Les carreaux du maillage fin ne sont pas visibles par les carreaux du maillage secondaire et n’interviennent pas lors du calcul des inter-réflexions diffuses. La taille du système à inverser ne dépend alors pas de la quantité de carreaux dans le maillage fin mais uniquement de la quantité de carreaux dans le maillage secondaire.

Le maillage secondaire généré contient 32 614 carreaux avec des dimensions moyennes de 4.14 m x 4.14 m. La résolution du système par inversion avec ce maillage est alors possible dans un temps raisonnable de 3 minutes et 40 secondes.

Les facteurs de vue sont décomposés en 4 parties (chapitre 2, section 2.4.3) : les facteurs de vue entre les carreaux du maillage secondaire F_{cc}^{ext} , les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage secondaire vers les tuiles de ciel F_{ck}^{ext} , les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage fin vers les carreaux du maillage secondaire F_{sc}^{ext} , et les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage fin vers les tuiles de ciel F_{sk}^{ext} . Une fois que le calcul radiatif complet est effectué entre les carreaux du maillage secondaire, les irradiances sont obtenues dans le maillage fin à partir des facteurs de vue étendus entre les carreaux du maillage fin et les carreaux du maillage secondaire F_{sc}^{ext} et du ciel F_{sk}^{ext} .

Avec cette stratégie, la partie reçue sur le maillage fin directement et par réflexions spéculaires depuis le ciel n’est pas impactée par l’utilisation d’un maillage secondaire plus grossier. Les seuls changements sont produits dans la distribution du rayonnement réfléchi de manière diffuse.

4.3.2. Temps de calcul, mémoire utilisée, et densité des matrices de facteurs de vue étendus

Modèle 100% diffus

Dans les variantes composées en totalité de surfaces diffuses, le temps de calcul des facteurs de vue prend 8 minutes (Tableau 4.3) avec 50 000 rayons émis par carreaux. La résolution du système par inversion de matrices prend 3 minutes et 40 secondes, soit un temps total de plus de 11 minutes.

Dans ce modèle, la densité de la matrice des facteurs de vue entre les carreaux de l'environnement bâti est très faible et se traduit par une petite partie de mémoire occupée par \mathbf{F}_{cc}^{ext} . \mathbf{F}_{cc}^{ext} n'est composée que de 0.31 % de valeurs non-nulles ce qui signifie qu'en moyenne un carreau de l'environnement bâti voit directement (et est vu par) 101 carreaux.

Tableau 4.3 : Densités, tailles et temps de calcul des matrices des facteurs de vue dans le modèle de Cordoue avec et sans les façades spéculaires.

\mathbf{F}^{ext}	Modèle 100% diffus	Modèle façades spéculaires
Densité	4.0 %	5.4 %
Taille (Mo)	6 680	9 010 (+ 26%)
Temps de calcul	8 min	28 min (x 3.5)

Modèle avec façades spéculaires

Dans la configuration avec les façades spéculaires, la partie étendue des facteurs de vue est non-nulle et implique donc de générer des rayons supplémentaires pour les échanges par réflexions spéculaires. Le calcul des facteurs de vue étendus est par conséquent plus long. En prenant en compte 6 réflexions spéculaires, le calcul dure 28 minutes (Tableau 4.3) avec le même nombre de rayons émis par carreaux, c'est-à-dire 3.5 fois plus de temps que dans le cas sans les façades spéculaires. Le temps de résolution par inversion de 3 minutes et 40 secondes, lui, n'est pas impacté. Le nombre de réflexions spéculaires à prendre en compte est discuté dans la section suivante.

Le temps de calcul des facteurs de vue étendus dépend du nombre de réflexions spéculaires. Ce temps converge lorsque l'on augmente le nombre de réflexion (Figure 4.10). La raison de cette convergence vient du fait qu'en se propageant à l'intérieur du modèle, les rayons ont de plus en plus de chance de rencontrer le sol ou le ciel et donc de voir leur trajet s'arrêter.

La matrice des facteurs de vue étendus obtenue est plus dense car plus de carreaux se voient les uns les autres par réflexions spéculaires. La densité de \mathbf{F}_{cc}^{ext} passe de 0.31 % à 0.83 % ce qui signifie qu'un carreau du maillage secondaire voit en moyenne 271 autres carreaux directement et par réflexion spéculaire, soit 170 de plus que dans le modèle sans les façades spéculaires.

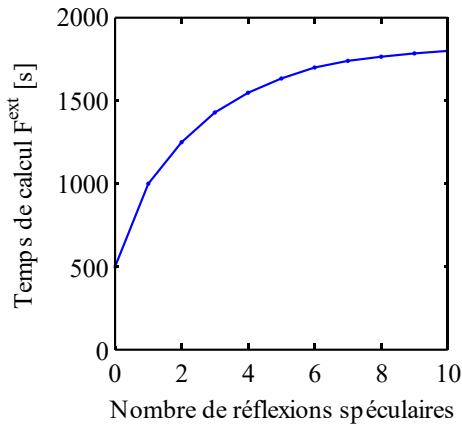


Figure 4.10 : Temps de calcul des facteurs de vue étendus en fonction du nombre de réflexions dans la variante spéculaire du modèle.

4.3.3. Nombre de réflexions

Le but de cette section est de donner un ordre de grandeur des erreurs faites lorsque le nombre des réflexions prises en compte lors des calculs radiatifs est limité. La figure 4.11 représente le nombre de réflexions diffuses nécessaires pour que l'erreur relative des irradiances obtenues le 26 septembre à 9 heures soit inférieure à 5 % sur chaque carreau de la rue à façades claires. Les toitures sont volontairement placées hors échelle car elles nécessitent très peu de réflexions en comparaison des façades et du sol.

Le nombre de réflexions nécessaire pour parvenir à moins de 5 % d'erreur varie de 1, pour les espaces avec peu d'obstruction comme au centre des places, à 10 pour les carreaux situés dans les rues les plus étroites et dans les cours centrales disposant d'un accès direct restreint au ciel. Les résultats montrent que ces nombres ne varient que très peu selon les différentes conditions de ciel.

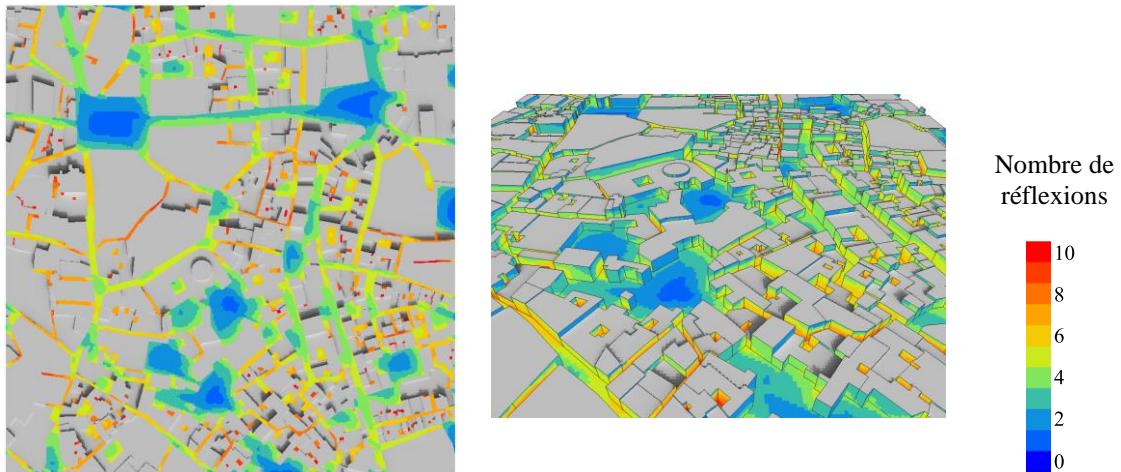


Figure 4.11 : Nombre de réflexions nécessaires par carreau pour une erreur d'irradiance inférieure à 5% dans la rue claire le 26 septembre à 9h.

Cependant, le besoin en nombre de réflexions dépend des propriétés des surfaces qui composent le modèle. La Figure 4.12 représente pour chaque nombre de réflexion pris en compte, de 0 à 10, la proportion de façade, de sol et de toiture comportant une erreur relative d'irradiance inférieure

à 5 % dans les variantes du modèle avec les surfaces diffuses normales, avec les façades spéculaires et avec les surfaces diffuses claires. A réflectance équivalente, les écarts entre les modèles diffus et spéculaires sont faibles. On constate une convergence légèrement plus rapide pour les surfaces de toiture et du sol avec les façades spéculaires. Le rayonnement provenant du ciel atteint plus rapidement le sol grâce à l'aspect directionnel des réflexions spéculaires.

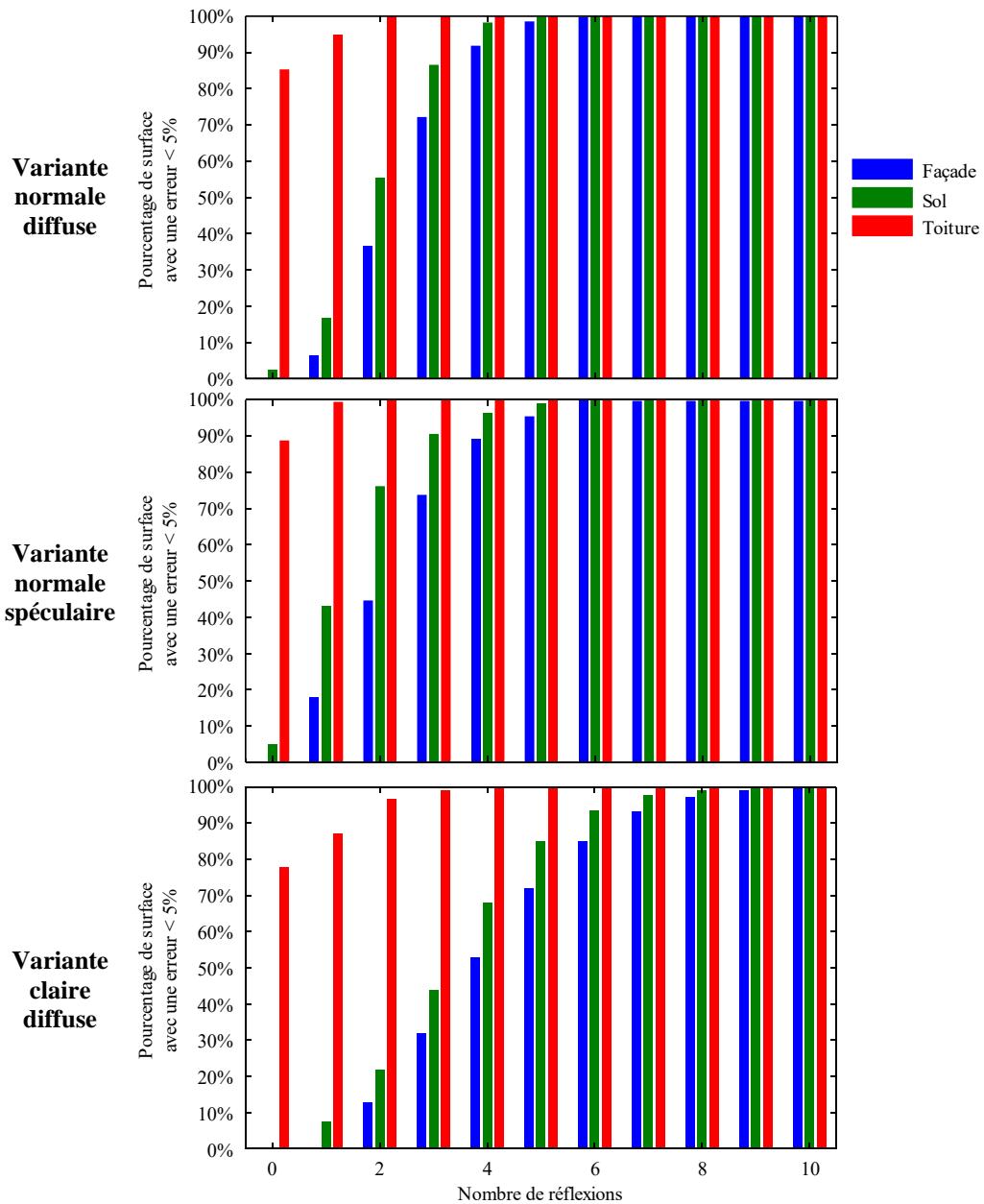


Figure 4.12 : Pourcentage de façade, sol et toiture avec une erreur relative d'irradiance inférieure à 5% en fonction du nombre de réflexions dans la variante diffuse normale, spéculaire normale, et diffuse claire.

4.4. Échelle du quartier : résultats

4.4.1. Différences de potentiel solaire annuel

Le Tableau 4.4 regroupe les rayonnements solaires annuels totaux, la partie parvenant après réflexions et la partie absorbée par les façades, le sol et les toitures et l'ensemble des surfaces du quartier pour les quatre variantes étudiées. Le potentiel solaire de l'ensemble varie significativement selon les différentes variantes. Par exemple, le rayonnement solaire total pour la variante claire est 16 % plus grand ($+ 172 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) que celui de la variante sombre. Cette différence est due à un rayonnement reçu par inter-réflexions plus important. Cette portion du rayonnement représente entre 7% et 20% du potentiel solaire de l'ensemble du quartier.

Si l'on décompose ce rayonnement selon les types de surface, les toitures, qui représentent 38% des surfaces du modèle, ne sont que très peu impactées par les différentes variantes car l'essentiel du rayonnement y parvient de manière directe. Des écarts plus importants se produisent sur les façades et le sol du modèle. Les façades sont les surfaces pour lesquelles le rayonnement reçu par réflexion représente la plus grande portion. Cette fraction représente 21% du rayonnement total dans la variante sombre et atteint 47 % dans la variante claire soit presque la moitié de son potentiel solaire total.

Il n'y a pas de différence sur les façades entre spéculaire et diffus à réflectances équivalentes pour les cumuls annuels. La quantité de rayonnement reçue et la proportion que représentent les réflexions sont aussi très proches. En revanche, le sol reçoit beaucoup plus avec les façades spéculaires car la propagation du rayonnement en partie basse des rues est facilitée.

Tableau 4.4 : Rayonnement solaire annuel [$\text{kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$] reçu total, reçu par réflexion et absorbé par les façades, le sol et les toitures dans les 4 variantes étudiées.

	Rayonnement solaire annuel [$\text{kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$]	Façade 46 %	Sol 16 %	Toiture 38 %	Ensemble du modèle
Normale Diffuse	Reçu total	700	1053	1781	1167
	Reçu par réfl.	241 (34 %)	175 (17 %)	29 (2 %)	150 (13 %)
	Absorbé	350	737	267	380
Normale Spéculaire	Reçu total	692	1265	1789	1201
	Reçu par réfl.	234 (34 %)	387 (31 %)	38 (2 %)	184 (15 %)
	Absorbé	346	886	268	403
Sombre Diffuse	Reçu total	592	963	1768	1099
	Reçu par réfl.	134 (23 %)	84 (9 %)	17 (1 %)	81 (7 %)
	Absorbé	415	867	265	430
Claire Diffuse	Reçu total	863	1195	1795	1271
	Reçu par réfl.	405 (47 %)	316 (26 %)	44 (2 %)	253 (20 %)
	Absorbé	259	597	269	317

4.4.2. Différence à un instant de la distribution du rayonnement solaire

La Figure 4.13 représente les différences d'irradiances entre la variante spéculaire et la variante diffuse le 26 septembre à 10h heure solaire. Une différence positive signifie ici que plus de rayonnement est reçu dans la variante spéculaire. Les mêmes observations faites à partir du rayonnement annuel sont vérifiées à cet instant : le sol reçoit davantage de rayonnement grâce aux réflexions spéculaires des façades et les façades reçoivent sensiblement la même quantité de rayonnement. En revanche, la répartition du rayonnement est différente sur les façades. De manière générale, dans la variante spéculaire, moins de rayonnement est reçu en partie supérieure et plus en partie inférieure.

La Figure 4.14 montre les irradiances et la fraction que représente la partie réfléchie au même moment dans les quatre variantes. Les toitures sont volontairement représentées hors-échelle car une très faible partie de ces surfaces reçoit du rayonnement par réflexion. Les changements produits par réflexion dans les différentes variantes sont les plus visibles sur les façades orientées vers l'Ouest positionnées dans la partie droite des graphiques. En effet, à cet instant, les façades d'en face reçoivent le rayonnement direct du soleil dans la direction Est et le réfléchissent.

Avec des surfaces spéculaires, des points de concentration du flux solaire apparaissent au niveau du sol et des façades. Ce type de phénomène peut notamment être à l'origine d'inconfort visuel et thermique pour les personnes. La fraction reçue par réflexion dans les trois variantes diffuses est répartie de manière beaucoup plus homogène sur les façades et le sol.

Des différences d'irradiances de l'ordre de 100 W.m^{-2} sont observés sur les façades Ouest entre la variante claire et diffuse. Sur la majorité de ces façades, la fraction de l'irradiance reçue par réflexion atteint les 75 % dans la variante claire, tandis qu'elle ne dépasse que très rarement les 40 % dans la variante sombre. De manière générale dans les quatre cas étudiés, la partie reçue par réflexion atteint les valeurs maximales dans les endroits les plus clos, c'est-à-dire les rues étroites et les cours centrales.



Figure 4.13 : Différences d'irradiance entre la rue normale spéculaire et normale diffuse (variante spéculaire – variante diffuse).

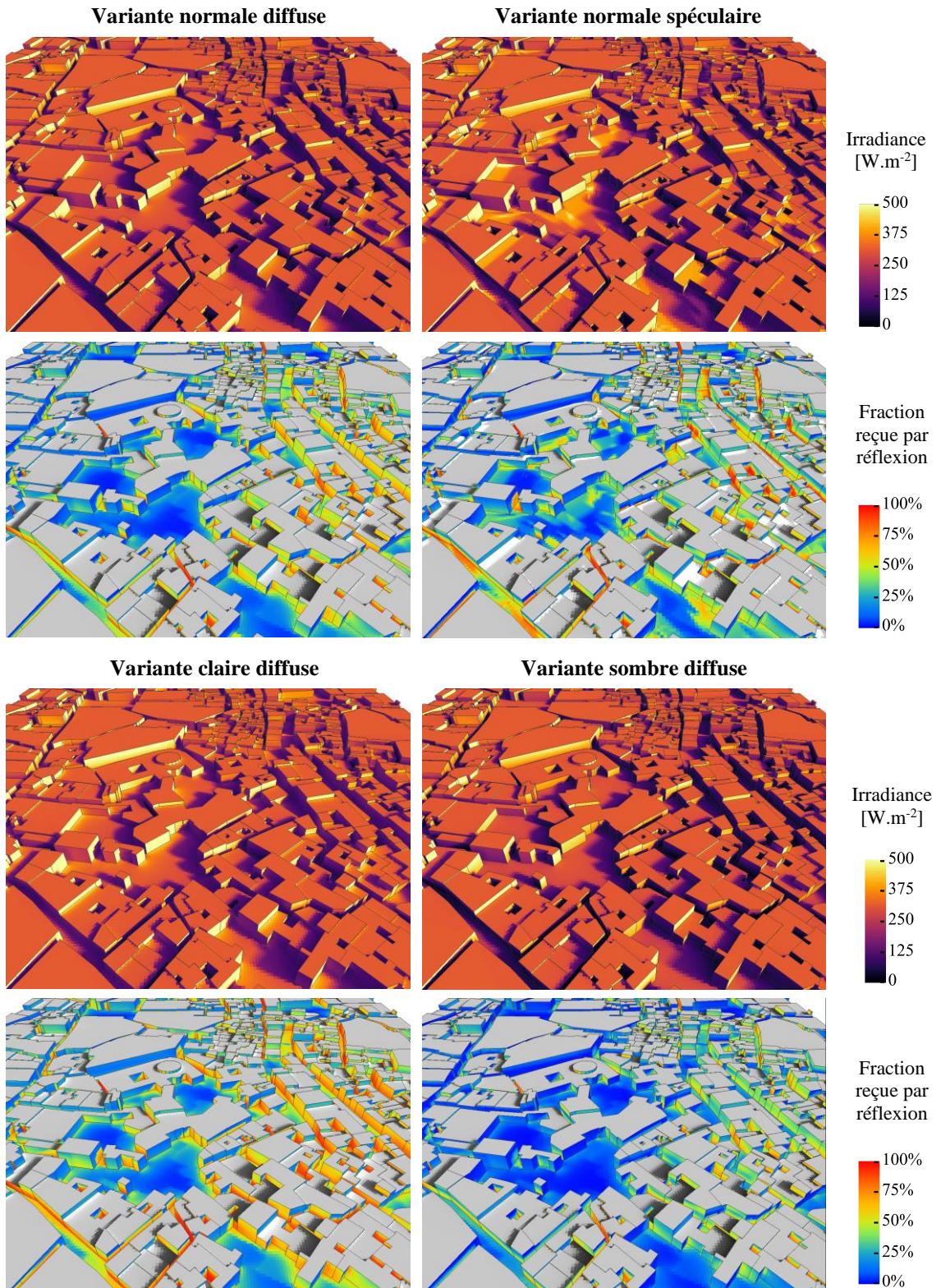


Figure 4.14 : Irradiances et fractions reçues par réflexion dans les 4 variantes le 26 septembre à 10h.

4.5. Échelle de la rue : simulation du rayonnement solaire

4.5.1. Stratégie de maillage

Maillage élément fini et maillage secondaire

Le maillage sur lequel sont calculés les apports solaires correspond à la peau du maillage volumique utilisé pour les simulations thermiques en éléments finis (Figure 4.15). Dans ce modèle une quantité importante de carreaux sont exposés aux rayonnements (76 980 carreaux). Comme pour le modèle du quartier de Cordoue étudié dans les sections précédentes, cette quantité de carreaux implique des tailles de matrices des facteurs de vue conséquentes, et donc l'utilisation d'une mémoire importante et des temps de calcul longs pour la résolution du système des irradiances.

La même stratégie que pour le modèle du quartier est utilisée ici afin de pallier ces problèmes de mémoire et de temps de calcul. Le maillage fin est considéré comme un maillage fictif de capteur à l'intérieur d'un maillage secondaire plus grossier composé de 12 010 carreaux (Figure 4.15). Une étude est effectuée pour montrer l'intérêt d'avoir recours à cette stratégie. La précision, les temps de calcul et la mémoire utilisée avec et sans cette méthode de maillage fictif sont comparés.

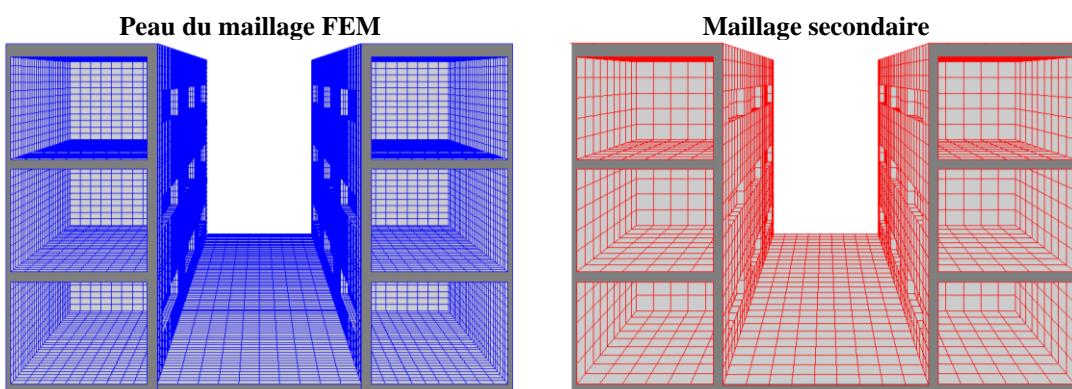


Figure 4.15 : À gauche, coupe du maillage de la rue, provenant du maillage volumique pour les simulations thermiques en éléments finis, composé de 76 980 carreaux avec une aire moyenne de $0,057m^2$ ($0,23*0,23$). À droite, coupe du maillage secondaire de la rue composé de 12 010 carreaux avec une aire moyenne de $0,367m^2$ ($0,6*0,6m$).

4.5.2. Temps de calcul, mémoire utilisée, et densité des facteurs de vue étendus

Temps de calcul

Pour le calcul de la matrice des facteurs de vue étendus, avec 100 000 rayons par carreaux, les temps de calcul sont proches pour les deux méthodes. 4 minutes 10 secondes sont nécessaires sans l'utilisation du second maillage, et 4 minutes 51 secondes avec. Le temps de calcul est plus long avec l'utilisation du second maillage car les facteurs de vue étendus doivent être calculés à partir des carreaux des deux maillages.

Concernant la résolution du système, il est impossible de l'effectuer par inversion sans le second maillage. Le temps de calcul que cela impliquerait est beaucoup trop long. Une résolution par itération de Jacobi est alors effectuée en prenant en compte 12 réflexions pour la comparaison entre les deux méthodes. 1 heure et 18 minutes, sans le second maillage, et 36 secondes, avec le second maillage, sont nécessaires pour résoudre le système par itération. Avec l'utilisation du second maillage, il est possible de résoudre le système par inversion en 12 secondes. Au total, l'utilisation du second maillage permet de passer d'un calcul de 1 heure et 22 minutes à un calcul d'environ 5 minutes.

Taille et densité des matrices des facteurs de vue étendue

Sans l'utilisation du maillage secondaire, la matrice des facteurs de vue étendus (Figure 4.16) est uniquement composée de : \mathbf{F}_{cc}^{ext} , les facteurs de vue entre les carreaux du maillage fin ; \mathbf{F}_{ck}^{ext} les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage fin vers les tuiles de ciel. L'ensemble a une densité de 6.1 % et une taille totale de 7 636 Mo.

Avec l'utilisation du maillage secondaire, la matrice des facteurs de vue étendus (Figure 4.16) est composée de : \mathbf{F}_{cc}^{ext} , les facteurs de vue entre les carreaux du maillage secondaire ; \mathbf{F}_{sc}^{ext} les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage secondaire vers les tuiles de ciel ; \mathbf{F}_{sk}^{ext} les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage fin vers les carreaux du maillage secondaire ; et \mathbf{F}_{ck}^{ext} les facteurs de vue depuis les carreaux du maillage fin vers les tuiles de ciel. L'ensemble a une densité de 8 % et une taille totale de 1 943 Mo soit quatre fois plus petite que sans l'utilisation du maillage secondaire.

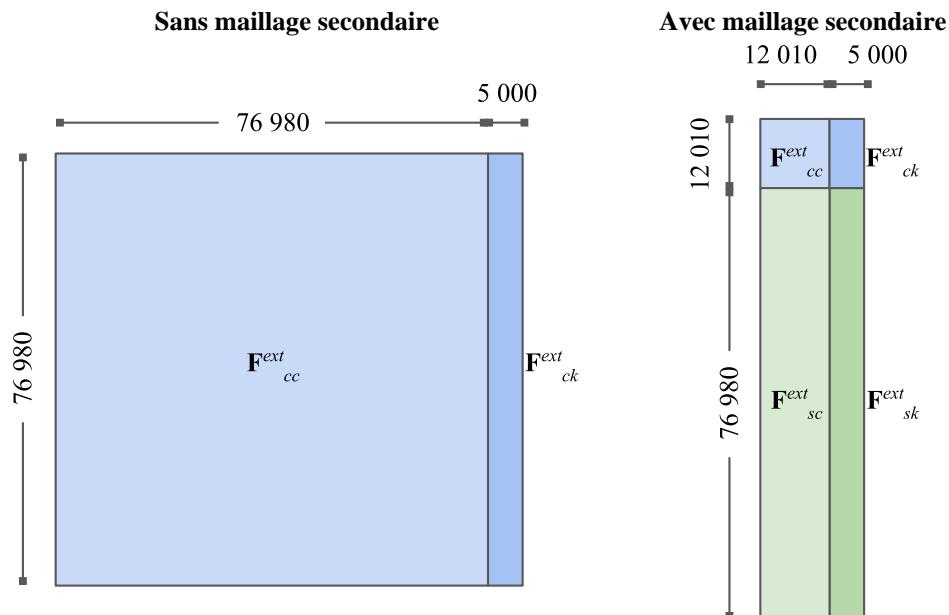


Figure 4.16 : Dimensions des matrices des facteurs de vue étendus avec et sans maillage secondaire. La représentation est proportionnelle aux dimensions des matrices.

Précision

Les irradiances calculées sans et avec l'utilisation du maillage secondaire au midi solaire le 26 septembre sont présentées dans la Figure 4.17. Cet instant a été choisi car c'est avec un ciel clair et une composante directe du ciel importante que les plus grands écarts entre les deux méthodes sont obtenus. Comme expliqué plus haut, il est très difficile de résoudre le système des irradiances par inversion sans l'utilisation du maillage secondaire. La comparaison est donc faite avec une résolution par itération (12 réflexions) dans les deux cas.

Les résultats obtenus avec le maillage secondaire sont très proches de ceux obtenus sans le maillage secondaire. Un écart absolu de plus d'1 W.m⁻² est obtenu seulement sur 6% des carreaux de la scène. La Figure 4.18 montre les différences d'irradiances et les différences relatives entre les irradiances sans et avec le maillage secondaire. Les plus grands écarts d'irradiances sont obtenus à proximité des encadrements de fenêtres et les plus grandes erreurs relatives sont obtenues dans les intérieurs où les niveaux d'irradiance sont les plus faibles. L'écart relatif entre les flux totaux reçus sur toute la scène est de 0.26 %. Durant l'année, cet écart est relativement constant et les plus grandes différences sont perçues dans les conditions de ciel dégagé. Si l'on compare le rayonnement solaire annuel reçu sur toute la scène entre les deux méthodes, l'écart relatif est de 0.16%.

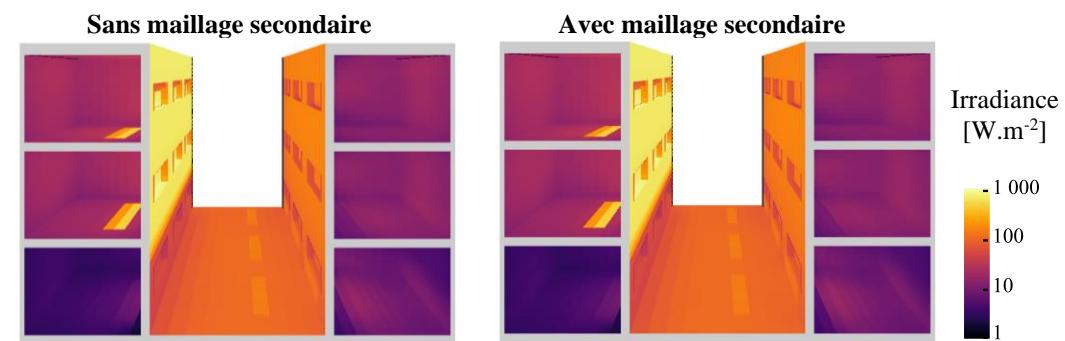


Figure 4.17 : Irradiances calculées avec les deux maillages A (gauche) et B (droite) le 26 septembre à 11h.

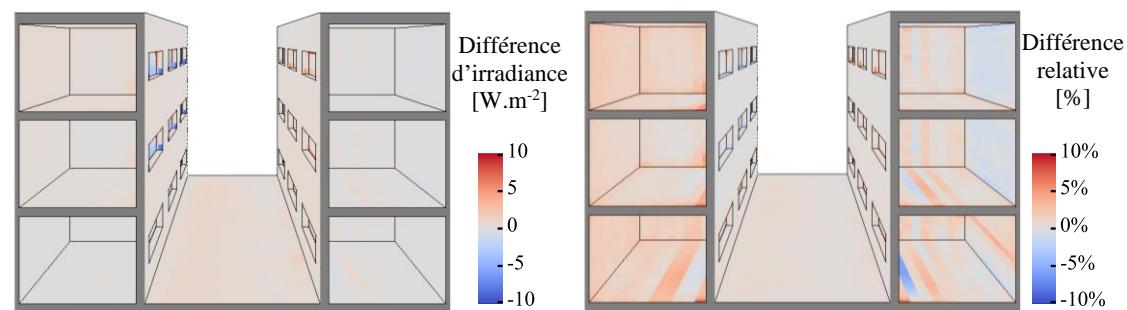


Figure 4.18 : Différence d'irradiance et différence relative entre les irradiances calculées avec les deux maillages (le maillage A est pris pour référence).

4.5.3. Nombre de réflexions

Le but de cette section est de mettre en avant l'intérêt de calculer rapidement l'infinité des réflexions diffuses. Limiter le nombre de réflexions lors du calcul radiatif peut produire des erreurs sur les indicateurs thermiques et d'éclairage et donne une analyse faussée des conditions réelles. Plus précisément, limiter le nombre de réflexions à une certaine limite produit une sous-estimation du rayonnement perçue par les surfaces et les capteurs. Il est alors nécessaire de fixer cette limite à une valeur suffisamment haute pour ne pas produire des erreurs trop grandes. Pour cette étude, nous nous plaçons dans la variante claire de la rue où les échanges par inter-réflexions sont les plus importants.

Convergence des résultats en fonction du nombre de réflexion

Dans un premier temps la convergence des irradiances en fonction du nombre de réflexion est étudiée. La Figure 4.19 représente le nombre de réflexions nécessaires pour parvenir à une erreur d'irradiance inférieure à 5% par carreau. La partie où le nombre de réflexions nécessaire est le moins élevé est la partie de la façade sud exposée au rayonnement direct du soleil. Pour ces surfaces, après deux réflexions l'erreur relative est inférieure à 5%. Sur les surfaces extérieures de la rue ce nombre monte jusqu'à cinq en partie inférieure de la façade sud.

Dans les espaces intérieurs le besoin en nombre de réflexions sur les surfaces exposées au rayonnement direct à travers les vitrages est entre deux et trois réflexions. En revanche, ce nombre peut atteindre douze réflexions dans les espaces intérieurs les moins bien éclairés comme au rez-de-chaussée. Même si ces espaces reçoivent une quantité de rayonnement très faible, produire des erreurs de plus de 5 % sur le rayonnement engendre des biais conséquents sur le calcul des indicateurs de lumière naturelle.

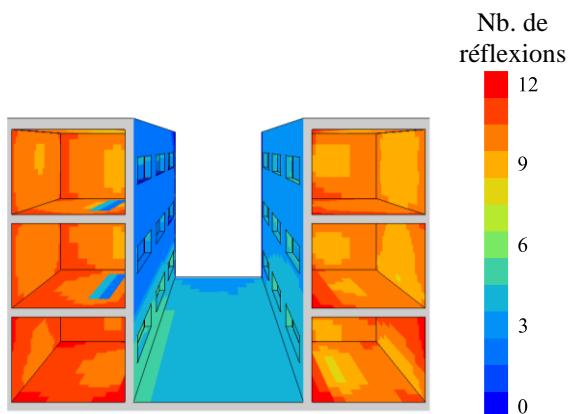


Figure 4.19 : Nombre de réflexions nécessaires pour obtenir une erreur relative des irradiances inférieure à 5% par carreau dans la rue claire le 26 septembre à midi (solaire).

Effet sur les températures et les éclairements

Les erreurs engendrées sur les températures et les éclairements avec trois réflexions sont présentées. D'après la Figure 4.20, avec ce nombre de réflexion, les erreurs relatives d'irradiance sont inférieures à 5% sur les carreaux exposés directement au rayonnement direct du soleil. Les erreurs absolues d'irradiances perçues ne dépassent pas 36 W.m^{-2} dans toute la scène.

La Figure 4.21 compare les températures et les éclairements obtenus avec l'infinité des réflexions et en considérant trois réflexions. Cette approximation engendre des erreurs sur les températures de surface de -0.6°C (point D) et de température d'air intérieur de -1.3°C dans la pièce exposé au Sud au 1^{er} étage. Concernant les éclairements, cette approximation provoque également de fortes erreurs. Les niveaux d'éclairement perçus dans la pièce du rez-de-chaussée face au sud sont généralement inférieurs à 100 lux avec 3 réflexions. Or, ces niveaux sont en réalité largement au-dessus de ce seuil partout dans la pièce grâce aux inter-réflexions.

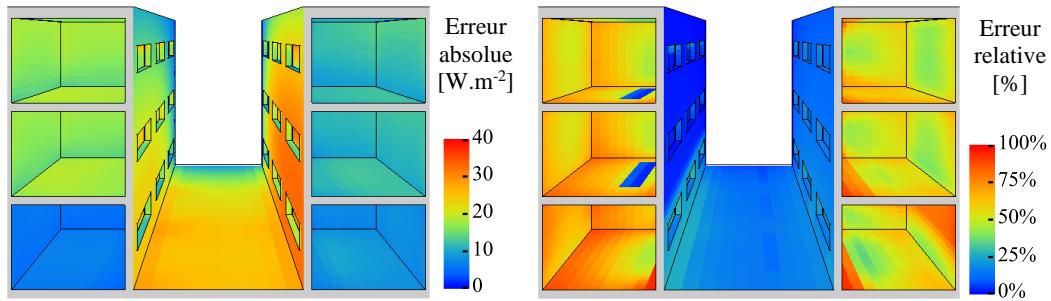


Figure 4.20 : Erreurs absolues (gauche) et erreurs relatives (droite) sur les irradiances en ne considérant que 3 réflexions diffuses dans la rue claire le 26 septembre à midi (solaire).

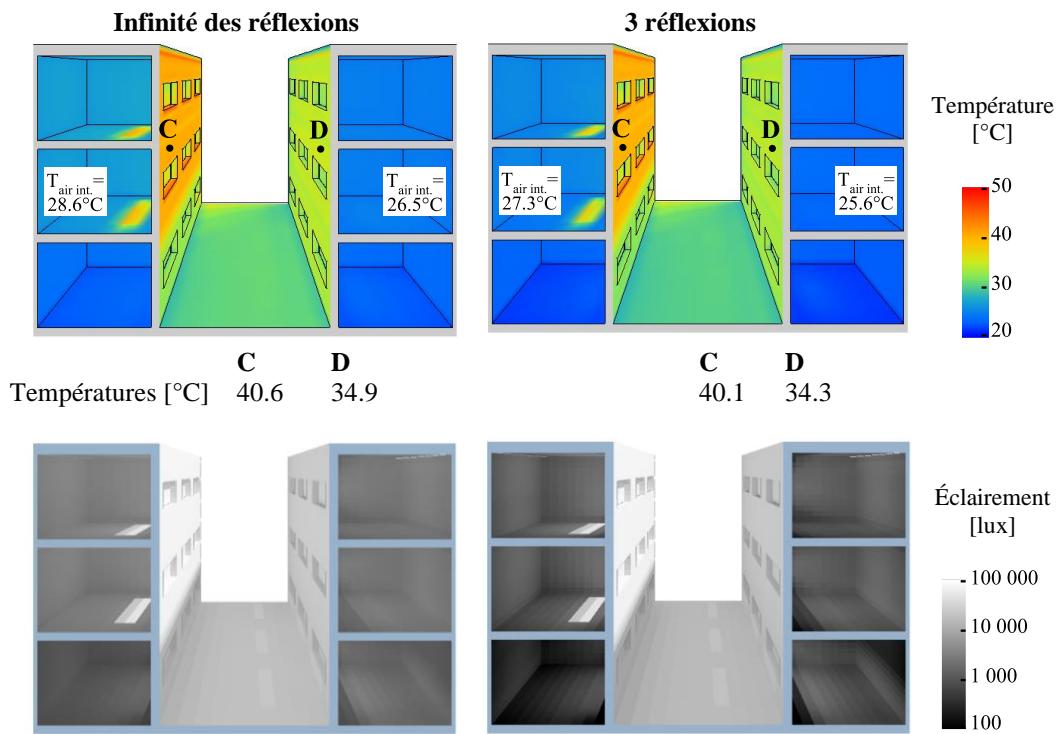


Figure 4.21 : Températures et éclairements calculés dans la rue claire le 26 septembre à midi (solaire) avec l'infinité des réflexions (gauche) et avec 3 réflexions diffuses (droite).

4.6. Échelle de la rue : résultats

4.6.1. Effets produits par des modes de réflexion différents

La Figure 4.22 représente les températures de surfaces, les densités de flux absorbés et les éclairements obtenus le 26 septembre à midi (solaire) dans le cas de la rue diffuse et de la rue spéculaire. La réflexion du rayonnement direct du soleil par réflexion spéculaire sur la façade sud produit des apports solaires plus importants en partie basse de la rue, avec pour résultat, des températures de surface plus élevées. Au niveau du point B positionné en bas de la façade nord, des écarts de densité de flux absorbé de + 107 W.m⁻² et de température de + 5 °C sont constatés. La réflexion spéculaire produite par la façade permet au rayonnement direct de pénétrer à l'intérieur de la pièce du rez-de-chaussée. En combinant cela à une densité de flux plus importante sur la façade, la température d'air intérieur est supérieure de + 0.6 °C.

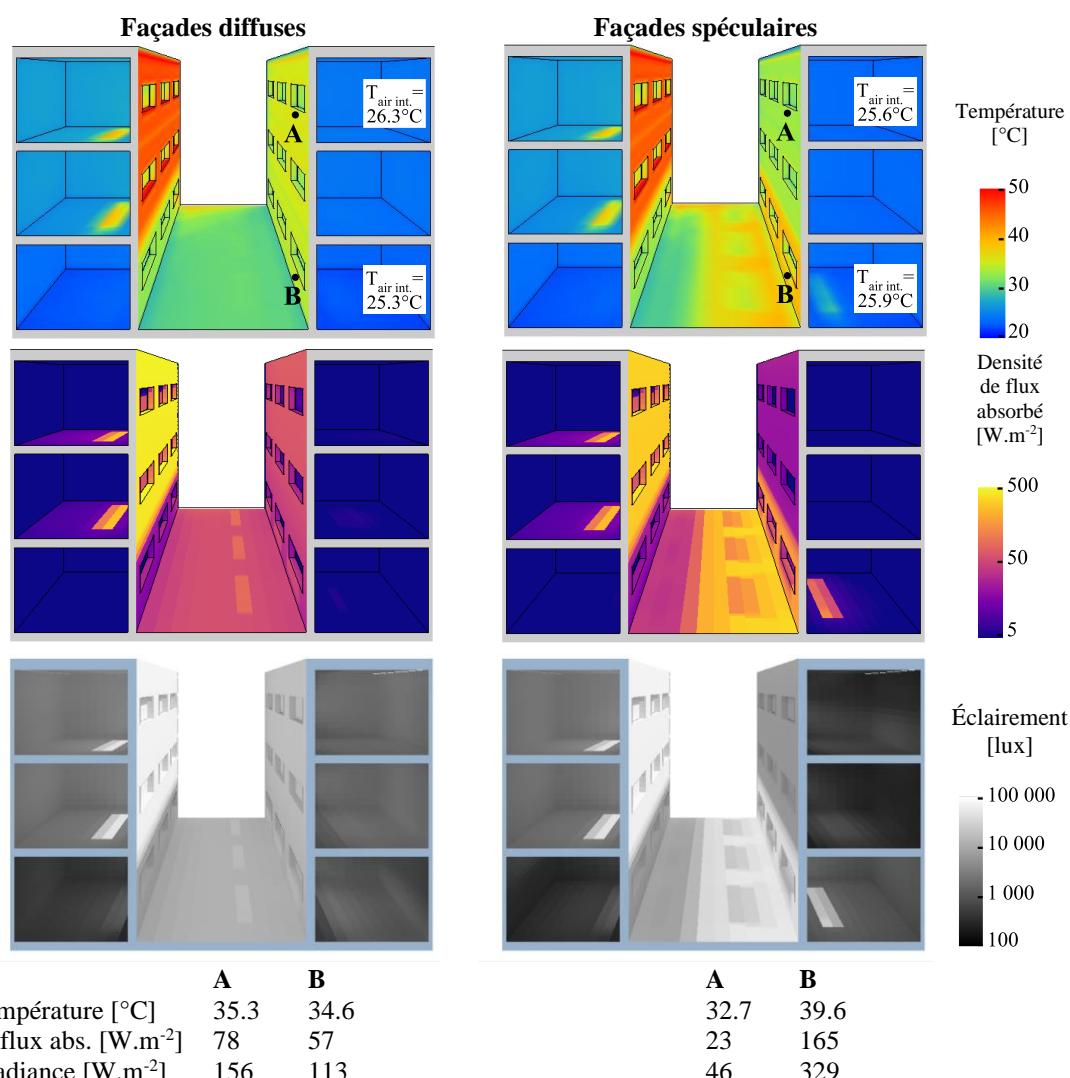


Figure 4.22 : Températures de surface, densités de flux absorbé, et éclairements à midi (solaire) le 26 septembre dans la rue normale diffuse et la rue normale spéculaire.

À l'opposé, le rayonnement solaire étant redirigé en partie basse de la rue avec les façades spéculaires, la partie haute de la rue reçoit donc moins de rayonnement. Au point A, la densité de flux absorbé est plus grande de + 55 W.m⁻² et la température de surface est plus chaude de + 2.6°C avec les façades diffuses. La température d'air intérieur obtenue à cet instant dans la pièce au niveau du point A est plus chaude de + 0.7°C grâce à la réflexion diffuse de la façade sud.

La Figure 4.23 représente les températures de surface et les densités de flux absorbé obtenues au cours du 26 septembre entre 8h et 16h (solaires) pour les deux types de façade. Dans les deux cas, la distribution du rayonnement donne la tendance d'évolution des températures de surfaces intérieures et extérieures. Par exemple, les ombres portées et les réflexions spéculaire, clairement visibles sur les densités de flux absorbées, sont aussi nettement identifiables sur les températures de surface.

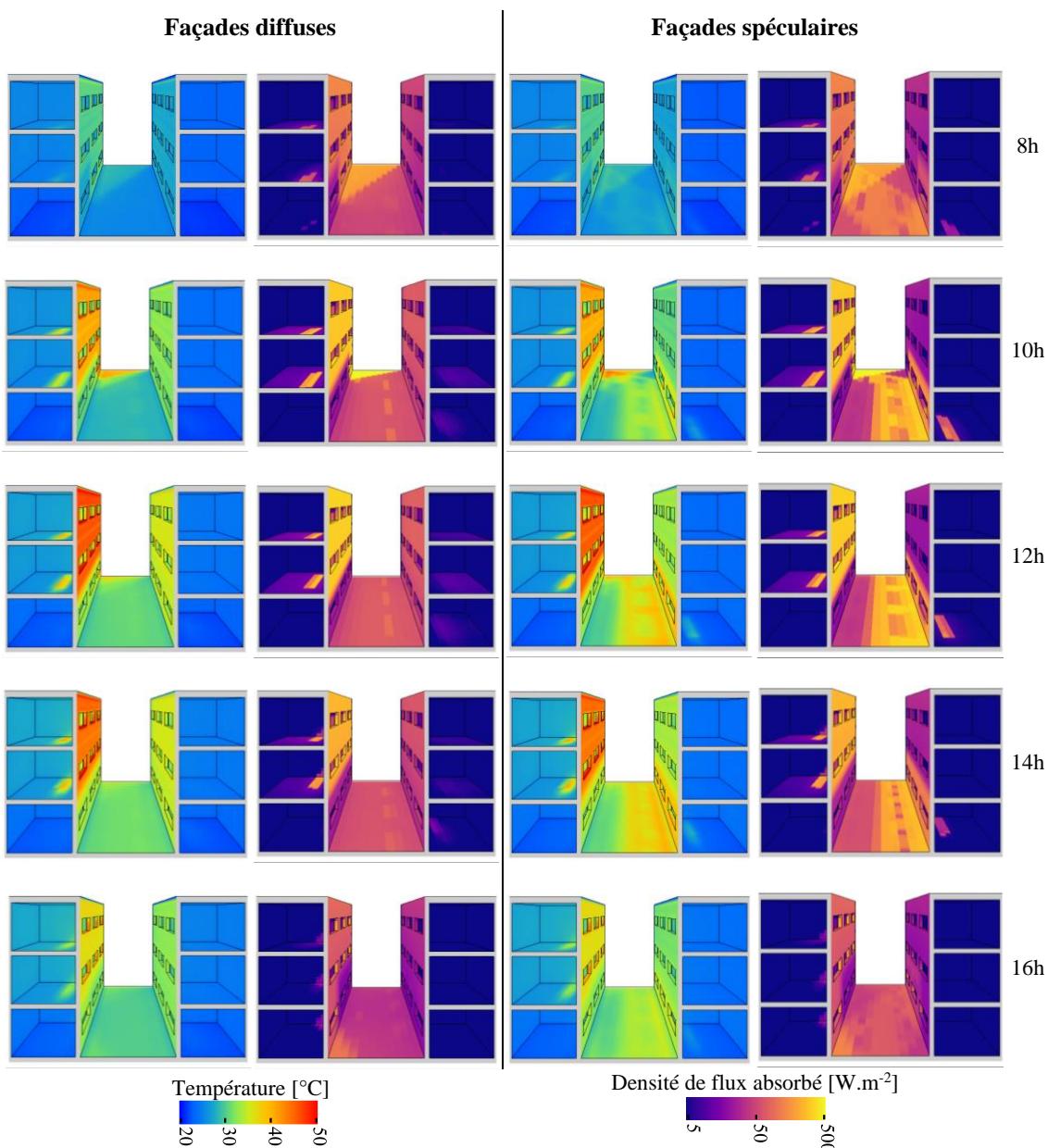


Figure 4.23 : Températures de surface et densité de flux absorbé entre 8h et 16h le 26 septembre dans la rue normale diffuse et normale spéculaire.

La redirection du rayonnement solaire en partie basse de la rue par réflexion spéculaire a aussi un impact sur les conditions d'éclairement. Les éclairements instantanés dans les pièces exposées au nord présentés dans la Figure 4.24 sont différents dans les deux cas. Le rez-de-chaussée perçoit plus de lumière grâce aux réflexions spéculaires.

Cette tendance est également observée dans les performances annuelles d'éclairage naturel présentées en Figure 4.24. Au 1^{er} étage, la DA₅₀₀ médiane est de 65 % avec les façades diffuses et de 54 % avec les façades spéculaires. Les éclairements sont distribués différemment au cours de l'année. Au rez-de-chaussée par exemple, des éclairements plus importants sont perçus autour des deux équinoxes grâce aux réflexions.

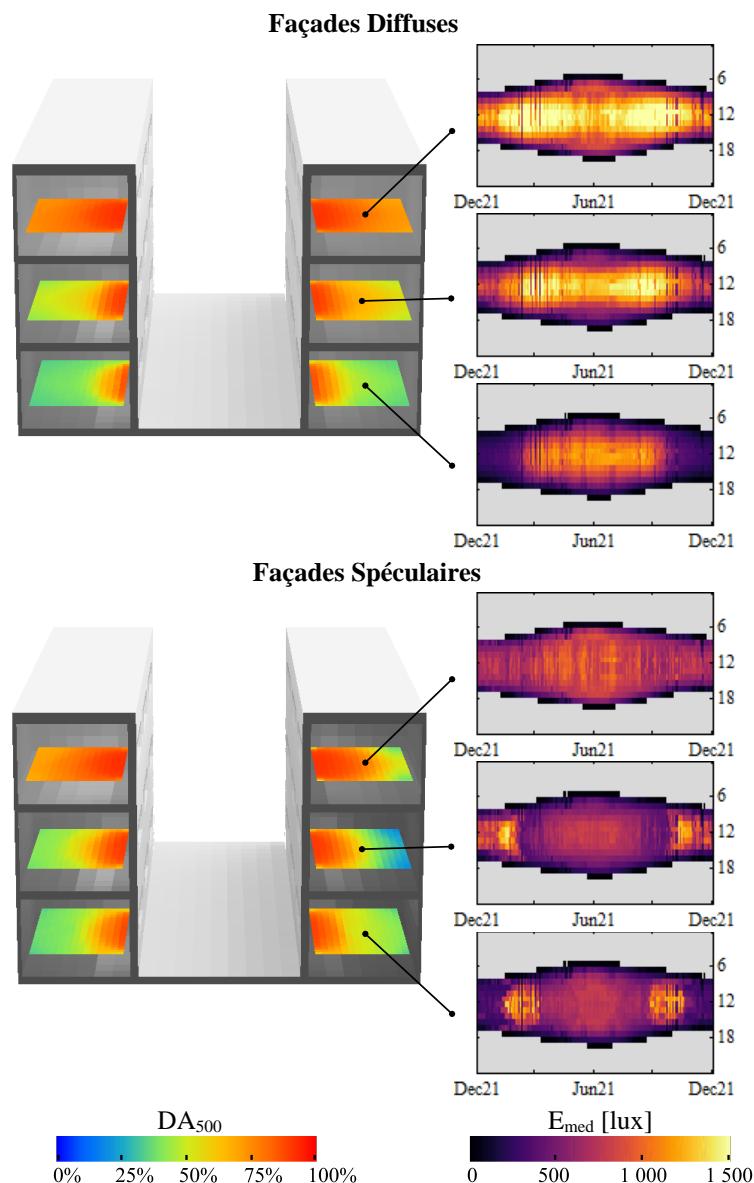


Figure 4.24 : DA₅₀₀ et calendrier des éclairements médians dans les pièces exposées au nord pour les variantes avec les façades diffuses et spéculaires.

4.6.2. Effets produits par des réflectances différentes

La Figure 4.25 représente les températures de surface, les densités de flux absorbé, et les éclairements obtenus le 26 septembre à midi (solaire) dans la rue claire diffuse et la rue sombre diffuse. A cause de la différence d'absorptance, la façade sud exposée aux rayons directs du soleil absorbe une densité de flux nettement plus grande dans la rue sombre et se traduit par une température de surface au point C de 10 °C de plus que la rue claire.

Concernant la façade nord, les densités de flux absorbé et les températures de surface au point D sont sensiblement identiques. En revanche, les irradiances perçues sur ce point sont 2.5 fois plus importantes dans la rue claire à cause des réflectances plus grandes. Contre intuitivement, la température d'air intérieure au 1^{er} étage exposé nord est plus élevée dans la rue claire (26.5 °C) que dans la rue sombre (25.8 °C). En effet, même si la façade absorbe la même densité de flux et est quasiment à la même température dans les deux cas, une plus grande quantité de rayonnement traverse les ouvertures pour atteindre les surfaces intérieures. 626 W parviennent à l'intérieur à cet instant dans la rue claire et seulement 253 W dans la rue sombre.

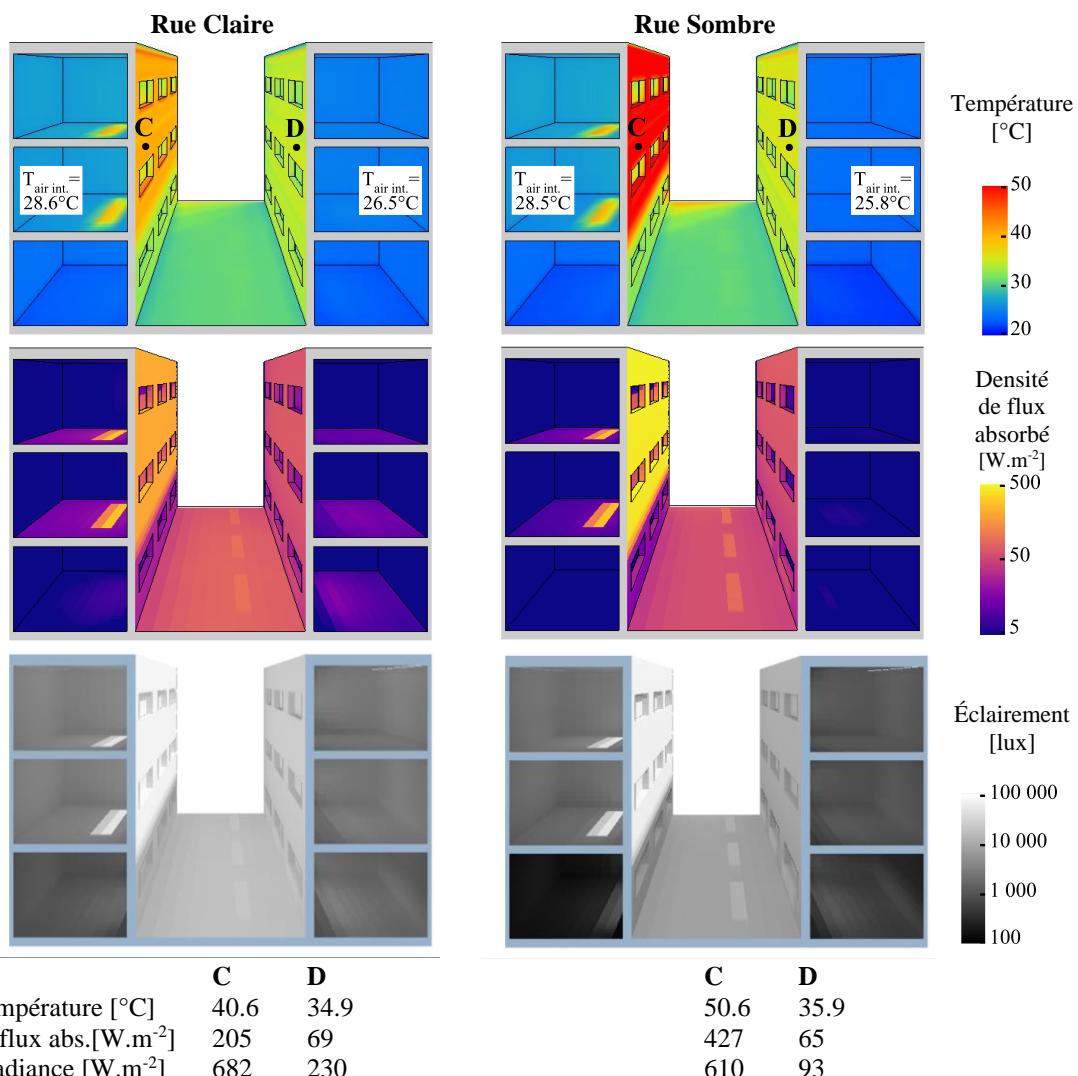


Figure 4.25 : Températures de surface, densités de flux absorbé, et éclairements au midi solaire le 26 septembre dans la rue claire diffuse et la rue sombre diffuse.

L'effet des inter-réflexions produites dans la rue est nettement plus remarquable lorsque l'on s'intéresse à l'éclairage. La Figure 4.26 montre les DA₅₀₀ et le calendrier annuel des éclairements médians obtenus dans les 3 pièces de orientées nord dans la rue claire et dans la rue sombre. La DA₅₀₀ médiane obtenue dans la pièce du rez-de-chaussée exposée nord, pièce la moins bien desservie, est de 68 % dans la rue claire et de 11% dans la rue sombre ce qui démontre une fréquence des conditions d'éclairage de qualité nettement supérieure grâce aux inter-réflexions dans la rue claire. Ces inter-réflexions permettent également de réduire les écarts de performance d'éclairage entre les différents étages. Il est aussi intéressant de constater que les niveaux de DA₅₀₀ sont proches dans les deux orientations du fait de la proximité des deux façades. D'après le calendrier des éclairements, même si les niveaux d'éclairements observés sont très différents notamment pour la pièce du rez-de-chaussée la répartition des éclairements au cours de l'année est relativement similaire.

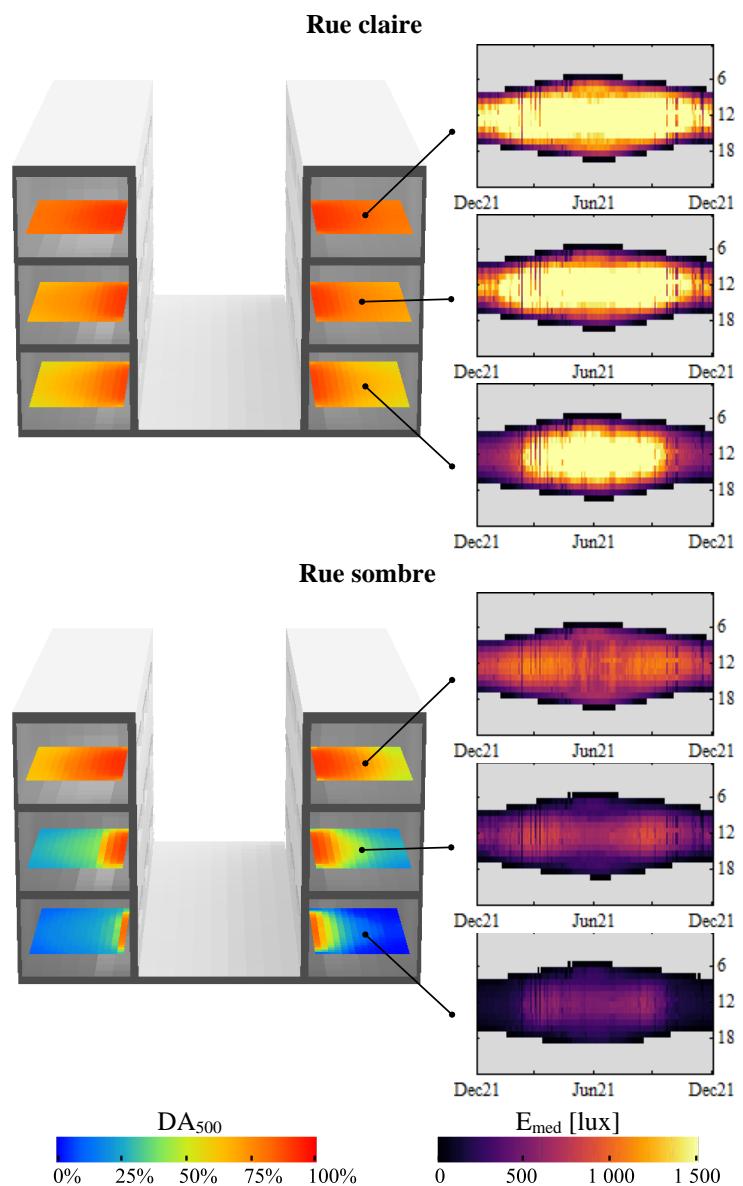


Figure 4.26 : DA₅₀₀ et calendrier des éclairements médian obtenus dans les pièces exposées au nord pour les variantes de la rue claire et sombre.

4.6.3. Application de toile d'ombrage dans la rue claire

La Figure 4.27 représente les températures de surface, les densités de flux absorbé, et les éclairements obtenus le 26 septembre à midi (solaire) dans la rue claire diffuse sans toile, avec la toile blanche et avec la toile noire. Une des conséquences directes de la mise en place des toiles est la réduction des températures de surfaces de la façade exposée au rayonnement direct du soleil. Le point C passe de 40.6 °C sans la toile à 34.5 °C avec la toile blanche et 34.1 °C avec la toile noire. La réduction du rayonnement solaire à l'intérieur de la rue permet également de faire diminuer les températures de surface de la façade nord de plus de 1 °C avec la mise en place des toiles.

L'effet de la toile est également visible à l'intérieur des bâtiments. Au 1^{er} étage exposé au sud, la réduction de la température d'air intérieure est de 2.2 °C avec la toile blanche et de 2.6 °C avec la toile noire.

La couleur de la toile joue un rôle sur le comportement thermique de la rue. Les différences de transmittance diffuse entre la toile blanche et la toile noire engendrent notamment des différences de températures de surface et de températures d'air intérieures de l'ordre de 0.3 et 0.4 °C.

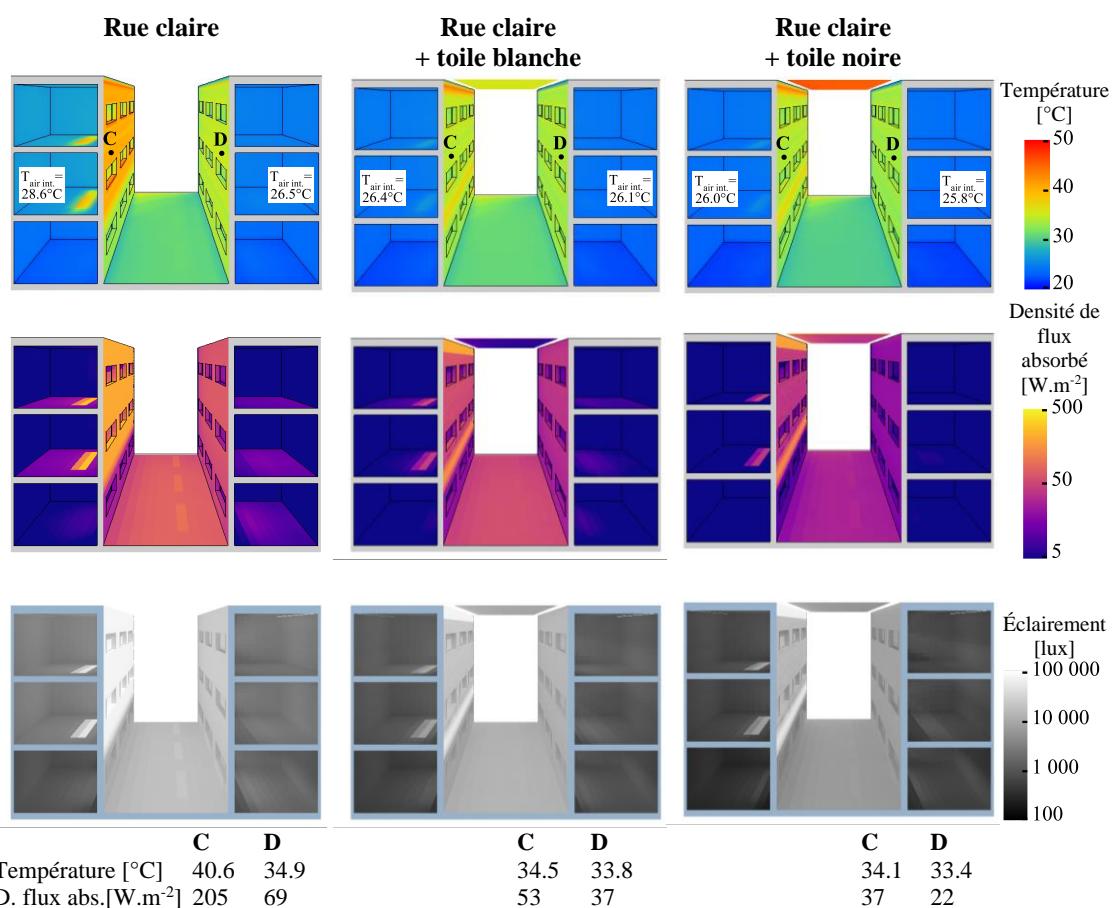


Figure 4.27 : Températures de surface, densités de flux absorbé, et éclairements le 26 septembre à midi (solaire) dans la rue claire diffuse sans toile, avec la toile blanche et avec la toile noire.

Dans le cas de la rue claire, les éclairements obtenus dans les intérieurs atteignent fréquemment des niveaux élevés pouvant causer des problèmes d'inconfort visuel. Pour évaluer les performances d'éclairage naturel l'UDI₃₀₀₋₂₀₀₀ pénalisant les éclairements supérieurs à 2000 lux est alors utilisé. Les résultats obtenus avec une mise en place de la toile entre le 1^{er} mai et le 1^{er} octobre sont présentés dans la Figure 4.28. L'UDI₃₀₀₋₂₀₀₀ moyen du 2^{ème} étage exposé au nord passe de 61 % sans la toile, à 70 % avec la toile blanche et 72 % avec la toile noire. Les tâches bleues proches des ouvertures présentes sans la toile et avec la toile blanche sont témoins d'un surplus de lumière indésirable fréquent. La transmittance diffuse plus faible de la toile noire permet de diminuer ce phénomène.

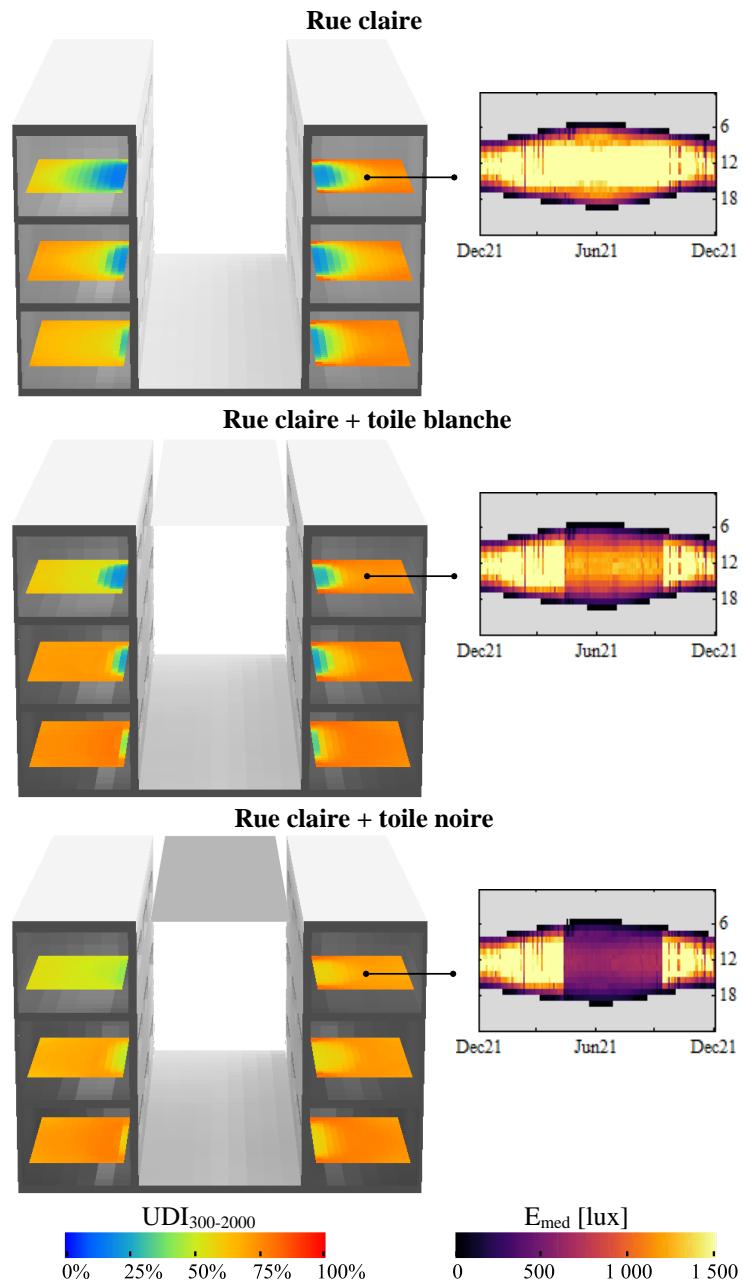


Figure 4.28 : UDI₃₀₀₋₂₀₀₀ et calendrier des éclairements médians obtenus dans les pièces exposées au nord pour les variantes de la rue claire sans toile, avec toile blanche, et avec toile noire.

4.7. Discussion et Conclusion

Grâce aux résultats obtenus dans les deux modèles avec la méthode de radiosité développée, l'importance de la partie réfléchie du rayonnement solaire et de ses effets sur le potentiel solaire, sur l'éclairage naturel et sur les températures de surfaces et d'air intérieur des bâtiments ont pu être analysées dans des variantes comportant des propriétés optiques de surface différentes.

Dans le contexte dense de Cordoue, la partie réfléchie du rayonnement solaire représente entre 23 %, avec des surfaces sombres, et 47 %, avec des surfaces claires, du potentiel solaire annuel perçu par toutes les façades. A un moment ensoleillé, l'irradiance reçue sur les façades par réflexion des autres surfaces peut constituer plus de 80% de l'irradiance totale reçue dans un environnement urbain réfléchissant. La considération d'un mode de réflexion spéculaire ou diffus pour les façades produit des différences notables sur le rayonnement solaire annuel reçu sur le sol. Les quantités globales annuelles de rayonnement perçu par les façades sont très similaires suivant ces deux modes de réflexion. En revanche, des écarts très nets de distribution sont observés en instantané sur les irradiances reçues entre la variante avec les façades diffuses et spéculaires. Avec les façades spéculaires des variations locales importantes d'irradiance sont observées pouvant être à l'origine de problème d'inconfort visuel ou thermique.

Les résultats obtenus dans le modèle de la rue ont permis d'étudier plus finement l'impact des caractéristiques optiques des surfaces sur les performances en éclairage annuel et sur le comportement thermique de la rue et des espaces intérieurs. Parmi les résultats les plus notables, on peut citer la forte dépendance de l'autonomie en éclairage naturel suivant la valeur des réflectances des surfaces de la rue. Au rez-de-chaussée, le DA₅₀₀ varie de 68 % dans la rue claire à 11 % dans la rue sombre. Les températures, de surface et d'air intérieur sont également impactées. On observe notamment des températures de surface de façade très différentes suivant les différentes valeurs d'absorptance. D'autres résultats moins immédiats ont été obtenus, notamment des températures d'air intérieur plus grandes dans le cas de la rue claire à cause d'une plus grande quantité de rayonnement qui se propage dans la rue et qui finit par pénétrer à l'intérieur des bâtiments à travers les ouvertures.

L'effet bénéfiques des toiles d'ombrage a pu être quantifié dans la rue claire pour sa capacité à réduire le rayonnement solaire entrant à l'intérieur de la rue et ainsi diminuer le niveau global des températures et limiter les risques d'éblouissement tout en gardant un niveau d'éclairage satisfaisant au cours de l'année.

Le mode de réflexion des façades a aussi un impact visible sur les conditions d'éclairage des espaces intérieurs. Une forte partie du rayonnement solaire est redirigé en partie basse de la rue dégradant les niveaux d'éclairage obtenus au 1^{er} et au 2^{ème} étage de la façade nord. Des variations importantes des niveaux d'éclairage sont aussi observées au niveau du rez-de-chaussée et du 1^{er} étage des espaces orientés nord en fonction des périodes de l'année selon que le rayonnement du soleil y parvienne ou non par réflexion spéculaire de la façade sud. Même ce phénomène engendre dans la rue des différences notables sur les températures de surface de l'ordre de 5°C et d'air intérieur de l'ordre de 0.6°C.

La méthode développée a permis de calculer sans difficulté le rayonnement solaire à l'intérieur de deux modèles à deux échelles comprenant des surfaces réfléchissant de manière spéculaire.

Une stratégie de maillage a été utilisée et détaillée pour considérer l'infinité des inter-réflexions diffuses à l'intérieur de deux grands modèles maillés finement. Les résultats ont montré l'importance de ces échanges par inter-réflexions que ce soit dans le contexte de l'étude thermique ou de l'étude de l'éclairage naturel. L'analyse du potentiel solaire à l'échelle du quartier et des performances en éclairage naturel à l'échelle de la rue a été faite directement à partir des résultats obtenus grâce à la méthode de radiosité développée. Les températures ont été calculés par une méthode aux éléments finis avec le programme Cast3M, mais ceci sort du cadre de la thèse. La méthode de radiosité contribue au calcul des densités de flux absorbés dans le spectre solaire et fournit la matrice des facteurs de vue entre les carreaux pour le calcul radiatif à grande longueur d'onde.

Des hypothèses ont été faites sur les propriétés du modèle 3D et dans le calcul radiatif dont l'impact reste à être évalué.

Premièrement, elles concernent les propriétés optiques attribuées aux différentes surfaces des deux modèles 3D. Nous avons considéré des propriétés parfaitement homogènes pour les façades, le sol, les toitures, etc. Bien que les niveaux de réflectances globaux soient représentatifs de cas réels, dans la réalité, les propriétés de ces surfaces peuvent être particulièrement hétérogènes sur une même façade et à l'échelle d'une rue. Cela a pour conséquence de provoquer localement des différences.

Deuxièmement, seules les deux modes de réflexion opposés, diffus et spéculaires, ont été considérés. Les modes de réflexion peuvent être bien plus complexe dans la réalité. Grâce aux facteurs de vue étendus, prendre en compte des BRDF plus complexe est possible dans la méthode développée mais nécessite du développement supplémentaire.

Les deux dernières hypothèses concernent la partie thermique du calcul. L'absorptance directionnelle des surfaces possédant une dépendance angulaire est ici simplifiée par une absorptance hémisphérique constante. Cela concerne dans cette application les vitrages, les façades spéculaires et les toiles d'ombrage. Dans le cas des façades spéculaires cette simplification peut avoir pour conséquence de surestimer la densité de flux absorbé lorsque la majorité du rayonnement perçu provient d'une direction d'incidence rasante.

Et enfin, la dernière hypothèse concerne le rayonnement en onde longue pour l'obtention des températures dans le programme Cast3M. Toutes les surfaces sont considérées comme des corps gris, c'est-à-dire des surfaces réfléchissant de manière parfaitement diffuse. Or, il convient de pouvoir considérer que si une surface réfléchie de manière spéculaire dans le spectre solaire, il y de forte chance que son mode de réflexion soit également spéculaire dans le rayonnement à grande longueur d'onde.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Nous avons développé dans cette thèse une méthode de radiosité prenant en compte les réflexions spéculaires et les transmissions directes à partir du concept de facteur de vue étendu proposé par [Sillion 1989]. La limitation de la radiosité pour des applications architecturales, consistant à ne pouvoir prendre en compte que des réflexions diffuses, a ainsi été levée.

Des comparaisons ont été menées avec le programme de référence en lumière naturelle, RADIANCE, qui est basé sur une approche de *path-tracing* avec Monte-Carlo. Elles ont été concluantes et ont permis de valider notre méthode. Cette comparaison a été faite dans le contexte exigeant des simulations du puits de jour où les réflexions multiples, à la fois diffuses et spéculaires, jouent un rôle prépondérant. Les résultats ont montré de très faibles écarts entre les deux méthodes.

Les réflexions diffuses et les transmissions directes sont prises en compte lors du calcul des facteurs de vue étendus grâce à des techniques de lancer de rayons. Selon la composition de la scène, la méthode développée varie entre :

- une méthode de radiosité classique, lorsque tous les échanges se font par réflexion diffuse,
- et une méthode de *path-tracing* lorsque tous les échanges se font par réflexion spéculaire et par transmission directe.

Ces développements ont permis de modéliser le rayonnement solaire pour différentes applications architecturales propres au contexte urbain dense :

- À l'intérieur d'un puits de jour, la méthode a permis d'évaluer les améliorations en éclairage naturel obtenues grâce à l'utilisation de matériaux réfléchissants et à la disposition de miroirs. Le fait de pouvoir calculer l'infinité des réflexions diffuses grâce à l'approche de la radiosité offre une amélioration importante en termes de précision et de temps de calcul. Dans certains cas, le nombre de réflexion nécessaire pour pouvoir évaluer de manière fiable l'éclairage naturel de ce type d'espaces est supérieure à 25. Dans ce contexte, la méthode de radiosité montre un net avantage sur la technique de *path tracing* proposée par le programme référence RADIANCE.
- Les performances en éclairage naturel et le comportement thermique d'une rue de Cordoue ont été analysés. Les résultats ont montré d'importantes variations des conditions d'éclairement et des températures de surface et d'air intérieur selon les caractéristiques optiques des éléments de la rue. Notre méthode a permis de calculer avec une prise en compte spatiale précise les densités de flux absorbés. La méthode développée se montre particulièrement adaptée pour être utilisée au sein d'un calcul thermique complet par éléments finis. Le fait de travailler à partir d'un même maillage permet de combiner avantageusement ces deux méthodes. Pour cette application, l'utilisation de notre méthode a par exemple permis de guider le choix des propriétés des toiles d'ombrage en tenant compte des aspects lumineux et thermiques associés.

- Le potentiel solaire d'un quartier de Cordoue a été étudié ce qui a mis en évidence l'importance de la partie réfléchie du rayonnement solaire. Ces résultats encouragent à considérer avec précision les caractéristiques optiques des éléments d'une ville même à cette échelle.

Cette approche n'est pas la plus performante pour certaines applications spécifiques liées au rayonnement solaire. Néanmoins, les cas étudiés dans cette thèse nous montrent qu'elle fonctionne parfaitement pour une grande variété d'application aux différentes échelles couramment étudiées dans les domaines de l'architecture et de l'urbanisme. Le niveau de précision, et donc implicitement les temps de calcul, peuvent être contrôlés efficacement en modifiant la qualité du maillage ou le nombre de rayons générés pour le calcul des facteurs de vue étendus. La méthode développée permet ainsi une flexibilité du point de vue de la précision et offre un large champ d'application qui s'avère confortable pour les concepteurs. De plus, le fait de réunir les problématiques lumineuses et thermiques du rayonnement solaire au sein d'un même programme offre aux utilisateurs une vision globale de l'impact des choix de conception.

Perspectives

Ces travaux laissent entrevoir plusieurs perspectives :

- Dans un premier temps, le choix a été fait de prendre en compte les modes de réflexion et de transmission extrêmes, à savoir, les réflexions diffuses et spéculaires, et les transmissions diffuses et directes. Or, le concept de facteur de vue étendu donne la possibilité de considérer n'importe quels modes de réflexion et de transmission. L'intégration de BRDF et de BTDF, basés sur des modèles théoriques ou obtenus à partir de mesures, permettrait des études plus fines du rayonnement solaire pour différents matériaux.
- Les dispositifs de redirection des rayons du soleil ont montré une grande efficacité pour l'amélioration des conditions d'éclairement habituellement sombres des espaces donnant sur des puits de jour. L'étude actuelle s'est limitée à des surfaces planes. Des formes de miroir plus complexes pour concentrer ou diffuser la lumière pourraient améliorer davantage les performances de ce type de dispositif. Cela permettrait de contrôler à la fois l'instant et l'endroit où les rayons sont redirigés dans le puits de jour. Ce type de surface pourrait parfaitement être intégré dans la méthode développée.
- Dans le spectre solaire, seuls le ciel et le soleil sont des sources de rayonnement. Aux grandes longueurs d'onde, tous les éléments qui composent une scène urbaine sont des sources émettrices. La méthode de radiosité classique a déjà le grand avantage d'être capable de considérer l'intégralité des carreaux qui composent la scène comme des sources émettrices avec une faible influence sur les temps de calcul. Avec l'apport des facteurs de vue étendus, des modes de réflexions autres que parfaitement diffus pourraient être considérés à grande longueur d'onde. Comme les températures des éléments de la scène interviennent dans le calcul radiatif à grandes longueurs d'onde, l'intérêt d'un couplage de la méthode avec un programme de calcul thermique par éléments finis devient alors d'autant plus grand.

- Dans l'application thermique, l'hypothèse a été faite de diviser le rayonnement en deux bandes spectrales : le rayonnement solaire à courtes longueurs d'onde calculé avec notre méthode, et le rayonnement à grandes longueurs d'onde nécessitant un programme élément finis pour les contributions d'échanges par conduction et convection. Cette hypothèse implique de considérer les propriétés des surfaces et le rayonnement comme constants à l'intérieur de ces deux plages. Or, les propriétés des surfaces peuvent montrer d'importantes variations selon la longueur d'onde. La méthode de radiosité proposée se révèle particulièrement bien adaptée pour l'étude multispectrale du rayonnement en milieu urbain.

Bibliographie

A

- [Acosta 2013] Acosta, I., Navarro, J. and Sendra, J.J., 2013. Predictive method of the sky component in a courtyard under overcast sky conditions. *Solar energy*, 89, pp.89-99.
- [Acosta 2017] Acosta, I., Leslie, R.P. and Figueiro, M.G., 2017. Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms. *Lighting Research & Technology*, 49(1), pp.49-61.
- [Acuña Paz y Miño 2020] Acuña Paz y Miño, J., Lawrence, C. and Beckers, B. (2020). Visual metering of the urban radiative environment through 4π imagery. *Infrared Physics & Technology*, 110, pp.103463.
- [Aguerre 2018] Aguerre, J.P., Fernández, E. and Beckers, B. 2018. Importance-driven approach for reducing urban radiative exchange computations. *Building Simulation*, 12(2), pp.231–246.
- [Aguerre 2019] Aguerre, J.P., Nahon, R., Garcia-Nevado, E., La Borderie, C., Fernández, E. and Beckers, B., 2019. A street in perspective: Thermography simulated by the finite element method. *Building and Environment*, 148, pp.225-239.
- [Aguerre 2020] Aguerre, J.P., García-Nevado, E., Acuña Paz y Miño, J., Fernández, E. and Beckers, B. (2020). Physically Based Simulation and Rendering of Urban Thermography. *Computer Graphics Forum*, 39(6), pp.377–391.
- [Ahadi 2017] Ahadi, A.A., Saghafi, M.R. and Tahbaz, M., 2017. The study of effective factors in daylight performance of light-wells with dynamic daylight metrics in residential buildings. *Solar Energy*, 155, pp.679-697.
- [Aries 2013] Aries, M.B., Aarts, M.P. and van Hoof, J., 2013. Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. *Lighting Research & Technology*, 47(1), pp.6-27.
- [Arvo 1993] Arvo, J., 1993. Transfer equations in global illumination. *Global Illumination, SIGGRAPH '93 Course Notes*, 2.
- [ASHRAE 2001] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2001. International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) User's Manual.
- [ASHRAE 2017] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017. *Fenestrations*, in ASHRAE Handbook-Fundamentals.
- [Asmail 1991] Asmail, C., 1991. Bidirectional scattering distribution function (BSDF): a systematized bibliography. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 96(2), p.215.

[ASTM G173-03] American Society for Testing and Materials. Committee G03 on Weathering and Durability, 2012. *Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface*. ASTM International.

[Ayoub 2020] Ayoub, M., 2020. A review on light transport algorithms and simulation tools to model daylighting inside buildings. *Solar Energy*, 198, pp.623-642.

B

[Baker 2000] Baker, N., 2000. We are all outdoor animals. *Architecture City Environment, Proceedings of PLEA, 2000*, pp.553-555.

[Baum 1989] Baum, D.R., Rushmeier, H.E. and Winget, J.M., 1989. Improving radiosity solutions through the use of analytically determined form-factors. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 23(3), pp.325-334.

[Baum 1990] Baum, D.R. and Winget, J.M., 1990, February. Real time radiosity through parallel processing and hardware acceleration. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (Vol. 24, No. 2, pp. 67-75). ACM.

[Beckers 2010] Beckers, B. and Beckers, P., 2010. Les anomalies, l'équation de Kepler, la position du soleil. <http://www.heliodon.net/>

[Beckers 2012] Beckers, B. and Beckers, P., 2012. A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells. *Computational Geometry*, 45(7), pp.275-283.

[Beckers 2013] Beckers, B. ed., 2013. *Solar energy at urban scale*. John Wiley & Sons.

[Beckers 2014] Beckers, B. and Beckers, P., 2014. *Reconciliation of geometry and perception in radiation physics*. Wiley-ISTE.

[Beckers 2016a] Beckers, B. and Beckers, P., 2016. Fast and accurate view factor generation. In *FICUP, An International Conference on Urban Physics*.

[Beckers 2016b] Beckers, B. and Beckers, P., 2016. Complete set of Matlab procedures for achieving uniform ray generation. <http://www.heliodon.net/>

[Berson 2002] Berson, D.M., Dunn, F.A. and Takao, M., 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 295(5557), pp.1070-1073.

[Boivin 1996] Boivin, D.B., Duffy, J.F., Kronauer, R.E. and Czeisler, C.A., 1996. Dose-response relationships for resetting of human circadian clock by light. *Nature*, 379(6565), p.540.

[Boivin 1998] Boivin, D.B. and Czeisler, C.A., 1998. Resetting of circadian melatonin and cortisol rhythms in humans by ordinary room light. *Neuroreport*, 9(5), pp.779-782.

[Brown 2011] Brown, M.J. and Jacobs, D.E., 2011. Residential light and risk for depression and falls: results from the LARES study of eight European cities. *Public Health Reports*, 126, pp.131-140.

[Bu 1989] Bu, J. and Deprettere, E.F., 1989. A VLSI system architecture for high-speed radiative transfer 3D image synthesis. *The Visual Computer*, 5(3), pp.121-133.

[Bugeat 2019] Bugeat, A., Fernández, E., Beckers, B. and Aguerre, J., 2019. A Multi-Scale Consideration of Daylight in a Real Urban Context. In *Proceedings of BS2019: 16th IBPSA Building Simulation Conference, Rome, Italy*.

[Bugeat 2020] Bugeat, A., Beckers, B. and Fernández, E., 2020. Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. *Solar Energy*, 207, pp.1434-1444.

[Burton 2000] Burton, E., 2000. The compact city: just or just compact? A preliminary analysis. *Urban studies*, 37(11), pp.1969-2006.

C

[Calcagni 2004] Calcagni, B. and Paroncini, M., 2004. Daylight factor prediction in atria building designs. *Solar energy*, 76(6), pp.669-682.

[Chen 1991] Chen, S.E., Rushmeier, H.E., Miller, G. and Turner, D., 1991, July. A progressive multi-pass method for global illumination. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (Vol. 25, No. 4, pp. 165-174). ACM.

[CIBSE 2013] Chartered Institution of Building Services Engineers, 2013. *Lighting for communal residential buildings*. London: Society of Light and Lighting.

[CIE 2016] Commission Internationale de l'Eclairage, 2016. *International Lighting Vocabulary*. CIE DIS 017/E:2016. Vienna: CIE.

[Cohen 1985] Cohen, M.F. and Greenberg, D.P., 1985, July. The hemi-cube: A radiosity solution for complex environments. In *ACM Siggraph Computer Graphics* (Vol. 19, No. 3, pp. 31-40).

[Cohen 1993] Cohen, M.F. and Wallace, J.R., 1993. *Radiosity and realistic image synthesis*. Elsevier.

[Commission européenne 2007] EU Commission, 2007. Green paper, towards a new culture for urban mobility. *European Union, Brussels*.

[Cole 1990] Cole, R.J., 1990. The effect of the surfaces enclosing atria on the daylight in adjacent spaces. *Building and Environment*, 25(1), pp.37-42.

[Compagnon 2004] Compagnon, R., 2004. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and buildings*, 36(4), pp.321-328.

[Cook 1981] Cook, R.L. and Torrance, K.E., 1981. A reflectance model for computer graphics. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 15(3), pp.307-316.

[Cuttle 1983] Cuttle, C., 1983, June. People and windows in workplaces. In *Proceedings of the people and physical environment research conference, Wellington, New Zealand* (pp. 203-212).

[Czeisler 1989] Czeisler, C.A., Kronauer, R.E., Allan, J.S., Duffy, J.F., Jewett, M.E., Brown, E.N. and Ronda, J.M., 1989. Bright light induction of strong (type 0) resetting of the human circadian pacemaker. *Science*, 244(4910), pp.1328-1333.

D

[Dama 2004] Dama, A., 2004. *Angular dependency of optical properties and energy performances of glazing and solar shading devices for window and facades*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Dipartimento di Energetica, Milan, Italy.

[Darula 2002] Darula, S. and Kittler, R., 2002. CIE general sky standard defining luminance distributions. *Proceedings eSim*, pp.11-13.

[Departamento de Vivienda y Asuntos Sociales 2002] Departamento de Vivienda y Asuntos Sociales, 2002. Decreto 317/2002, de 30 de diciembre, sobre actuaciones protegidas de rehabilitación del patrimonio urbanizado y edificado. Comunidad Autónoma del País Vasco Departamento de Vivienda y Asuntos Sociales.

[Di Laura 2011] DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R. and Steffy, G., 2011. *The Lighting Handbook*. New York, Illuminating Engineering Society of North America.

[Du 2011] Du, J. and Sharples, S., 2011. The variation of daylight levels across atrium walls: Reflectance distribution and well geometry effects under overcast sky conditions. *Solar Energy*, 85(9), pp.2085-2100.

[Dutre 1993] Dutre, P., Lafourche, E.P., Willems, Y.D., 1993. Monte Carlo Light Tracing with Direct Computation of Pixel Intensities. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Graphics and Visualisation Techniques* (pp. 128–137).

E

[El Ganaoui 2005] El Ganaoui, K. and Allaire, G., 2005, January. Homogenization of a conductive and radiative heat transfer problem, simulation with CAST3M. In *Heat Transfer Summer Conference* (pp. 97-102).

[EN 12464] European Norm, 2002. Light and Lighting-Lighting of work places, Part 1: Indoor work places. *Comité Européen de Normalisation*.

[EN 17037] European Norm, 2018. Daylight in buildings. CEN/TC 169 - Light and lighting; EN 17037:2018, *Comité Européen de Normalisation*.

[EN 410] European Norm, 2011. Glass in building-Determination of luminous and solar characteristics of glazing; EN 410:2011, *Comité Européen de Normalisation*.

F

[Fernández 2014] Fernández, E. and Besuevsky, G., 2014. A sample-based method for computing the radiosity inverse matrix. *Computers & graphics*, 41, pp.1-12.

[Fernandes 2015] Fernandes, L.L., Lee, E.S., McNeil, A., Jonsson, J.C., Nouidui, T., Pang, X. and Hoffmann, S., 2015. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings. *Energy and Buildings*, 90, pp.188-206.

[Freewann 2014] Freewan, A.A., Gharaibeh, A.A. and Jamhawi, M.M., 2014. Improving daylight performance of light wells in residential buildings: Nourishing compact sustainable urban form. *Sustainable Cities and Society*, 13, pp.32-40.

[Fresnel 1868] Fresnel, A., 1868. *Oeuvres complètes d'Augustin Fresnel*. Imprimerie impériale.

[Figueiro 2016] Figueiro, M. G., K. Gonzales, D. Pedler, 2016. Designing with Circadian Stimulus. Report of the Lighting Research Center.

https://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/LDA_CircadianStimulus_Oct2016.pdf

[Fröhlich 1998] Fröhlich, C. and Lean, J., 1998. The Sun's total irradiance: Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophysical Research Letters*, 25(23), pp.4377-4380.

[Frumkin 2002] Frumkin, H., 2016. Urban sprawl and public health. *Public health reports*.

[Furler 1991] Furler, R.A., 1991. Angular dependence of optical properties of homogeneous glasses. *ASHRAE Transactions*, 97(2), pp.1129-1133.

G

[Galasiu 2006] Galasiu, A.D. and Veitch, J.A., 2006. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review. *Energy and Buildings*, 38(7), pp.728-742.

[Garcia-Nevado 2020] Garcia-Nevado, E., Beckers, B. and Coch, H., 2020. Assessing the cooling effect of urban textile shading devices through time-lapse thermography. *Sustainable Cities and Society*, 63, p.102458.

[Garcia-Nevado 2021] Garcia-Nevado, E., Duport, N., Bugeat, A. and Beckers, B., 2021. Benefits of street sun sails to limit building cooling needs in a mediterranean city. *Building and Environment*, 187, p.107403.

[Gebhart 1961] Gebhart, B., 1961. Surface temperature calculations in radiant surroundings of arbitrary complexity—for gray, diffuse radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3(4), pp.341-346.

[Generalitat de Catalunya Departament de Territori i Sostenibilitat 2012] Generalitat de Catalunya Departament de Territori i Sostenibilitat, 2012. Decret 141/2012 sobre condicions mínimes d'habitabilitat dels habitatges i la cèdula d'habitabilitat. Secretaria d'Habitatge i Millora Urbana, Agència de l'Habitatge de Catalunya.

[Germain 2008] Germain, A. and Kupfer, D.J., 2008. Circadian rhythm disturbances in depression. *Human Psychopharmacology: Clinical and Experimental*, 23(7), pp.571-585.

[Glassner 1984] Glassner, A.S., 1984. Space subdivision for fast ray tracing. *IEEE Computer Graphics and applications*, 4(10), pp.15-24.

[Goral 1984] Goral, C.M., Torrance, K.E., Greenberg, D.P. and Battaile, B., 1984, January. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In *ACM SIGGRAPH computer graphics* (Vol. 18, No. 3, pp. 213-222). ACM.

[Grynberg 1989] Grynberg, A., 1989. Validation of RADIANCE. *Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley LBID*, Technical report.

H

[Hammersley 1964] Hammersley, J. M. and Handscomb, D. C., 2013. *Monte carlo methods*. Springer Netherlands.

[Harris 2006] Harris, C.M., 2006. *Dictionary of architecture and construction*. McGraw-Hill.

[Hoffmann 2016] Hoffmann, S., Lee, E.S., McNeil, A., Fernandes, L., Vidanovic, D. and Thanachareonkit, A., 2016. Balancing daylight, glare, and energy-efficiency goals: An evaluation of exterior coplanar shading systems using complex fenestration modeling tools. *Energy and Buildings*, 112, pp.279-298.

[Hottel 1933] Hottel, H.C. and Keller, J.D., 1933. Effect of reradiation on heat transmission in furnaces and through openings. *Trans. ASME*, 55, pp.39-49.

[Houser 1999] Houser, K.W., Tiller, D.K. and Pasini, I.C., 1999. Toward the accuracy of lighting simulations in physically based computer graphics software. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 28(1), pp.117-129.

[Howell 2010] Howell, J.R., Menguc, M.P. and Siegel, R., 2010. *Thermal radiation heat transfer*. CRC press.

I

[IESNA 2012] Illuminating Engineering Society of North America, 2012. LM-83-12 IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). *New York, NY, USA: IESNA Lighting Measurement*.

[Immel 1986] Immel, D.S., Cohen, M.F. and Greenberg, D.P., 1986, August. A radiosity method for non-diffuse environments. In *Acm Siggraph Computer Graphics* (Vol. 20, No. 4, pp. 133-142). ACM.

[ISO/CIE 2019] ISO/CIE 11664-1:2019 Colorimetry — Part 1: CIE standard colorimetric observers.

J

[Jakubiec 2016] Jakubiec, J.A., 2016. Building a database of opaque materials for lighting simulation. *Proceedings of PLEA; Los Angeles, CA*.

[Jakubiec 2018] Jakubiec, J.A., Quek, G. and Srisamranrungruang, T., 2018. Towards subjectivity in annual climate-based daylight metrics. *Proceedings of Building Simulation; Cambridge, UK*.

[Jensen 2001] Jensen, H.W., 2001. *Realistic image synthesis using photon mapping*. AK Peters/CRC Press.

[Jones 2017] Jones, N.L. and Reinhart, C.F., 2017. Experimental validation of ray tracing as a means of image-based visual discomfort prediction. *Building and Environment*, 113, pp.131-150.

K

[Kajiya 1986] Kajiya, J.T., 1986, August. The rendering equation. In *ACM SIGGRAPH computer graphics* (Vol. 20, No. 4, pp. 143-150). ACM.

[Karlsson 2000] Karlsson, J. and Roos, A., 2000. Modelling the angular behaviour of the total solar energy transmittance of windows. *Solar energy*, 69(4), pp.321-329.

[Kasten 1989] Kasten, F. and Young, A.T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied optics*, 28(22), pp.4735-4738.

[Kittler 1998] Kittler, R., Darula, S. and Perez, R., 1998. A set of standard skies characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design, Final Report. *Slovakia: Slovak Academy of Science*.

[Kotani 2003] Kotani, H., Narasaki, M., Sato, R. and Yamanaka, T., 2003. Environmental assessment of light well in high-rise apartment building. *Building and Environment*, 38(2), pp.283-289.

[Kotey 2009a] Kotey, N.A., Wright, J.L., and Collins, M.R., 2009, Determining off-normal solar optical properties of roller blinds, *ASHRAE Transactions*, 115(1), pp.145-154.

[Kotey 2009b] Kotey, NA, Wright, JL, and Collins, MR, 2009, Determining off-normal solar optical properties of drapery fabrics. *ASHRAE Transactions*, 115(2), pp.3-17.

[Kristl 1999] Kristl, Ž. and Krainer, A., 1999. Light wells in residential building as a complementary daylight source. *Solar Energy*, 65(3), pp.197-206.

L

[Lafortune 1993] Lafortune, E.P. and Willems, Y.D., 1993. Bi-Directional Path Tracing. In *Proceedings of Compugraphics '93* (pp. 145-153).

[Lafortune 1997] Lafortune, E.P., Foo, S.C., Torrance, K.E. and Greenberg, D.P., 1997, August. Non-linear approximation of reflectance functions. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 117-126).

[Lau 2008] Lau, B. and Duan, Z., 2008. The daylight benefit conferred upon adjoining rooms by specular surfaces in top-lit atria. *Architectural Science Review*, 51(3), pp.204-211.

[Lee 1985] Lee, M.E., Redner, R.A. and Uselton, S.P., 1985, July. Statistically optimized sampling for distributed ray tracing. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (Vol. 19, No. 3, pp. 61-68). ACM.

[Li 2020] Li, G., Xuan, Q., Akram, M.W., Akhlaghi, Y.G., Liu, H. and Shittu, S., 2020. Building integrated solar concentrating systems: A review. *Applied Energy*, 260, p.114288.

[Littlefair 2002] Littlefair, P., 2002. Daylight prediction in atrium buildings. *Solar energy*, 73(2), pp.105-109.

[Llorens 2015] Llorens, J. ed., 2015. *Fabric structures in architecture*. Elsevier.

M

[Malley 1988] Malley, T.J., 1988. A shading method for computer generated images. *Master's thesis, Dept. of Computer Science, University of Utah*.

[Mardaljevic 1995] Mardaljevic, J., 1995. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 27(4), pp.181-188.

[Mardaljevic 2000] Mardaljevic, J., 2000. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 32(3), pp.111-118.

[Mardaljevic 2001] Mardaljevic, J., 2001. The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance prediction techniques. *Lighting Research & Technology*, 33(2), pp.117-134.

[Mardaljevic 2009] Mardaljevic, J., Heschong, L. and Lee, E., 2009. Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*, 41(3), pp.261-283.

[Mardaljevic 2013] Mardaljevic, J., Janes, G.M., 2013. *Multiscale Daylight Modeling for Urban Environments*, in: Solar Energy at Urban Scale. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 159–190.

[Matusiak 1999] Matusiak, B., Aschehoug, Ø. and Littlefair, P., 1999. Daylighting strategies for an infinitely long atrium: an experimental evaluation. *International journal of lighting research and technology*, 31(1), pp.23-34.

[Maxwell 1986] Maxwell, G.M., Bailey, M.J. and Goldschmidt, V.W., 1986. Calculations of the radiation configuration factor using ray casting. *Computer-Aided Design*, 18(7), pp.371-379.

[McNeil 2013] McNeil, A. and Lee, E.S., 2013. A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(1), pp.24-37.

[Miguet 2000] Miguet, F., 2000. *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*. PhD thesis, University of Nantes, France.

[Mohajeri 2016] Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kämpf, J. and Scartezzini, J.L., 2016. Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, pp.469-482.

[Montecchi 2002] Montecchi, M., Nichelatti, E. and Polato, P., 2002. Hybrid equivalent model algorithm for the prediction of glazing angular properties. *Solar energy materials and solar cells*, 71(3), pp.327-342.

[Moon 1942] Moon, P. and Spencer, D.E., 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Illum. Eng. (NY)*, 37, pp.707-726.

[Mouratidis 2019] Mouratidis, K., 2019. Compact city, urban sprawl, and subjective well-being. *Cities*, 92, pp.261-272.

[Muhsin 2017] Muhsin, F., Yusoff, W.F.M., Mohamed, M.F. and Sapian, A.R., 2017. CFD modeling of natural ventilation in a void connected to the living units of multi-storey housing for thermal comfort. *Energy and Buildings*, 144, pp.1-16.

[Muneer 1998] Muneer, T. and Kinghorn, D., 1998. Luminous efficacy models—evaluation against UK data. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27(1), pp.163-170.

[Musy 2015] Musy, M., Malys, L., Morille, B. and Inard, C., 2015. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Climate*, 14, pp.213-223.

N

[Nabil 2005] Nabil, A. and Mardaljevic, J., 2005. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), pp.41-57.

[Nahon 2017] Nahon, R., 2017. *Modélisation des échanges radiatifs à l'échelle urbaine pour un urbanisme bioclimatique*. PhD thesis, Université de Lille 1, France.

[Nakamura 1985] Nakamura, H., Oki, M. and Hayashi, Y., 1985. Luminance distribution of intermediate sky. *Journal of Light & Visual Environment*, 9(1), pp.6-13.

[Nations unies 2012] Nations unies, 2012. The future we want, 2012, June. *Outcome document of the United Nations Conference on Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil*, <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/733FutureWeWant.pdf>

[Nicodemus 1965] Nicodemus, F.E., 1965. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Applied optics*, 4(7), pp.767-775.

[Nicodemus 1977] Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W. and Limperis, T., 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *Final Report National Bureau of Standards, Washington, DC. Inst. for Basic Standards*.

O

[Oren 1995] Oren, M. and Nayar, S.K., 1995. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision. *International Journal of Computer Vision*, 14(3), pp.227-251.

[Osada 2002] Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B. and Dobkin, D., 2002. Shape distributions. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(4), pp.807-832.

P

[Panerai 2004] Panerai, P., Castex, J., Depaule, J.C. and Samuels, I., 2004. *Urban forms: the death and life of the urban block*. Routledge.

[Paule 2015] Paule, B.A., Boutillier, J. and Pantet, S., 2015. Shading device control: Effective impact on daylight contribution. In Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale (pp. 241-246). LESO-PB, EPFL.

[Perez 1990] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. and Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar energy*, 44(5), pp.271-289.

[Perez 1993] Perez, R., Seals, R. and Michalsky, J., 1993. All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation. *Solar energy*, 50(3), pp.235-245.

[Poulin 1990] Poulin, P. and Fournier, A., 1990. A model for anisotropic reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 24(4), pp.273-282.

R

[Rea 2005] Rea, M.S., Figueiro, M.G., Bullough, J.D. and Bierman, A., 2005. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews*, 50(2), pp.213-228.

[Rea 2016] Rea, M.S. and Figueiro, M.G., 2018. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting research & technology*, 50(4), pp.497-510.

[Redweik 2013] Redweik, P., Catita, C. and Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, pp.332-341.

[Reinhart 2001] Reinhart, C.F. and Walkenhorst, O., 2001. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and buildings*, 33(7), pp.683-697.

[Reinhart 2006a] Reinhart, C. and Fitz, A., 2006. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. *Energy and Buildings*, 38(7), pp.824-835.

[Reinhart 2006b] Reinhart, C.F. and Andersen, M., 2006. Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. *Energy and buildings*, 38(7), pp.890-904.

[Reinhart 2006c] Reinhart, C.F., Mardaljevic, J. and Rogers, Z., 2006. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, 3(1), pp.7-31.

[Reinhart 2011] Reinhart, C.F. and Wienold, J., 2011. The daylighting dashboard—A simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and environment*, 46(2), pp.386-396.

[Robinson 2006] Robinson, D., 2006. Urban morphology and indicators of radiation availability. *Solar Energy*, 80(12), pp.1643-1648.

[Robinson 2009] Robinson, D., Haldi, F., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A. and Wilke, U., 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference* (pp. 1083-1090).

[Rosenthal 1984] Rosenthal, N.E., Sack, D.A., Gillin, J.C., Lewy, A.J., Goodwin, F.K., Davenport, Y., Mueller, P.S., Newsome, D.A. and Wehr, T.A., 1984. Seasonal affective disorder: a description of the syndrome and preliminary findings with light therapy. *Archives of general psychiatry*, 41(1), pp.72-80.

[Rubin 1985] Rubin, M., 1985. Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar energy materials*, 12(4), pp.275-288.

[Rubin 1999] Rubin, M., Powles, R. and Von Rottkay, K., 1999. Models for the angle-dependent optical properties of coated glazing materials. *Solar Energy*, 66(4), pp.267-276.

[Rushmeier 1995] Rushmeier, H., Ward, G., Piatko, C., Sanders, P. and Rust, B., 1995. Comparing real and synthetic images: Some ideas about metrics. In *Rendering Techniques' 95* (pp. 82-91). Springer, Vienna.

S

[Saad 2003] Saad, Y., 2003. *Iterative methods for sparse linear systems*. SIAM.

[Sarralde 2015] Sarralde, J.J., Quinn, D.J., Wiesmann, D. and Steemers, K., 2015. Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, 73, pp.10-17.

[Serres 1990] Serres, A.W. and Murdoch, J.B., 1990. On the efficiency of skylight wells. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 19(1), pp.73-86.

[Schlick 1994] Schlick, C., 1994. An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering. *Computer Graphics Forum*, 13(3), pp.233–246.

[Schregle 2015] Schregle, R., Grobe, L. and Wittkopf, S., 2015. Progressive photon mapping for daylight redirecting components. *Solar Energy*, 114, pp.327-336.

[Sillion 1989] Sillion, F. and Puech, C., 1989, July. A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (Vol. 23, No. 3, pp. 335-344).

[Sillion 1994] Sillion, F.X. and Puech, C., 1994. *Radiosity and global illumination*. San Francisco: Morgan Kaufmann.

[Spencer 1971] Spencer, J.W., 1971. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), p.172.

[Strauss 1990] Strauss, P.S., 1990. A realistic lighting model for computer animators. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 10(6), pp.56-64.

[Strømann-Andersen 2011] Strømann-Andersen, J. and Sattrup, P.A., 2011. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8).

T

[Talatizi 2020] Talatizi, C., Aumeunier, M.H., Rigolet, F., Le Bohec, M., Gérardin, J., Gaspar, J., Le Niliot, C. and Herrmann, A., 2020. Inverse radiation problem with infrared images to monitor plasma-facing components temperature in metallic fusion devices. *Fusion Engineering and Design*, 159, p.111867.

[Thevenard 2002a] Thevenard, D.J. and Brunger, A.P., 2002. The development of typical weather years for international locations: part I, algorithms. *Ashrae Transactions*, 108, p.376.

[Thevenard 2002b] Thevenard, D.J. and Brunger, A.P., 2002. The development of typical weather years for international locations: Part II, production/Discussion. *ASHRAE Transactions*, 108, p.480.

[Torrance 1967] Torrance, K.E. and Sparrow, E.M., 1967. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of Optical Society of America*, 57(9), pp.1105-1114.

[Tregenza 1983] Tregenza, P.R. and Waters, I.M., 1983. Daylight coefficients. *Lighting Research & Technology*, 15(2), pp.65-71.

V

[Van Someren 1999] Van Someren, E.J., Swaab, D.F., Colenda, C.C., Cohen, W., McCall, W.V. and Rosenquist, P.B., 1999. Bright light therapy: improved sensitivity to its effects on rest-activity rhythms in Alzheimer patients by application of nonparametric methods. *Chronobiology International*, 16(4), pp.505-518.

[Veach 1997] Veach, E. and Guibas, L.J., 1997, August. Metropolis light transport. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 65-76).

W

[Wald 2014] Wald, I., Woop, S., Benthin, C., Johnson, G.S. and Ernst, M., 2014. Embree: a kernel framework for efficient CPU ray tracing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(4), pp.1-8.

[Wallace 1987] Wallace, J.R., Cohen, M.F. and Greenberg, D.P., 1987. A two-pass solution to the rendering equation: A synthesis of ray tracing and radiosity methods. In *ACM SIGGRAPH computer graphics* (Vol. 21, No. 4, pp. 311-320).

[Ward 1988] Ward, G.J. and Rubinstein, F.M., 1988. A new technique for computer simulation of illuminated spaces. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 17(1), pp.80-91.

[Ward 1992] Ward, G.J., 1992, July. Measuring and modeling anisotropic reflection. In *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 265-272).

[Ward 1994] Ward, G.J., 1994, July. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 459-472).

[Wolff 1998] Wolff, L.B., Nayar, S.K. and Oren, M., 1998. Improved diffuse reflection models for computer vision. *International Journal of Computer Vision*, 30(1), pp.55-71.

X

[Xuan 2019] Xuan, Q., Li, G., Lu, Y., Zhao, B., Zhao, X., Su, Y., Ji, J. and Pei, G., 2019. Overall detail comparison for a building integrated concentrating photovoltaic/daylighting system. *Energy and Buildings*, 199, pp.415-426.

Z

[Zeitzer 2000] Zeitzer, J.M., Dijk, D.J., Kronauer, R.E., Brown, E.N. and Czeisler, C.A., 2000. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *The Journal of physiology*, 526(3), pp.695-702.

Annexe

Programme développé en C++ pour le calcul des facteurs de vue étendus et fonctions Embree utilisées

Cette annexe donne un aperçu du programme développé dans le langage C++ au cours de cette thèse pour le calcul des facteurs de vue étendus. Les entrées et sorties, les principales procédures développées, et les principales fonctions Embree utilisées sont présentées. Ce code utilise la bibliothèque de fonctions de lancer de rayons performante et open-source Embree [Wald 2014] optimisée pour les CPU Intel (processeurs). Le choix s'est porté sur cette bibliothèque principalement pour deux raisons :

- Les performances se sont révélées très convaincantes après quelques essais simples préalables. Avec l'ordinateur utilisé pour les simulations présentées dans cette thèse équipé d'un processeur Intel i7 la quantité de rayons émis par seconde s'élève à 24 000 000, définition du rayon et test d'intersection compris.
- La majorité des ordinateurs sont équipés de processeur Intel ce qui rend le programme utilisable par un grand nombre de personnes. Il existe cependant d'autres bibliothèques de lancer de rayons qui auraient pu fonctionner mais avec plus de contraintes. Parmi les plus connues, Optix avec CUDA est une bibliothèque qui ne fonctionne qu'avec des GPU NVidia.

Entrées :

- **Fichier OBJ .OBJ** contenant le maillage de l'environnement bâti en carreaux triangulaires ou quadrilatères.
- **Fichier Matériaux .TXT** contenant les caractéristiques des carreaux en quatre colonnes : Réflectance spéc. / Transmittance dir. / Réflectance diff. / Transmittance diff.
- **Fichier Capteurs .TXT** (optionnel) contenant les coordonnées des capteurs et leur orientation X / Y / Z / Xdir / Ydir / Zdir
- **Type de ciel** (paramètre optionnel) Si besoin, l'utilisateur choisit sa partition de ciel.
- **Quantité de rayons** (paramètre obligatoire) L'utilisateur choisi le nombre de rayons émis par carreau et par capteur pour le calcul.
- **Nombre maximal de réflexions spéculaires et transmissions directes** (paramètre obligatoire) L'utilisateur choisi le nombre de réflexions spéculaires / transmissions directes maximum.

Sorties :

- **Fichier VF .TXT** contenant la matrice des facteurs de vue au format de matrice creuse.
- **Fichier EVF .TXT** contenant la partie supplémentaire des facteurs de vue étendus au format de matrice creuse.
- **Fichier .TXT** contenant la matrice des transmittances diffuses au format de matrice creuse.
- **Temps de calcul**

Principales fonctions et procédures développées :

- *Génération de la partition de l'hémisphère en tuiles d'angles solides égaux*

Cette procédure est utile pour la création de la partition du ciel selon la méthode de [Beckers 2012]. Tous les éléments ont le même angle solide (voir chapitre 2 section 2.1.3). L'utilisateur a la possibilité de choisir le nombre exact de tuiles de ciel.

- *Génération de la partition de l'hémisphère en tuile à facteurs de vue égaux*

Cette procédure est utilisée pour la détermination des directions des rayons émis depuis les carreaux. L'hémisphère est partitionné en tuiles à facteurs de vue égaux suivant le nombre de rayons émis depuis chaque carreau (ou capteur) choisi par l'utilisateur. La direction représentée par le centre de l'hémisphère et le centre de chaque tuile correspond aux directions des rayons émis depuis les carreaux et capteurs. Pour rappel, leur origine est définie de manière aléatoire sur la surface des carreaux.

- *Procédure de path-tracing pour le calcul de la partie étendue des facteurs de vue étendus*

Cette partie concerne le cœur du calcul des facteurs de vue étendus. Lorsqu'un rayon, émis depuis un carreau (ou capteur) pour le calcul des facteurs de vue, coupe un carreau avec une réflectance spéculaire et/ou une transmittance directe, une procédure de *path-tracing* récursive débute afin de calculer la partie supplémentaire des facteurs de vue étendus. Le trajet du rayon est prolongé jusqu'à ce qu'il intersecte un carreau sans réflectance spéculaire ou transmittance directe ou si le nombre de réflexions spéculaires et transmissions directes a atteint la limite fixée par l'utilisateur.

- *Importation des OBJ du maillage, matériaux, et capteurs*

Les fonctions permettant l'importation des maillages de l'environnement (.OBJ), leurs caractéristiques optiques à partir d'un fichier (.TXT), et le fichier (.TXT) contenant les capteurs ont été développées.

Principales fonctions Embree utilisées :

- *rtcNewScene*

À partir de cette fonction Embree, une scène est créée. Une scène est un ensemble de géométries, et contient une structure d'accélération spatiale pour le lancer de rayons.

- *rtcNewGeom*

Cette fonction permet d'ajouter des éléments à la scène créée, en l'occurrence des triangles ou des quadrilatères correspondant au maillage présent dans le fichier .OBJ dans notre cas. D'autres formes plus complexes peuvent également être prises en compte par Embree (courbes de Bézier, sphère...)

- *embree::parallel_for*

Permet d'accélérer le calcul en parallélisant des procédures sur les cœurs logiques du CPU (processeur Intel). Dans le programme, c'est la procédure de calcul des facteurs de vue étendus qui est parallélisée carreau d'origine par carreau d'origine et capteur par capteur. C'est-à-dire que

les facteurs de vue à partir de plusieurs carreaux (ou capteurs) sont calculés en même temps selon le nombre de cœurs logiques de l'ordinateur.

- *rtcIntersect1*

Cette fonction trouve le point d'intersection le plus proche entre un rayon et les éléments de scène. La fonction donne les données d'intersection en sortie (coordonnées du point d'intersection, angle d'incidence, identifiant du carreau intersecté...).

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1.1: Représentations de l'angle solide d'un objet quelconque depuis le point P d'une surface et des deux hémisphères supérieur Ω^+ et inférieur Ω^- .	3
Figure 1.2 : Représentation d'un angle solide différentiel $d\omega$ en coordonnées sphériques.	4
Figure 1.3 : Irradiance solaire spectrale extraterrestre (Air Mass 0) et irradiance solaire spectrale à la surface de la terre (Air Mass 1.5G) [ASTM G173-03].	5
Figure 1.4 : Efficacité lumineuse spectrale $K(\lambda)$ [ISO/CIE 2019].	5
Figure 1.5 : Représentation géométrique des rayons incident et réfléchi pour la définition d'une BRDF.	9
Figure 1.6 : Représentation géométrique des rayons incident et transmis pour la définition d'une BTDF.	9
Figure 1.7 : Image d'un vase, son rendu avec modèle de réflexion Lambertien, et son rendu avec le modèle de réflexion Oren-Nayar [Oren 1995].	19
Figure 1.8 : Rayon incident, rayon réfléchi, rayon transmis à l'interface entre l'air et l'élément d'indice de réfraction n .	20
Figure 1.9 : Représentation géométrique des inter-réflexions produites à l'intérieur du vitrage.	23
Figure 1.10 : Représentation géométrique des inter-réflexions produites à l'intérieur d'un double vitrage.	24
Figure 1.11 : Réflectances, transmittances et absorptances d'un double vitrage phonique standard 4/16/10 en fonction de l'angle d'incidence calculés avec les relations de Fresnel. Seule la transmittance est identique selon le sens de traversée du rayonnement.	24
Figure 1.12 : Transmittances et réflectances à l'angle d'incidence normal (0°) en fonction des longueurs d'onde pour un vitrage sans traitement de 4mm (haut) et pour le même vitrage avec un traitement argent supplémentaire (bas) [Dama 2004].	25
Figure 1.13 : Schéma des deux principaux types de double vitrage avec traitement : « heat mirror » et « solar control ».	26
Figure 1.14 : Transmittances et réflectances dans le spectre visible et solaire pour un vitrage traité à l'argent d'un côté (front) en fonction de l'angle d'incidence selon les modèles ASHRAE et HEUM comparés aux valeurs mesurées (EXP) à un angle d'incidence de 0° et 60° [Dama 2004].	27
Figures 1.15 : Exemples de protections solaires présentées dans [Kotey 2009a].	28
Figure 1.16 : En haut, coupe d'un textile et représentation du flux transmis avec différents angles d'incidence. En bas, angles limites de 3 textiles de différentes compositions.	29
Figure 1.17 : Représentation schématique du « path-tracing » avec méthodes de Monte Carlo pour le calcul de l'irradiance en un point. Les flèches sont dans le sens du calcul, ce sens est opposé à celui de la propagation de la lumière.	33
Figure 1.18 : Liste (non-exhaustive) des principales techniques de calcul des facteurs de vue existantes [Cohen 1993].	37
Figure 1.19 : Effet de l'éclairage reçu au niveau des yeux sur le décalage du rythme de sécrétion de mélatonine (A) et sur la suppression de mélatonine (B) pour une durée d'exposition de 6,5h [Zeitzer 2000].	45

Figure 1.20 : Photographie, thermographie, et thermographie simulée par la méthode des éléments finis d'une rue de Bayonne [Aguerre 2019].	49
Figure 1.21 : Photographie, thermographie, et thermographie simulée avec modèle 3D détaillé par la méthode des éléments finis d'une rue de Bayonne [Aguerre 2020].	49
Figure 2.1 : Maillage d'une surface d'un élément opaque.	53
Figure 2.2 : Exemple et représentation d'un élément opaque à réflexion diffuse.	54
Figure 2.3 : Exemple et représentation d'un élément opaque spéculaire.	54
Figure 2.4 : Dépendance angulaire de la réflectance spéculaire d'un miroir selon le modèle de Schlick original.	55
Figure 2.5 : Maillage des deux surfaces d'un même élément fin non-opaque.	56
Figure 2.6 : Exemple et représentation d'un vitrage.	56
Figure 2.7 : Exemple et représentation d'un élément de protection solaire textile.	57
Figure 2.8 : Dépendance angulaire de la réflectance d'un simple vitrage selon les relations de Fresnel, la simplification de Schlick (exposant 5), et la simplification de Schlick modifiée (exposant 3.5).	58
Figure 2.9 : Dépendance angulaire de la transmittance directe d'un simple vitrage selon les relations de Fresnel, la simplification de Schlick (exposant 5), et la simplification de Schlick modifiée (exposant 3.5).	58
Figure 2.10 : Dépendance angulaire de la transmittance du textile a) Figure 2.8 selon l'adaptation fonction de dépendance angulaire proposée, et les valeurs de transmittance directe mesurées par [Kotey 2009a].	59
Figure 2.11 : Vues 3D et projections orthographiques de 3 partitions de l'hémisphère en 145, 2 000 et 5 000 carreaux selon [Beckers 2012].	61
Figure 2.12 : Distributions des radiances du ciel pour 3 jours à la même heure en novembre à Bordeaux avec différents couverts nuageux.	63
Figure 2.13 : Distributions des radiances du ciel à 13h, 14h, et 15h le 1 ^{er} novembre à Bordeaux.	63
Figure 2.14 : Radiance directe du soleil $L_{e,dir}$ le 1 ^{er} novembre à 15h avec différentes résolutions de partition du ciel : 145 tuiles, 2000 tuiles, et 5000 tuiles. Un zoom est fait sur la tuile du soleil, le point noir marque la position exacte du soleil.	64
Figure 2.15 : Géométrie de la pièce avec la position des capteurs et son maillage en carreaux de 0.1x0.1m.	65
Figure 2.16 : A gauche ; distributions des éclairements calculés dans la pièce et sur le plan de travail lors du 1 ^{er} novembre 15h à Bordeaux avec des partitions de ciel de 145, 500, 2000, 5000, et 20000 tuiles. A droite ; la différence entre les éclairements et ceux calculés avec 20000 tuiles de ciel.	66
Figure 2.17 : Principe général du calcul des facteurs de vue par lancer de rayons depuis un carreau avec 50 rayons : génération des directions (haut gauche) ; génération des origines (haut droit) ; et tir des rayons (bas).	68
Figure 2.18 : Partition d'un hémisphère en 50 tuiles de facteurs de vue égaux (gauche) ; Position des centres de chaque tuile (centre) ; Directions générées (droite).	69
Figure 2.19 : Etapes de la génération aléatoire d'un point sur la surface d'un carreau quadrilatère.	70
Figure 2.20 : Carreau avec 50 points d'origine distribués aléatoirement sur sa surface (gauche) ; 50 rayons tirés depuis ces points dans les directions préalablement définies (droite).	70
Figure 2.21 : Représentation des deux configurations testées dans un cube ; i est le carreau origine, j et k sont les carreaux cibles.	71

Figure 2.22 : ECLAIREMENT SUR LA SCÈNE, SUR LE PLAN DE TRAVAIL ET ÉCLAIREMENT MÉDIAN SUR LE PLAN DE TRAVAIL E_{med} À UN MOMENT ENSOLEILLÉ. LE MAILLAGE DU HAUT EST COMPOSÉ DE CARREAU DE 0.1x0.1m.	73
Figure 2.23 : ECLAIREMENTS CALCULÉS AVEC UN MAILLAGE GROSSIER COMPOSÉ DE CARREAU DE 3x3m AVEC LES QUATRE MÉTHODES D'INTÉGRATION. L'ERREUR RELATIVE DE L'ÉCLAIREMENT MÉDIAN EST CALCULÉE EN PRENANT L'ÉCLAIREMENT MÉDIAN DU MAILLAGE FIN (FIGURE 2.22) COMME RÉFÉRENCE ($E_{med} = 1\ 198$ lux). LA REPÈRE ORANGE CORRESPOND À LA ZONE QUI REÇOIT LE SOLEIL DIRECTEMENT.	74
Figure 2.24 : ERREUR RELATIVE MOYENNE DE L'ÉCLAIREMENT MOYEN AU COURS D'UNE ANNÉE ENTIERE EN FONCTION DU MAILLAGE POUR LES 4 MÉTHODES TESTÉES.	75
Figure 2.25 : COUPE TRANSVERSALE DES BÂTIMENTS D'UNE RUE DE BAYONNE. LE CARREAU MARQUÉ EN JAUNE VOIT, DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT, L'ENSEMBLE DES CARREAU ROUGES. LES CARREAU VUS DIRECTEMENT (VERTS) ET APRÈS RÉFLEXIONS SPÉCULAIRES ET TRANSMISSIONS DIRECTES (BLEUS) SONT SÉPARÉS DANS LES DEUX IMAGES DE DROITE.	78
Figure 2.26 : MATRICE DES FACTEURS DE VUE ÉTENDUS DANS UN CUBE COMPOSÉ UNIQUEMENT D'ÉLÉMENTS OPAQUES DIFFUS. LES FACTEURS DE VUE ET FACTEURS DE VUE ÉTENDUS SONT IDENTIQUES.	79
Figure 2.27 : FACTEURS DE VUE (F), PARTIE SUPPLÉMENTAIRE DES FACTEURS DE VUE ÉTENDUS (S), ET FACTEUR DE VUE ÉTENDU (F^{ext}) DU CARREAU BAS. LE CARREAU BLEU GAUCHE EST UN MIROIR.	80
Figure 2.28 : MATRICE DES FACTEURS DE VUE ÉTENDUS DANS UN CUBE. TOUTES LES SURFACES SONT DIFFUSES SAUF LE CARREAU GAUCHE EN BLEU QUI EST UN MIROIR.	80
Figure 2.29 : FACTEURS DE VUE (F), PARTIE SUPPLÉMENTAIRE DES FACTEURS DE VUE ÉTENDUS (S), ET FACTEUR DE VUE ÉTENDU (F^{ext}) DU CARREAU BAS. LES CARREAU GAUCHE ET DROITE EN BLEU SONT DES MIROIRS.	81
Figure 2.30 : CONVERGENCE DE L'ERREUR RELATIVE DU CALCUL DE $S_{Bas-Haut}$ EN FONCTION DU NOMBRE DE RÉFLEXIONS SPÉCULAIRES PRISES EN COMPTE DANS LE CAS DU CUBE AVEC LES DEUX CARREAU MIROIRS PARALLÈLES.	81
Figure 2.31 : MATRICE DES FACTEURS DE VUE ÉTENDUS DANS UN CUBE. TOUTES LES SURFACES SONT DIFFUSES SAUF LES CARREAU BLEUS « GAUCHE » ET « DROITE » QUI SONT DES MIROIRS.	82
Figure 2.32 : MATRICE DES FACTEURS DE VUE ÉTENDUS DANS UN CUBE COMPOSÉ UNIQUEMENT DE MIROIRS (HAUT), ET DANS UN CUBE OÙ UN SEUL CARREAU N'EST PAS UN MIROIR (BAS).	82
Figure 2.33 : ERREUR RELATIVE DE $S_{Bas-Haut}$ (GAUCHE) ET TEMPS DE CALCUL DE \mathbf{F}^{ext} (DROITE) EN FONCTION DU NOMBRE DE RÉFLEXIONS SPÉCULAIRES 6/6 ET 5/6 DES CARREAU MIROIRS. PAR CARREAU, 1 000 000 DE RAYONS SONT LANCÉS INITIALEMENT.	83
Figure 2.34 : DÉCOMPOSITION DE L'ÉQUATION DE LA RADIOSITÉ (GAUCHE) ET DE L'ÉQUATION DE L'IRRADIANCE (DROITE).	85
Figure 2.35 : DÉCOMPOSITION DE L'ÉQUATION DE L'IRRADIANCE AVEC LA TRANSMISSION DIFFUSE (CARREAU CORRESPONDANTS 1 ET 1').	86
Figure 3.1 : EXEMPLES DE PUITS DE JOUR SITUÉS À BAYONNE BOULEVARD DU REMPART LACHEPAILLET (HAUT), QUAI AUGUSTIN CHAHO (CENTRE), ET RUE PORT DE BERTACO (BAS).	96
Figure 3.2 : A GAUCHE : LA GÉOMÉTRIE DU PUITS DE JOUR DE SECTION 3mx3m (WI = 4) ET LES 4 PIÈCES ADJACENTES AVEC LEUR GRILLE DE CAPTEURS ; À DROITE : LE PUITS DE JOUR AVEC UNE SECTION ÉTROITE DE 1.5mx1.5m (WI = 8).	98
Figure 3.3 : LES 4 VARIANTES ÉTUDEES ET LES 2 SUPPLÉMENTAIRES AVEC LE DISPOSITIF DE REDIRECTION. LES MIROIRS SONT EN BLEU CIEL.	99
Figure 3.4 : SCHÉMA DE PRINCIPE DU DISPOSITIF DE REDIRECTION DES RAYONS DU SOLEIL POUR LA MOITIÉ HIVERNALE DE L'ANNÉE.	100
Figure 3.5 : LOCALISATION DE STOCKHOLM (60°N), BILBAO (43°N), BARCELONE (41°N), MEXICO (19°N) ET QUITO (0°).	101
Figure 3.6 : RÉPARTITION ANNUELLE DES ILLUMINANCES NORMALES DIRECTES POUR BARCELONE ET BILBAO.	101

Figure 3.7 : Répartition des DA ₁₀₀ dans les différents étages pour les différentes variantes de puits de jour avec des surfaces diffuses. Les performances du rez-de-chaussée sont présentées plus finement pour chaque cas.	104
Figure 3.8 : Impact de la réflectance diffuse des murs du puits de jour sur les DA ₁₀₀ (gauche) et sur l'éclairement moyen annuel (droite). La réflectance du sol du puits de jour est constante et égale à 60%.	105
Figure 3.9 : Répartition des DA ₁₀₀ dans les différents étages et détails des performances du rez-de-chaussée pour les différentes variantes de puits de jour avec des murs miroirs.	107
Figure 3.10 : Illuminances reçues au midi solaire, un jour ensoleillé de novembre. À gauche : surfaces diffuses claires ; à droite : murs miroirs.	108
Figure 3.11 : Répartition des DA _{max,2000} dans trois configurations : à gauche, surfaces sombres diffuses ; au milieu, surfaces claires diffuses ; à droite, murs miroir.	109
Figure 3.12 : Répartition des DA ₂₀₀ dans les différents étages et détails des performances du rez-de-chaussée pour les différentes variantes de puits de jour avec un seuil de 200 lux.	110
Figure 3.13 : Illuminances reçues au midi solaire, un jour ensoleillé de novembre. À gauche : surfaces diffuses claires ; à droite : surfaces diffuses claires plus dispositif de redirection.	111
Figure 3.14 : Distribution de DA100 et détails des performances au rez-de-chaussée pendant l'année et pendant la moitié hivernale. Les deux cas comportent des surfaces claires diffuses. À droite, le dispositif de redirection est inclus.	112
Figure 3.15 : Performances au rez-de-chaussée avec différents angles d'élévation du dispositif. Le seuil est de 200 lux.	115
Figure 3.16 : Les trois variantes de puits de jour utilisées pour la comparaison.	122
Figure 3.17 : Résultats et temps de calcul de simulations RADIANCE des éclairements instantanés sur les quatre plans de travail avec différentes quantités de rayons émis par capteur (paramètre -ad). (30 réflexions sont prises en compte)	123
Figure 3.18 : Résultats et temps de calcul de simulations RADIANCE des éclairements instantanés sur les plans de travail avec différent nombres de réflexions (paramètres -ab et -lr). (1 000 000 rayons sont tirés)	124
Figure 3.19 : Convergence des résultats de DA ₁₀₀ dans les 4 étages d'un puits de jour avec surfaces claires durant la moitié estivale et hivernale en fonction du nombre de réflexions diffuses prises en compte.	125
Figure 3.20 : Convergence des résultats de DA ₁₀₀ dans les 4 étages d'un puits de jour avec murs miroirs durant la moitié estivale et hivernale en fonction du nombre de réflexions spéculaires.	125
Figure 3.21 : Comparaison des résultats d'éclairements instantanés entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE pour la variante avec surfaces claires.	126
Figure 3.22 : Comparaison des résultats d'éclairements instantanés entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE pour la variante avec surfaces claires et le dispositif de redirection.	127
Figure 3.23 : Comparaison des résultats d'éclairements instantanés entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE pour la variante avec murs miroirs.	127
Figure 3.24 : Comparaison des temps de calcul à précision équivalente entre la méthode de radiosité développée et RADIANCE.	130
Figure 3.25 : Comparaison des résultats de la méthode de radiosité développée et de RADIANCE à temps de calcul équivalents. Deux simulations RADIANCE sont présentées : la première avec un nombre de rayons diminué, la seconde avec un nombre de réflexion diminué.	130
Figure 4.1 : Répartitions annuelles des irradiances normales directes de Cordoue et de Bilbao.	136

Figure 4.2 : Toiles d'ombrage dans la rue Sierpes à Séville en 1918 et dans la rue Gondomar à Cordoue en 2018.	137
Figure 4.3 : Image satellite et facteurs de vue du ciel dans le modèle de Cordoue.	137
Figure 4.4 : Modèle du quartier de Cordoue. Les deux vues sont orientées vers le nord.	138
Figure 4.5 : Modèle de la rue avec et sans toile d'ombrage.	138
Figure 4.6 : Plans de travail pour le calcul des indicateurs dynamiques annuels d'éclairage naturel.	141
Figure 4.7 : Coupe du maillage volumique éléments finis et propriétés des matériaux de la rue.	142
Figure 4.8 : Maillage fin (bleu) composé de 266 245 carreaux d'une surface moyenne de 2.10 m ² et maillage secondaire (rouge) composé de 32 614 carreaux d'une surface moyenne de 17.22 m ² .	143
Figure 4.9 : Dimensions des matrices des facteurs de vue étendus avec et sans maillage secondaire. La représentation est proportionnelle aux dimensions des matrices.	144
Figure 4.10 : Temps de calcul des facteurs de vue étendus en fonction du nombre de réflexions dans la variante spéculaire du modèle.	146
Figure 4.11 : Nombre de réflexions nécessaires par carreau pour une erreur d'irradiance inférieure à 5% dans la rue claire le 26 septembre à 9h.	146
Figure 4.12 : Pourcentage de façade, sol et toiture avec une erreur relative d'irradiance inférieure à 5% en fonction du nombre de réflexions dans la variante diffuse normale, spéculaire normale, et diffuse claire.	147
Figure 4.13 : Différences d'irradiance entre la rue normale spéculaire et normale diffuse (variante spéculaire – variante diffuse).	149
Figure 4.14 : Irradiances et fractions reçues par réflexion dans les 4 variantes le 26 septembre à 10h.	150
Figure 4.15 : À gauche, coupe du maillage de la rue, provenant du maillage volumique pour les simulations thermiques en éléments finis, composé de 76 980 carreaux avec une aire moyenne de 0,057m ² (0.23*0.23). À droite, coupe du maillage secondaire de la rue composé de 12 010 carreaux avec une aire moyenne de 0,367m ² (0,6*0,6m).	151
Figure 4.16 : Dimensions des matrices des facteurs de vue étendus avec et sans maillage secondaire. La représentation est proportionnelle aux dimensions des matrices.	152
Figure 4.17 : Irradiances calculées avec les deux maillages A (gauche) et B (droite) le 26 septembre à 11h.	153
Figure 4.18 : Différence d'irradiance et différence relative entre les irradiances calculées avec les deux maillages (le maillage A est pris pour référence).	153
Figure 4.19 : Nombre de réflexions nécessaires pour obtenir une erreur relative des irradiances inférieure à 5% par carreau dans la rue claire le 26 septembre à midi (solaire).	154
Figure 4.20 : Erreurs absolues (gauche) et erreurs relatives (droite) sur les irradiances en ne considérant que 3 réflexions diffuses dans la rue claire le 26 septembre à midi (solaire).	155
Figure 4.21 : Températures et éclairements calculées dans la rue claire le 26 septembre à midi (solaire) avec l'infini des réflexions (gauche) et avec 3 réflexions diffuses (droite).	155
Figure 4.22 : Températures de surface, densités de flux absorbé, et éclairements à midi (solaire) le 26 septembre dans la rue normale diffuse et la rue normale spéculaire.	156
Figure 4.23 : Températures de surface et densité de flux absorbé entre 8h et 16h le 26 septembre dans la rue normale diffuse et normale spéculaire.	157
Figure 4.24 : DA ₅₀₀ et calendrier des éclairements médians dans les pièces exposées au nord pour les variantes avec les façades diffuses et spéculaires.	158

Figure 4.25 : Températures de surface, densités de flux absorbé, et éclairements au midi solaire le 26 septembre dans la rue claire diffuse et la rue sombre diffuse. 159

Figure 4.26 : DA₅₀₀ et calendrier des éclairements médian obtenus dans les pièces exposées au nord pour les variantes de la rue claire et sombre. 160

Figure 4.27 : Températures de surface, densités de flux absorbé, et éclairements le 26 septembre à midi (solaire) dans la rue claire diffuse sans toile, avec la toile blanche et avec la toile noire. 161

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Récapitulatif des 4 types d'éléments considérés dans l'environnement bâti avec leurs modes de réflexion et de transmission.	60
Tableau 2.2 : Erreurs relatives obtenues dans le calcul de F_{ij} avec différent nombre de rayons émis pour les 4 méthodes testées. Valeur exacte de $F_{ij} = 0.200044$.	72
Tableau 2.3 : Erreurs relatives obtenues dans le calcul de F_{ik} avec différent nombre de rayons émis pour les 4 méthodes testées. Valeur exacte de $F_{ik} = 0.199825$.	72
Tableau 2.4 : Condition de conservation d'énergie à respecter pour chaque type d'élément.	77
Tableau 3.1 : Caractéristiques des matériaux des surfaces intérieures et des surfaces extérieures pour les différentes configurations étudiées.	99
Tableau 3.2 : Influence de l'orientation par rapport au Sud sur les performances du dispositif dans un puits de jour avec des surfaces claires.	113
Tableau 3.3 : Influence de l'angle d'élévation du dispositif sur les performances dans un puits de jour avec des surfaces claires.	114
Tableau 3.4 : Performances au rez-de-chaussée durant la moitié hivernale avec et sans dispositif de redirection dans deux puits de jour, l'un diffus clair et l'autre composé de miroirs. Section 3 x 3m ; WI = 4.	116
Tableau 3.5 : Performances au rez-de-chaussée durant la moitié hivernale avec et sans dispositif de redirection dans deux puits de jour, l'un diffus clair et l'autre composé de miroirs. Section 1.5x1.5m ; WI = 8.	117
Tableau 3.6 : Performances de différentes configurations de puits de jour à Stockholm, Bilbao, Barcelona, Mexico, and Quito.	118
Tableau 3.7 : Récapitulatif général du fonctionnement de la méthode de radiosité et de la méthode par path-tracing avec Monte Carlo.	121
Tableau 3.8 : Indicateurs d'erreur entre les éclairements moyens sur le plan de travail de toute l'année calculés avec la méthode de radiosité et RADIANCE.	129
Tableau 4.1 : Récapitulatif des propriétés des surfaces des 4 variantes du quartier.	139
Tableau 4.2 : Récapitulatif des propriétés des surfaces intérieures et extérieures des 6 variantes de la rue.	139
Tableau 4.3 : Densités, tailles et temps de calcul des matrices des facteurs de vue dans le modèle de Cordoue avec et sans les façades spéculaires.	145
Tableau 4.4 : Rayonnement solaire annuel [$\text{kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$] reçu total, reçu par réflexion et absorbé par les façades, le sol et les toitures dans les 4 variantes étudiées.	148
Listes des figures et tableaux	193

Nomenclature, acronymes et expressions courantes

Nomenclature

ω	[sr]	Angle solide	
F	[-]	Facteur de vue <i>ou facteur de forme, facteur de configuration</i>	
F^{ext}	[-]	Facteur de vue étendu	
λ	[nm]	Longueur d'onde	
Q	Q_e Q_v	[J] [lm.s]	Énergie rayonnante Quantité de lumière
Φ	Φ_e Φ_v	[W ; J.s ⁻¹] [lm ; cd.s]	Flux énergétique <i>ou puissance rayonnante</i> Flux lumineux
I	I_e I_v	[W.sr ⁻¹] [lm.sr ⁻¹]	Intensité énergétique Intensité lumineuse
E	E_e E_v	[W.m ⁻²] [lux]	Irradiance <i>ou éclairement énergétique</i> Éclairement <i>ou « illuminance »</i>
L	L_e L_v	[W.m ⁻² .sr ⁻¹] [lm.m ⁻² .sr ⁻¹]	Radiance <i>ou luminance énergétique</i> Luminance
M	M_e M_v	[W.m ⁻²] [lm.m ⁻²]	Exitance énergétique Exitance lumineuse
B	B_e B_v	[W.m ⁻²] [lm.m ⁻²]	Radiosité Luminosité
A	[W.m ⁻²]	Densité de flux absorbé	
ρ	[-]	Réflectance <i>ou coefficient de réflexion, facteur de réflexion</i>	
ρ_d	[-]	Réflectance diffuse	
ρ_r	[-]	Réflectance spéculaire	
r	[-]	Réflectivité	
τ	[-]	Transmittance <i>ou coefficient de transmission, facteur de transmission</i>	
τ_d	[-]	Transmittance diffuse	
τ_r	[-]	Transmittance directe	
t	[-]	Transmissivité	
α	[-]	Absorptance <i>ou coefficient d'absorption</i>	

f_r	[sr ⁻¹]	BRDF <i>fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle</i>
f_t	[sr ⁻¹]	BTDF <i>fonction de distribution de la transmittance bidirectionnelle</i>
f	[sr ⁻¹]	BSDF <i>fonction de distribution de la diffusion bidirectionnelle</i>
n	[\cdot]	Indice de réfraction
\hat{n}	[\cdot]	Indice de réfraction complexe
κ	[\cdot]	Indice d'absorption
T	[°C]	Température
ε	[\cdot]	Émissivité
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Capacité thermique spécifique
d	[kg.m ⁻³]	Densité
k	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Conductivité thermique
h	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	Coefficient de convection thermique

Acronymes

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BD	Blind Days
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BRE	Building Research Establishment
BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function
BTDF	Bidirectional Transmittance Distribution Function
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CBDM	Climate Based Daylight Modeling
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CPU	Central Processing Unit
CS	Circadian Stimulus
DA	Daylight Autonomy
DC	Daylight Coefficients
DF	Daylight Factor
EPW	EnergyPlus Weather
EN	European Norm
FEM	Finite Element Method
IESNA	Illuminating engineering society of North America
ISO	International Organization for Standardization
IWEC	International Weather for Energy Calculations
SWEC	Spanish Weather for Energy Calculations
MBE	Mean Bias Error (erreur moyenne)
RMSE	Root Mean Square error (erreur quadratique moyenne)
RT	Réglementation Thermique
STD	Simulation Thermique Dynamique
SVF	Sky View factor
TWY	Typical Weather Year
UDI	Useful Daylight Illuminance
WI	Well Index

Expressions courantes

<i>Éclairage</i>	Application de lumière à un site, à des objets ou à leur entourage pour qu'ils puissent être vus.
<i>Éclairage naturel</i>	Désigne la pratique consistant à concevoir un espace (placement d'ouvertures, mise en place de systèmes réfléchissants, etc.) de manière à ce que la lumière naturelle puisse y fournir un éclairage approprié.
<i>Éclairement naturel</i>	Flux lumineux reçu par unité de surface provenant directement ou indirectement du soleil. E [lux]
<i>Lumière naturelle</i>	Partie visible du rayonnement solaire. Plage de longueur d'ondes considérée : $380 - 780\text{ nm}$.
<i>Potentiel solaire</i>	Potentiel d'un élément ou d'une surface à produire de l'énergie à l'aide d'applications solaires actives, telles que le photovoltaïque et le solaire thermique.
<i>Apports solaires</i>	Désigne l'augmentation de l'énergie thermique d'un espace, d'un objet ou d'une structure par absorption du rayonnement solaire incident.
<i>Dispositif solaire actif</i>	Système ou dispositif spécifique qui récupèrent les rayons du soleil et les transforment en électricité ou en chaleur.
<i>Dispositif solaire passif</i>	Système ou dispositif qui permet de contrôler la distribution du rayonnement solaire (fenêtre, mur trombe, dispositif réfléchissant) sans faire appel à une autre source d'énergie.
<i>Rayonnement ondes courtes</i>	Rayonnement dans le spectre ultraviolet (UV), visible (VIS) et infrarouge proche (NIR). Plage de longueur d'ondes considérée : $0.1 - 4\text{ }\mu\text{m}$.
<i>Rayonnement ondes longues</i>	Rayonnement dans le spectre infrarouge thermique (IR). Plage de longueur d'ondes considérée : $4 - 50\text{ }\mu\text{m}$.