



**HAL**  
open science

# Evaluation de l'impact des propriétés optiques large-bande de l'environnement sur le productible (énergie incidente) en milieu urbain

Blaise Raybaud

► **To cite this version:**

Blaise Raybaud. Evaluation de l'impact des propriétés optiques large-bande de l'environnement sur le productible (énergie incidente) en milieu urbain. Energie électrique. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSEI126 . tel-03178836

**HAL Id: tel-03178836**

**<https://theses.hal.science/tel-03178836v1>**

Submitted on 24 Mar 2021

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

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



N°d'ordre NNT : 2020LYSEI126

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON  
opérée au sein de  
L'INSA de Lyon

Ecole Doctorale 162  
Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique  
(MEGA)

Spécialité/ discipline de doctorat :  
Thermique Energétique

Soutenue publiquement le 04/12/2020, par :  
RAYBAUD Blaise

---

Evaluation de l'impact des propriétés optiques  
large-bande de l'environnement sur la  
distribution énergétique en milieu urbain

---

Devant le jury composé de :

WOLOSZYN, Monika	Professeur des Universités, USMB	Présidente
MUSY, Marjorie	Directrice de Recherche, CEREMA	Rapporteuse
BATSALE, Jean-Christophe	Professeur des Universités, ENSAM	Rapporteur
CASSAGNE, Valerick	Ingénieur de Recherche, TOTAL	Examineur
THONY, Philippe	Chef de Laboratoire, CEA Liten	Encadrant
VERGNAULT, Etienne	Maître de Conférences, UCBL	Co-Directeur de thèse
ROUX, Jean-Jacques	Professeur des Universités, INSA Lyon	Directeur de thèse

**Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020**

<b>SIGLE</b>	<b>ECOLE DOCTORALE</b>	<b>NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE</b>
<b>CHIMIE</b>	<b>CHIMIE DE LYON</b> <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a> Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> INSA : R. GOURDON	<b>M. Stéphane DANIELE</b> Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a>
<b>E.E.A.</b>	<b>ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b> <a href="http://edeea.ec-lyon.fr">http://edeea.ec-lyon.fr</a> Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN <a href="mailto:ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr">ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr</a>	<b>M. Gérard SCORLETTI</b> École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 <a href="mailto:gerard.scorletti@ec-lyon.fr">gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a>
<b>E2M2</b>	<b>ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION</b> <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a> Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES <a href="mailto:secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr">secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Philippe NORMAND</b> UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:philippe.normand@univ-lyon1.fr">philippe.normand@univ-lyon1.fr</a>
<b>EDISS</b>	<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</b> <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a> Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE <a href="mailto:secretariat.ediss@univ-lyon1.fr">secretariat.ediss@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Sylvie RICARD-BLUM</b> Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Curien - 3ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tel : +33(0)4 72 44 82 32 <a href="mailto:sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr">sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr</a>
<b>INFOMATHS</b>	<b>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</b> <a href="http://edinfomaths.universite-lyon.fr">http://edinfomaths.universite-lyon.fr</a> Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Hamamache KHEDDOUCI</b> Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tel : 04.72.44.83.69 <a href="mailto:hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr">hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr</a>
<b>Matériaux</b>	<b>MATÉRIAUX DE LYON</b> <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a> Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction <a href="mailto:ed.materiaux@insa-lyon.fr">ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jean-Yves BUFFIÈRE</b> INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 <a href="mailto:jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr">jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr</a>
<b>MEGA</b>	<b>MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE</b> <a href="http://edmega.universite-lyon.fr">http://edmega.universite-lyon.fr</a> Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jocelyn BONJOUR</b> INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr">jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr</a>
<b>ScSo</b>	<b>ScSo*</b> <a href="http://ed483.univ-lyon2.fr">http://ed483.univ-lyon2.fr</a> Sec. : Véronique GUICHARD INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 <a href="mailto:veronique.cervantes@univ-lyon2.fr">veronique.cervantes@univ-lyon2.fr</a>	<b>M. Christian MONTES</b> Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 <a href="mailto:christian.montes@univ-lyon2.fr">christian.montes@univ-lyon2.fr</a>

# Avant propos.

Cette thèse a été financée par le Département des Technologies Solaires (DTS), département rattaché au Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et les Nanomatériaux (LITEN), et installé à l'Institut National des Energies Solaire (INES) sur la commune du Bourget du Lac. Les travaux ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Intégration PhotoVoltaïque (LIPV) inclus dans le Service Bâtiments et Systèmes Thermiques (SBST). Je tiens à remercier Olivier Flechon, Etienne Wurtz et Philippe Thony qui m'ont offert l'opportunité de réaliser cette thèse, pour leur écoute et leurs conseils. Je tiens également à remercier Franck Alessi, Aurélie Foucquier et Arnaud Jay qui m'ont donné la chance de réaliser mon stage de fin d'étude au sein du SBST malgré une formation initiale non orientée bâtiment. Sans ce stage, je n'en serais pas là aujourd'hui.

Sur le plan administratif, cette thèse est rattaché au Centre Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL, UMR 5008) qui est une unité mixte de recherche de l'INSA Lyon, du CNRS et de l'Université Claude Bernard Lyon-1. J'ai pu bénéficier d'un encadrement de grande qualité avec une direction de thèse partagée entre Jean-Jacques Roux (directeur de thèse) et Etienne Vergnault (encadrement). L'accompagnement scientifique a également été réalisé par Philippe Thony, qui fût à la fois mon chef de laboratoire mais aussi mon encadrant côté CEA. Ils ont su trouver le temps nécessaire dans les moments importants malgré leurs nombreuses contraintes. Je tiens également à les remercier pour leurs qualités humaines et les nombreuses conversations moins formelles que nous avons pu avoir.

Cette thèse a également pu être réalisée grâce à l'aide de nombreuses personnes, qui m'ont toujours répondu positivement et se sont rendues disponibles pour moi. Je tiens à remercier en particulier Mathieu Galtier pour son aide sur les méthodes de Monte-Carlo. Je tiens également à dire un grand merci à Angela Disdier qui a pris le temps de réaliser, et recommencer plusieurs fois, les mesures optiques. Je crois que c'était long et pénible mais Angela a toujours été à mon écoute et souriante. Je remercie de même Estelle Le Baron qui a permis la réalisation de ces mesures lorsque j'en ai eu besoin sans forcément savoir si j'arriverai à les exploiter. Enfin, je tiens à remercier très chaleureusement Rodolphe Marion, que j'ai contacté en première année de thèse pour réaliser des mesures spectrales,

et qui s'est rendu très disponible, me faisant découvrir l'utilisation du spectromètre en question et le domaine des études spectrales.

Je tiens à remercier tout autant mes co-bureaux, Adrien et David, pour toutes les conversations enrichissantes que l'on a pu avoir, et leur soutien et aide. Une mention spéciale au troisième co-bureau, qui fût mon stagiaire durant la seconde année de thèse avant de se lancer à son tour dans trois années de labeur, Benjamin. L'encadrement de ton stage fût une expérience très enrichissante, tant sur le plan humain que scientifique. J'espère avoir pu t'apporter autant que ce que tu m'as apporté et je te souhaite tout le meilleur pour ta thèse que je suivrai de près! Plus généralement, je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues qui sont des personnes exceptionnelles et avec qui je ne compte plus les bons moments passés, au boulot comme à l'extérieur, merci à vous! Enfin je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien et leurs conseils. A ce titre je tiens à remercier particulièrement mes parents et Victor qui aura passé du temps à relire ce document. J'espère, mais je n'en doute pas, que l'on continuera à échanger tout autant. Merci pour tes relectures attentives et le temps consacré. J'ai également une pensée particulière pour mes deux grand-parents, Henri (pépé) et Simone (mémé) décédés en 2019 et 2020. Leur bienveillance et amour sont des éléments qui m'ont construits et m'ont amenés jusqu'ici.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Introduction générale.</b>	<b>1</b>
<b>1 Les enjeux du rayonnement en milieu urbain</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Les enjeux énergétiques face à l'urbanisation. . . . .	6
1.2.1 Chiffres clefs du climat. . . . .	6
1.2.2 Les énergies décarbonnées. . . . .	10
1.2.3 Les énergies renouvelables en France. . . . .	12
1.2.4 Démographie et urbanisation. . . . .	16
1.3 Le rayonnement solaire en milieu urbain. . . . .	18
1.3.1 Les enjeux du rayonnement solaire en ville. . . . .	18
1.3.2 Valorisation énergétique : le BIPV. . . . .	21
1.4 La modélisation des transferts radiatifs en milieu urbain. . . . .	31
1.4.1 Modification des phénomènes à l'échelle de la rue. . . . .	31
1.4.2 Modélisation des ensoleillements. . . . .	31
1.4.3 Modélisation des transferts thermiques. . . . .	37
1.4.4 Limites des modèles actuels . . . . .	38

1.5	Objectifs de l'étude. . . . .	39
<b>2</b>	<b>Simulation des transferts radiatifs avec des propriétés réfléchives fines.</b>	<b>41</b>
2.1	Introduction. . . . .	43
2.2	Nomenclature Chapitre 2. . . . .	44
2.3	Généralités sur la ressource solaire. . . . .	48
2.3.1	Position du soleil. . . . .	49
2.3.2	Rayonnement direct. . . . .	49
2.3.3	Le rayonnement diffus. . . . .	51
2.3.4	Le rayonnement réfléchi. . . . .	52
2.4	Modèle de ciel. . . . .	52
2.4.1	Modélisation de la voûte céleste. . . . .	52
2.4.2	Calcul de la répartition du rayonnement diffus. . . . .	54
2.5	Modèles d'ensoleillements. . . . .	55
2.5.1	Introduction sur la prise en compte des réflexions. . . . .	55
2.5.2	Radiosité. . . . .	57
2.5.3	Le lancer de rayons. . . . .	65
2.6	Résultats intermédiaires. . . . .	79
2.6.1	Cas d'étude. . . . .	79
2.6.2	Cartographies d'ensoleillement. . . . .	82
2.6.3	Résultats issus de la méthode par radiosité. . . . .	83
2.6.4	Résultats issus de la méthode par lancer de rayons. . . . .	86
2.6.5	Comparaison des résultats. . . . .	90
2.6.6	Synthèse des performances des codes prototypes développés. . . . .	97
2.7	Perspectives. . . . .	99
2.7.1	Perspectives spectrales. . . . .	100

2.7.2	Autres perspectives et limites. . . . .	104
<b>3</b>	<b>Acquisition de propriétés radiatives fines et mesures de leur impact.</b>	<b>106</b>
3.1	Introduction. . . . .	109
3.2	Variation des propriétés en fonction de la longueur d'onde : mesures spectrales. . . . .	109
3.2.1	Appareils de mesure. . . . .	109
3.2.2	Choix des matériaux de mesure . . . . .	112
3.2.3	Spectres de réflexion en incidence normale. . . . .	113
3.3	Mesures sous différents angles d'incidences. . . . .	116
3.3.1	Nomenclature utilisée. . . . .	117
3.3.2	Etat de l'art de la reconstitution de réflexions optiques. . . . .	119
3.3.3	BRDF (Bidirectional Reflectance Density Function). . . . .	120
3.3.4	Mesures réalisées à l'ARTA. . . . .	122
3.3.5	Equations de Fresnel. . . . .	125
3.3.6	Determination de l'indice de réfraction de l'échantillon. . . . .	127
3.3.7	Construction du modèle de BRDF. . . . .	127
3.3.8	Approximation des données par le modèle. . . . .	130
3.3.9	Résultats pour les différents matériaux qualifiés. . . . .	136
3.3.10	Validation de l'hypothèse de Fresnel. . . . .	136
3.3.11	Conclusion sur la reconstitution des propriétés de réflexion. . . . .	138
3.4	Mesures en conditions réelles : utilisation d'une maquette de référence. . . . .	139
3.4.1	Construction de la maquette. . . . .	139
3.4.2	Campagnes de mesure. . . . .	154
3.4.3	Mesures en configuration $H/W = 1$ . . . . .	154

3.4.4	Analyse des résultats en configuration $H/W = 1$ : Différences observées. . . . .	157
3.4.5	Reconstitution des coefficients de réflexion. . . . .	162
3.4.6	Mesures en configuration $H/W = 2$ . . . . .	164
3.4.7	Analyse des résultats en configuration $H/W = 2$ . . . . .	165
3.4.8	Reconstitution des coefficients de réflexion. . . . .	168
3.4.9	Perspective sur l'acquisition des mesures. . . . .	169
3.5	Conclusions sur les mesures. . . . .	169
3.6	Perspectives. . . . .	169
<b>4</b>	<b>Intégration des propriétés des matériaux mesurées dans les simulations.</b>	<b>171</b>
4.1	Introduction. . . . .	172
4.2	Intégration de propriétés optiques mixtes. . . . .	172
4.2.1	Intégration dans le modèle par lancer de rayons . . . . .	172
4.2.2	Prise en compte des propriétés de réflexion dans Grasshopper. . . . .	173
4.3	Comparaison des résultats simulés et des mesures expérimentales. . . . .	175
4.3.1	Construction des modèles. . . . .	176
4.3.2	Comparaison des résultats sous hypothèse lambertienne : étude de la configuration n°6 / cas du crépis. . . . .	180
4.3.3	Comparaison des résultats sous hypothèses spéculaires : étude de cas de la configuration n°7 / cas du bardage blanc. . . . .	183
4.4	Conclusion sur les comparaisons. . . . .	193
	<b>Conclusion générale.</b>	<b>195</b>
	<b>Perspectives générales.</b>	<b>198</b>
<b>A</b>	<b>Complément sur l'instrumentation de la maquette.</b>	<b>200</b>
A.1	Choix des capteurs. . . . .	201

A.2	Chaîne d'acquisition. . . . .	201
A.3	Test sous banc d'ensoleillement (BES). . . . .	202
A.4	Résultats des campagnes d'acquisition. . . . .	206
A.4.1	Configuration $H/W = 1$ . . . . .	206
A.4.2	Configuration $H/W = 2$ . . . . .	212
<b>B</b>	<b>Complément sur les mesures optiques.</b>	<b>217</b>
B.1	Mesures réalisées sur l'échantillon de bardage rouge. . . . .	218
B.2	Mesures sur l'échantillon de bardage noir. . . . .	219
B.3	Mesures sur un échantillon de verre (BK7 <sup>®</sup> ). . . . .	221
B.4	Observations générales. . . . .	223

# Introduction générale.

Il existe aujourd'hui une volonté d'implanter la technologie photovoltaïque en milieu urbain, en particulier en façade des bâtiments. Or, la densification et l'étalement urbain engendrent des interactions non négligeables entre les bâtiments. Ces interactions, qui se traduisent par des effets de masques et de réflexions, génèrent une répartition complexe de l'irradiance au sein des rues et il est donc important de la déterminer. L'étude de la répartition de l'irradiance au sein de cette géométrie urbaine permet une évaluation du potentiel solaire pour les technologies photovoltaïques et thermiques, et plus généralement une aide à la conception des nouveaux quartiers. En effet, leur modélisation permet aussi de comprendre en partie les phénomènes à l'origine des effets d'îlots de chaleur urbains. Cela peut alors aboutir à l'aide à la conception de stratégies avec pour objectif de limiter l'échauffement des surfaces urbaines.

Le Chapitre 1 propose une mise en contexte de l'étude. Les enjeux énergétiques auxquels nous faisons actuellement face y sont présentés. Les effets du réchauffement climatique en milieu urbain, et plus particulièrement les effets d'îlot de chaleur urbain, sont introduits en parallèle. La volonté de construire des quartiers à faible empreinte carbone se traduit alors par une conception optimisée de ces derniers. L'architecture et l'urbanisation de ces zones urbaines doivent alors considérer le potentiel solaire, en tant que ressource de lumière et d'énergie, mais également comme l'une des causes des îlots de chaleur urbains par piégeage radiatif : une modélisation précise des ensoleillements apparaît donc essentielle. Différents modèles de simulation d'ensoleillement sont ainsi introduits et un bilan de l'état de l'art est dressé.

Le Chapitre 2 présente alors deux modèles développés durant la thèse, l'un reposant sur une méthode par radiosité, l'autre sur une méthode de lancer de rayons. Chaque modèle est décrit en détails.

Parallèlement aux travaux de simulation, des travaux expérimentaux ont été réalisés. Ce sont ces études qui font l'objet du Chapitre 3. Dans un premier temps, des mesures des propriétés de réflexion des différents matériaux sont présentées. L'objectif est de qualifier différents matériaux typiques des façades urbaines, afin de déterminer la distribution énergétique après réflexion. Des modèles de simulation optique sont utilisés et adaptés à notre étude. Dans un second temps, l'objectif étant de mesurer la répartition

énergétique au sein d'une rue en fonction des matériaux composant les façades de celle-ci, des mesures sont réalisées sur la maquette d'un canyon urbain.

Enfin, le Chapitre 4 a pour objectif de synthétiser l'ensemble des travaux dans une étude comparative. Les propriétés optiques des matériaux, reconstruits dans le Chapitre 3, sont injectées dans les modèles présentés au Chapitre 2. Les simulations sont réalisées pour des journées expérimentales présentées au Chapitre 3, permettant une confrontation des 2 modèles avec les résultats expérimentaux.

Enfin, pour clore ce document, nous présentons les conclusions de l'étude réalisée au cours de ces 3 années.

# Chapitre 1

## Les enjeux du rayonnement en milieu urbain

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Les enjeux énergétiques face à l'urbanisation.</b>	<b>6</b>
1.2.1	Chiffres clefs du climat.	6
1.2.1.1	Conséquences.	8
	A l'échelle mondiale.	8
	A l'échelle de la France.	9
1.2.2	Les énergies décarbonnées.	10
1.2.3	Les énergies renouvelables en France.	12
1.2.4	Démographie et urbanisation.	16
<b>1.3</b>	<b>Le rayonnement solaire en milieu urbain.</b>	<b>18</b>
1.3.1	Les enjeux du rayonnement solaire en ville.	18
1.3.1.1	Le défi architectural.	19
1.3.1.2	Le défi climatique à l'échelle urbaine.	20
1.3.1.3	Le défi technologique : les technologies solaires.	20
1.3.2	Valorisation énergétique : le BIPV.	21
1.3.2.1	La contrainte d'intégration.	22
1.3.2.2	Les contraintes technologiques.	24
1.3.2.3	La contrainte esthétique.	27
1.3.2.4	La contrainte de coût.	28
1.3.2.5	L'insertion des énergies renouvelables dans le mix énergétique.	30
<b>1.4</b>	<b>La modélisation des transferts radiatifs en milieu urbain.</b>	<b>31</b>
1.4.1	Modification des phénomènes à l'échelle de la rue.	31
1.4.2	Modélisation des ensoleillements.	31
1.4.2.1	Modèles par radiosité.	32

Solene. . . . .	32
CitySim. . . . .	33
LICASO. . . . .	34
Laser-F. . . . .	34
1.4.2.2 Modèles par lancer de rayons. . . . .	34
DaySim. . . . .	35
Logiciels incorporés à Rhinoceros3D. . . . .	35
Archiwizard. . . . .	36
Open Studio. . . . .	37
Autres modèles d'ensoleillement. . . . .	37
1.4.3 Modélisation des transferts thermiques. . . . .	37
1.4.4 Limites des modèles actuels . . . . .	38
<b>1.5 Objectifs de l'étude. . . . .</b>	<b>39</b>

---

## 1.1 Introduction

Le réchauffement climatique est l'un des défis les plus importants auquel l'humanité ait été confrontée. Il est la conséquence directe de nos modes de vies. Ces derniers sont une source croissante de besoins énergétiques. Jusqu'à présent, ces besoins ont principalement été assouvis par l'utilisation des énergies fossiles. Ces énergies, historiquement utilisées pour leur accessibilité et leurs forts rendements, contribuent fortement au réchauffement climatique. Elles sont en effet une source importante d'émissions de gaz à effet de serre, que ce soit au moment de leur extraction, de leur acheminement et surtout au moment de leur utilisation finale.

La concentration de la population dans les villes conduit à une augmentation de la consommation énergétique de ces dernières, qui sont responsables de 71% des émissions de  $CO_2$  en 2019 dans le monde [1]. En France métropolitaine, le chauffage est responsable de 83% des émissions liées au secteur résidentiel et tertiaire, qui lui-même est représenté 23% des émissions totale en France, en 2017 [2]. Le secteur du bâtiment, qui est déjà l'un des plus gros consommateurs d'énergie finale avec le secteur des transports (respectivement 44% et 31,3% en 2017 en France [3]), doit alors devenir "soutenable" au travers d'une réduction et d'une dé-carbonisation de sa consommation énergétique. Ainsi, les recherches pour diminuer son empreinte écologique se sont diversifiées et intensifiées ces dernières années. Sur le plan juridique, des lois existent, comme la loi Pope de juillet 2005 [4]. Le bâtiment idéal doit à présent être producteur et économe en énergie. Pour ce faire, son fonctionnement doit en particulier comporter des systèmes performants, que l'on peut distinguer en systèmes "passifs" et en systèmes "actifs". Les systèmes "passifs" visent une optimisation des énergies utilisées par le bâtiment en améliorant ses propriétés, comme l'isolation, tandis que les solutions "actives" visent une optimisation de la gestion des ressources énergétiques, notamment par des pilotages intelligents [5]. En milieu urbain, l'étude d'un bâtiment seul ne peut se faire, et l'impact des bâtiments implantés aux alentours doit être considérée. Par ailleurs, de nombreuses études semblent montrer qu'une densité urbaine importante permet d'obtenir des quartiers plus économes en énergie, notamment en raison de la diminution des besoins liée au transport d'énergie [6].

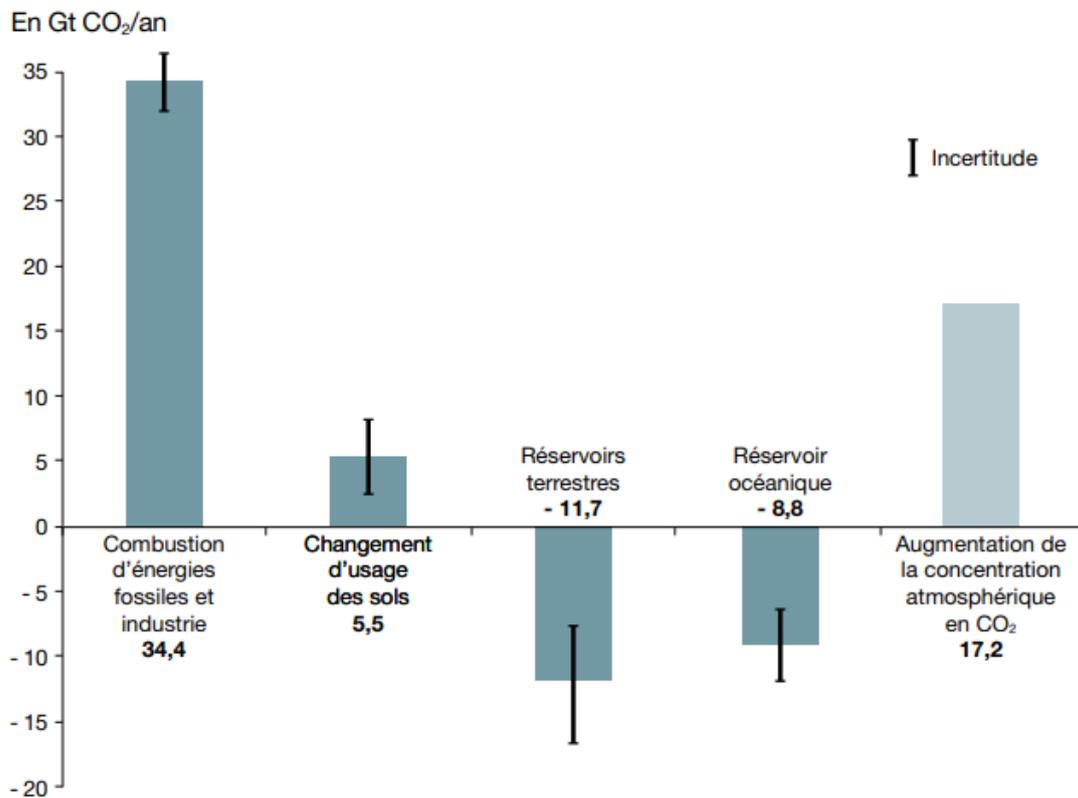
Afin de rendre les bâtiments producteurs en énergie, on assiste ces dernières années à un développement des énergies solaires, notamment photovoltaïques. Cependant, les fortes densités urbaines, en augmentant les masques et donc les ombrages, d'une part diminuent les apports radiatifs en milieu urbain et d'autre part contribuent à leur augmentation via les multi-reflexions. Il s'agit donc dans ce premier chapitre d'identifier les enjeux de la maîtrise de l'ensoleillement en milieu urbain. Cela se fera au travers d'une analyse des besoins énergétiques actuels et sur la façon dont les problématiques liées à l'ensoleillement ont historiquement été intégrées dans diverses études. Les technologies photovoltaïques seront également présentées afin de préciser le domaine d'étude de cette thèse. Enfin, l'état de l'art des méthodologies et logiciels permettra d'identifier les hypothèses et les stratégies de simulation des réflexions utilisées aujourd'hui. Cette ana-

lyse orientera par la suite l'étude sur la prise en compte des réflexions dans les modèles d'ensoleillement.

## 1.2 Les enjeux énergétiques face à l'urbanisation.

### 1.2.1 Chiffres clefs du climat.

Aujourd'hui, le dérèglement climatique du globe est reconnu comme étant la conséquence directe des émissions de gaz à effet de serre. Le bilan des flux nets de CO<sub>2</sub> entre sources d'émissions et d'absorptions présenté par le Commissariat Général au Développement Durable en 2020 présente un excédent de 17,2 Gt emmagasiné par an sur les 10 dernières années (entre 2008 et 2017) [7], qui se retrouve stocké dans l'atmosphère (figure 1.1).



Note : l'incertitude pour l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> est très faible ( $\pm 0,07$  Gt CO<sub>2</sub>/an) et n'a pas été représentée sur le graphique.

Source : The Global Carbon Project, Global Carbon Budget, 2018

FIGURE 1.1 – Flux annuels mondiaux de CO<sub>2</sub> entre sources d'émissions et d'absorptions (réservoirs) [7].

Le déséquilibre généré dans cette balance est la source d'un réchauffement du

globe, avec une augmentation des températures très nette (figure 1.2). Les années entre 2014 et 2018 restent les 5 dernières années les plus chaudes jamais enregistrées. Autre conséquence parallèle à l'augmentation des températures, le niveau des mers s'est élevé de 8cm entre 1993 et 2018 [7].

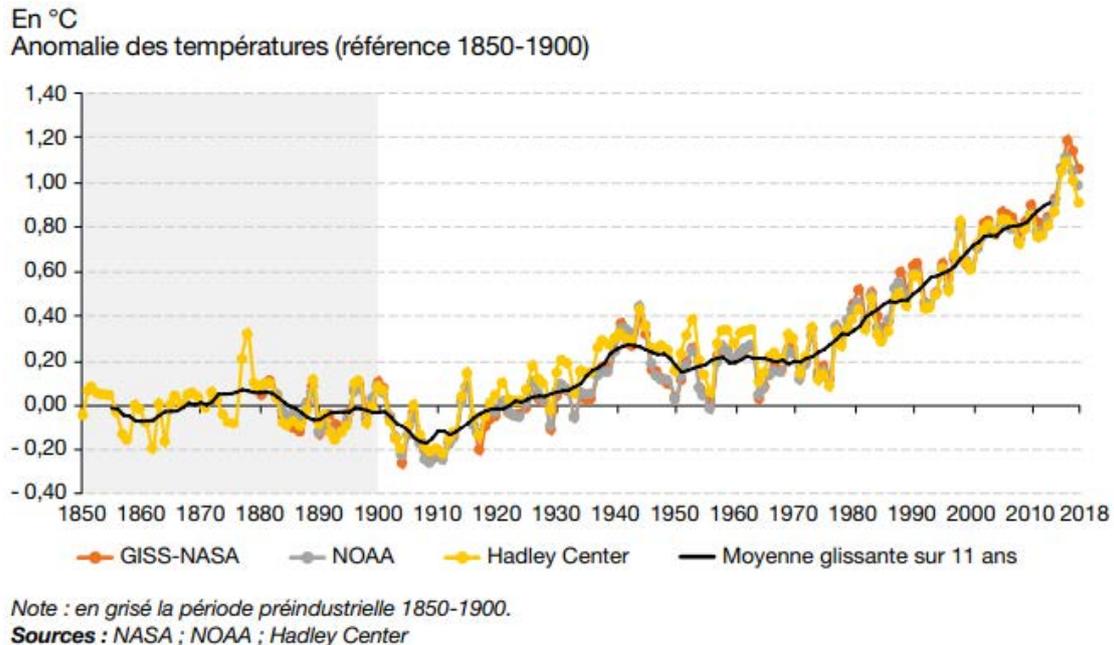


FIGURE 1.2 – Evolution de la température annuelle moyenne mondiale de 1850 à 2018 [7].

Le GIEC, à travers ses travaux et notamment son cinquième rapport, indique qu'il est essentiel de réduire de 40 à 70% les émissions de gaz à effet de serre entre 2010 et 2050 afin de limiter le réchauffement climatique à  $+2^{\circ}\text{C}$ , comme fixé dans les objectifs de l'accord de Paris. Pour atteindre de telles ambitions, ce même rapport indique également que les émissions de gaz à effet de serre devront être « presque nulles, voire négatives en 2100 » [8]. Leurs travaux permettent également de définir des budgets carbone (en Gt  $\text{CO}_2$ ) à ne pas dépasser pour espérer contenir le réchauffement climatique sous une température ciblée avec une probabilité de 66%. Pour limiter le réchauffement de  $+2^{\circ}\text{C}$  et de  $+1,5^{\circ}\text{C}$ , et sans baisse des émissions, ces budgets carbone sont respectivement de 1170 Gt $\text{CO}_2$  et de 420 Gt $\text{CO}_2$ .

La croissance et le développement de pays émergents, a conduit à doubler les émissions de gaz à effet de serre depuis 1970 [2]. Actuellement, les émissions de gaz à effet de serre concernent principalement deux gaz : le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). On évalue via le Potentiel de Réchauffement Global (PGR) l'impact d'un gaz sur le réchauffement climatique. Cet indice correspond au rapport entre l'énergie renvoyée vers le sol par 1kg de gaz pendant 100 ans par rapport à celle renvoyée par 1kg de  $\text{CO}_2$ . Selon cet indice, le méthane a un pouvoir d'effet de serre entre 28 et 30 fois supérieur

à celui du dioxyde de carbone. Certains gaz, peu présents dans l'atmosphère, peuvent avoir des indices PGR allant jusqu'à 16100. Le CO<sub>2</sub> reste le principal gaz responsable du réchauffement climatique car il est très majoritairement présent dans l'atmosphère. Notons au passage que la combustion du charbon continue d'augmenter, restant aujourd'hui encore la principale source d'émission de gaz à effet de serre.

#### 1.2.1.1 Conséquences.

Les conséquences du réchauffement climatique ne sont pas les mêmes sur l'ensemble des territoires.

**A l'échelle mondiale.** A l'échelle mondiale, les conséquences du réchauffement climatiques sont diverses. Elles ne sont pas égales sur l'ensemble de la planète. A commencer par l'élévation des températures. La notion de +1,5 ou de +2°C porte sur une moyenne mondiale. Dans les fait, les projections sur l'élévation des températures pour la période 2090 - 2099 montrent des variations importantes, allant de +0,5°C sur des zones isolées en plein océan et proches des pôles, à +7,5°C au niveau du pôle nord. La carte extraite du livre "Global Warming : The Complete Briefing" [9] montre également que les températures devraient augmenter de manière plus significative dans les terres. La carte présentée figure 1.3 a été déterminée en 2009, et est calculée à partir d'un scénario d'un réchauffement moyen de +2,8°C.

2090–99

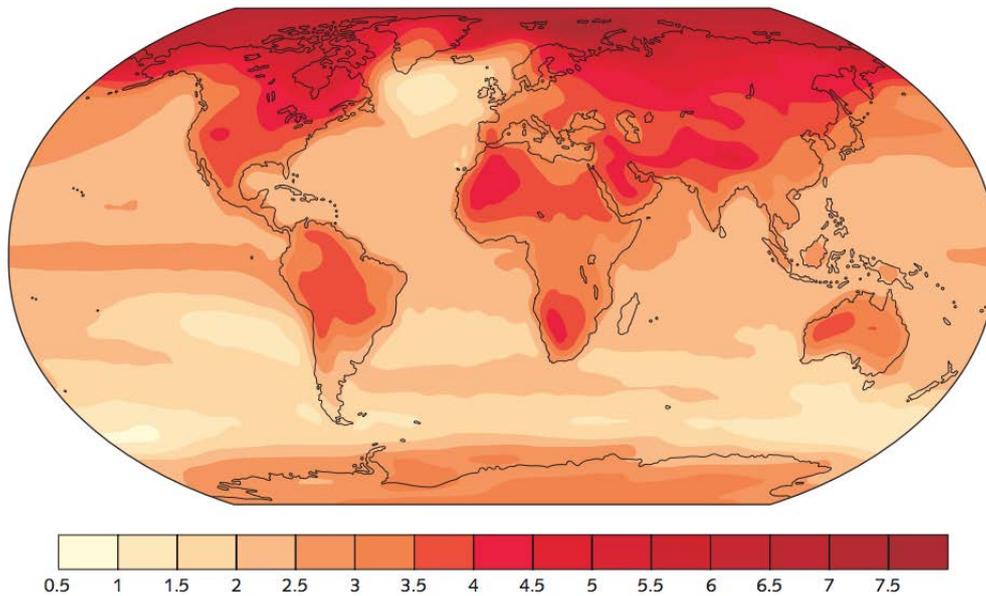


FIGURE 1.3 – Carte de la prévision de la hausse des températures sur la période 2090-2099 en comparaison avec les températures sur la période 1980 - 1990 pour le scénario issu du *Special Report on Emission Scenarios (SRES) A1B* [9].

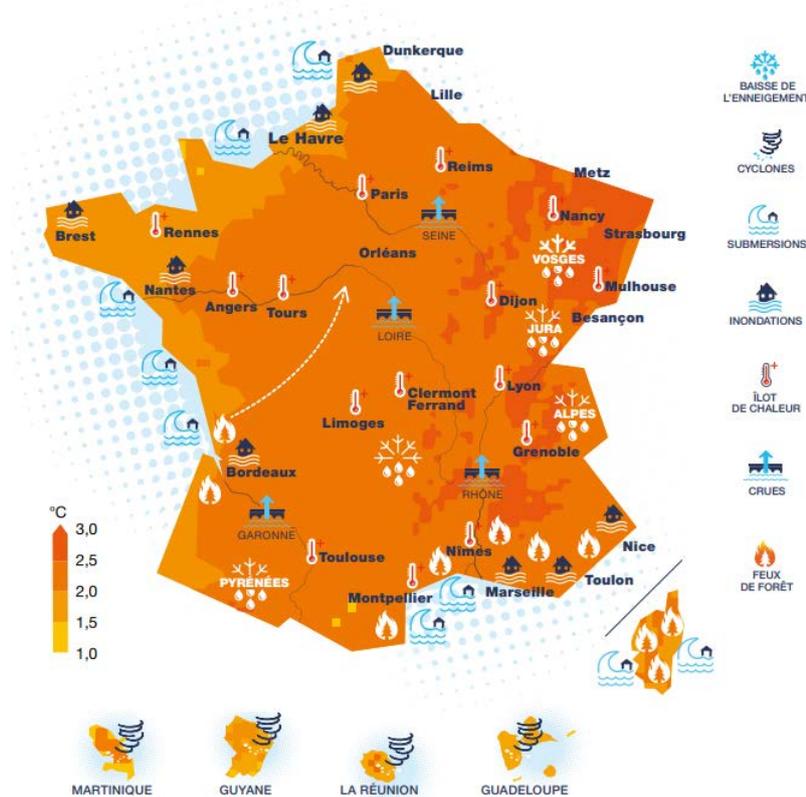
Les principales conséquences du réchauffement climatique impactant la planète sont les suivantes.

- Une augmentation de la température moyenne entraînant des chaleurs extrêmes, notamment dans les zones habitées.
- Une nouvelle répartition des précipitations avec de fortes précipitations dans certaines régions et des probabilités de sécheresse dans d'autres régions ou en fonction des saisons.
- Une élévation du niveau des mers et océans.
- Une augmentation de la températures des océans, couplée à une augmentation de leur acidité et une diminution de leur oxygénation ; l'ensemble présentant un risque pour les écosystèmes marins.
- Une augmentation des risques sanitaires : manques d'alimentation, d'eau, et de moyens de subsistance.

**A l'échelle de la France.** La figure 1.4 issue du rapport "Chiffres clés du climat" fournit par le Commissariat au Développement Durable présente une carte détaillée de la France avec un détail des conséquences du réchauffement climatique en chaque point géographique. On note que 2 risques apparaissent dans un grand nombre d'agglomérations :

- Les effets d'îlot de chaleur urbain, sur lesquels nous reviendrons par la suite
- Les risques de crue ou d'inondation

Cela montre que la France ne fait pas exception et qu'il est nécessaire d'adapter l'architecture urbaine au réchauffement climatique.



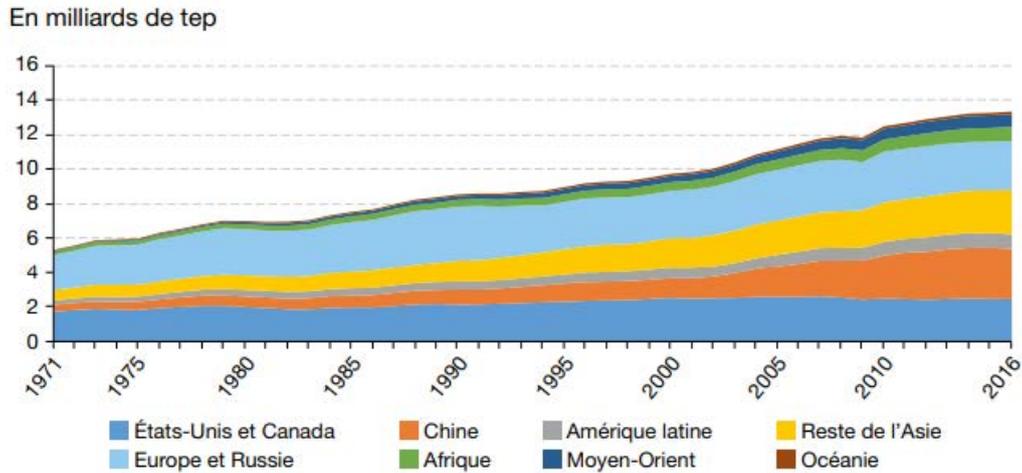
Note : le fond de carte est issu des simulations de « Drias, les futurs du climat » pour un scénario RCP 8.5. Les températures correspondent à la différence entre les températures simulées à l'horizon 2050 et la période de référence 1976-2005. Les données pour Mayotte ne sont pas disponibles à la date de publication.  
**Source :** Drias, les futurs du climat, 2019

FIGURE 1.4 – Carte des impacts observés ou potentiels du réchauffement climatique en France [2]

### 1.2.2 Les énergies décarbonnées.

L'augmentation de la population mondiale conduit à une augmentation des besoins énergétiques à l'échelle de la planète. Cette augmentation de la population mondiale est inégale et est plus importante dans les pays en développement, là où le besoin d'accès à l'énergie est le plus important. Ainsi, si la population dans les pays développés a doublé entre 1950 et 2010, elle a été multipliée par 5 dans les pays en développement [10]. Cela se traduit par une augmentation de la consommation d'énergie primaire (figure 1.5), notamment en Chine et dans le reste de l'Asie depuis les années 1980. L'Afrique

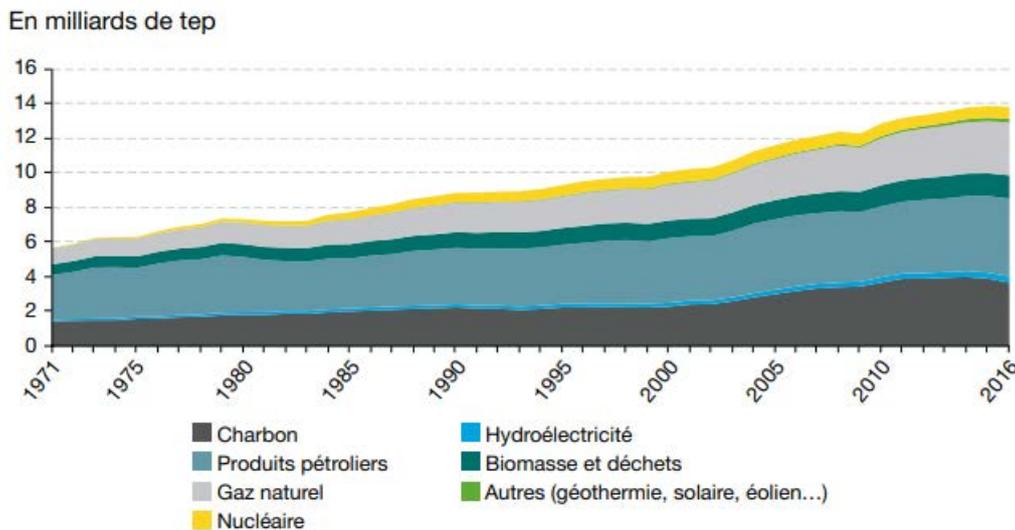
et le Moyen-Orient consomment également de plus en plus d'énergie, bien que leur part reste faible en comparaison aux pays développés. Les consommations européennes et d'Amérique du nord restent pour leur part relativement constantes.



Source : calculs SDES, d'après les données de l'AIE

FIGURE 1.5 – Consommation annuelle d'énergie primaire dans le monde et par zone géographique [11].

L'approvisionnement mondial en énergie primaire par source montre que la hausse de la demande en énergie a été majoritairement satisfaite grâce au charbon, les produits pétroliers, la biomasse et les déchets, le gaz naturel et le nucléaire (figure 1.6). Les autres sources d'énergie peinent à faire leur place, bien que l'on assiste depuis 2010 au développement des énergies renouvelables.



Source : calculs SDES, d'après les données de l'AIE

FIGURE 1.6 – Approvisionnement mondial en énergie primaire par source [11].

Le taux de croissance annuel des énergies renouvelables est en effet bien supérieur à celui des autres sources énergies. Entre 2002 et 2012, le solaire a connu un taux de croissance de 50,6% par an, suivi par l'éolien à 26,1% par an. A titre de comparaison, l'hydroélectrique présentait un taux de croissance annuel de 3,1% et le fossile de 3,9% [12].

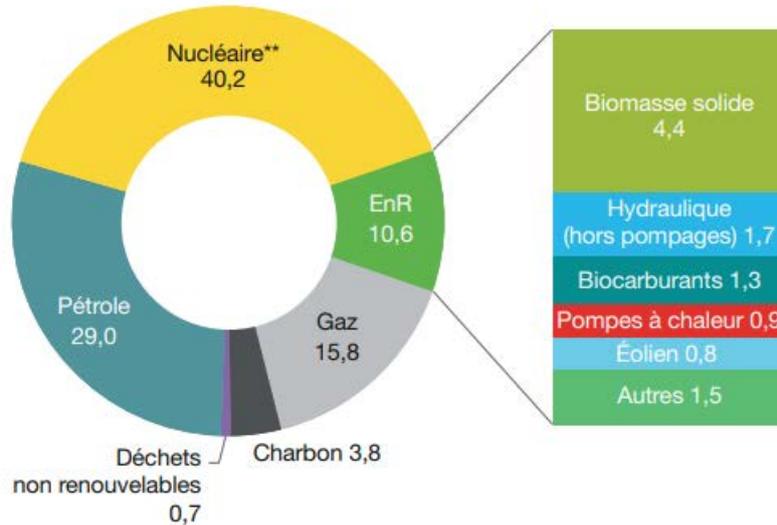
Ainsi, aujourd'hui l'accent est en partie mis sur les énergies décarbonées et moins polluantes. Suite au paquet 2020 qui fixe 3 grands objectifs à l'échelle européenne (à savoir : une réduction de 20% des gaz à effet de serre par rapport à 1990, augmenter la part des énergies renouvelables à 20%, et augmenter de 20% l'efficacité énergétique [13]), la France s'était fixée un objectif de 23% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique en 2020. Début 2019, la France est l'un des pays les plus en retard sur ses objectifs, avec les Pays-Bas.

### 1.2.3 Les énergies renouvelables en France.

Les énergies renouvelables ne représentaient que 9,4% des énergies en 2015 en France [11]. Bien que leur part ait augmenté de +4% ces 10 dernières années, passant de 6,6% en 2007 à 10,7% en 2017, elles ne restent que la 4ème source d'énergie primaire en 2017 (figure 1.7), derrière le nucléaire (40,0%), les produits pétroliers (28,9%) et le gaz (15,7%) [14]. A la même époque, la consommation d'énergie primaire totale en France s'établissait à un total de 251,7 MTep (million de tonnes équivalent pétrole).

**TOTAL : 250 MTEP EN 2017**

En % (données corrigées des variations climatiques)



\* EnR : énergies renouvelables.

\*\* Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale, comparée à la production nucléaire.

\*\*\* Hydraulique hors pompage.

Champ : métropole.

Source : calculs SDES, d'après les données disponibles par énergie

FIGURE 1.7 – Consommation d'énergie primaire par type d'énergie en France en 2017 [14].

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux énergies renouvelables, qui pesaient pour 25,9 MTEp en 2017, on remarque que le premier secteur de production primaire d'énergie en 2017 est le bois-énergie. Le potentiel de cette filière, également appelée biomasse solide, est important dans la mesure où, en France et comme dans la plupart des pays européens, la forêt s'accroît plus rapidement que ce qu'elle n'est exploitée. Elle est toutefois principalement utilisée pour le chauffage, et les nouveaux systèmes à combustible permettent de réduire considérablement les émissions de poussières et particules. Toutes énergies confondues, l'hydraulique représente pour sa part 16,7% de la production au sein des énergies renouvelables, et le solaire photovoltaïque seulement 3,2%, le solaire thermique représentant 0,7%. Il faut donc être conscient que le solaire photovoltaïque représentait moins de 0,5% de la production d'électricité en France en 2017.

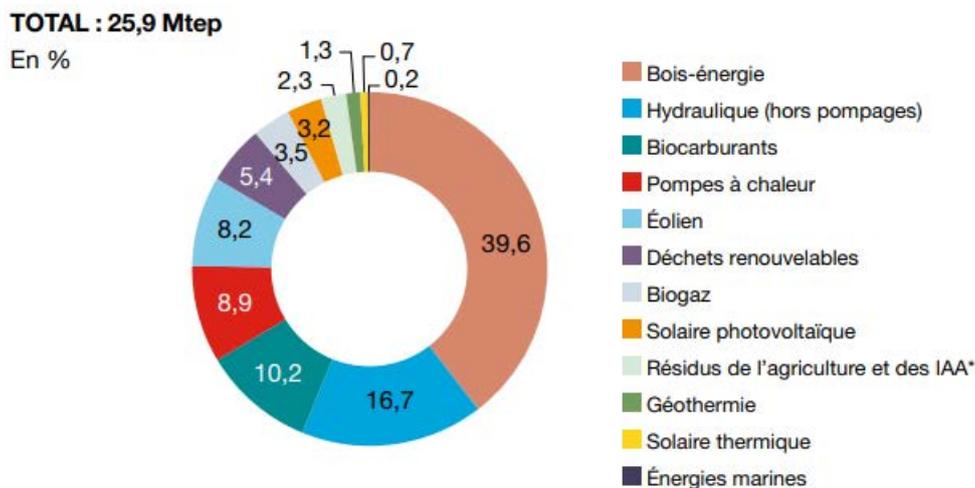


FIGURE 1.8 – Production d'énergie primaire des sources d'énergies renouvelables en France en 2017 [14].

En se focalisant sur la production électrique, on remarque que la part des énergies renouvelables est plus importante dans ce secteur avec 39.6% de la production en 2019. Le nucléaire représente quant à lui 46,6%, et le thermique à combustible 13.7% [15]. La production électrique issue des énergies renouvelables (figure 1.9) se divise en 3 principaux secteurs : l'hydroélectrique, l'éolien et le photovoltaïque. Historiquement fortement implantée en France, le potentiel de création de nouveaux sites est aujourd'hui également limité. L'effort est plutôt concentré sur la rénovation et l'augmentation de la puissance des installations déjà existantes. Par ailleurs, cette production correspond à la seconde production hydroélectrique en Europe, derrière la Norvège.

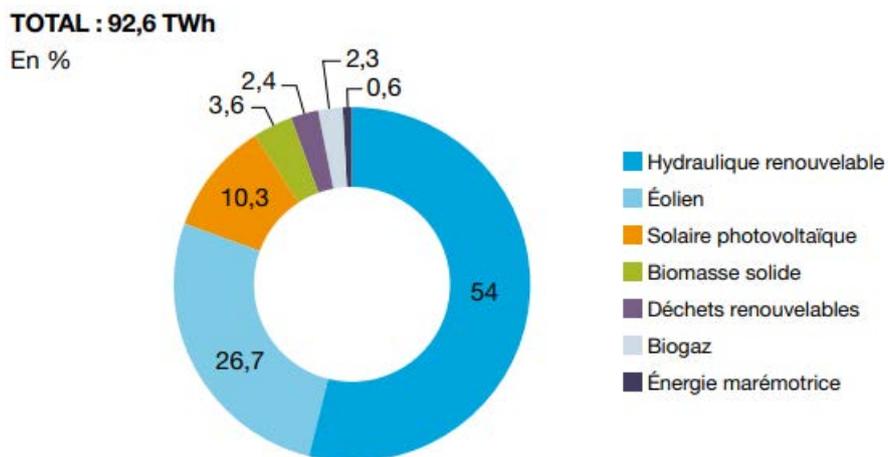


FIGURE 1.9 – Production brut d'électricité issue des énergies renouvelables en France en 2017 [14].

Il est également pertinent de considérer les investissements injectés dans les filières d'énergies renouvelables car ils sont révélateurs des volontés et des visions portées par le gouvernement. On relève figure 1.10 que ces investissements annuels fluctuent entre 6 et 7 Md€(milliards d'euro) depuis 2012, après un pic des investissements, en particulier dans le photovoltaïque, en 2011 et 2012. Le ministère du développement durable précise que ce pic est lié au démarrage de cette filière.

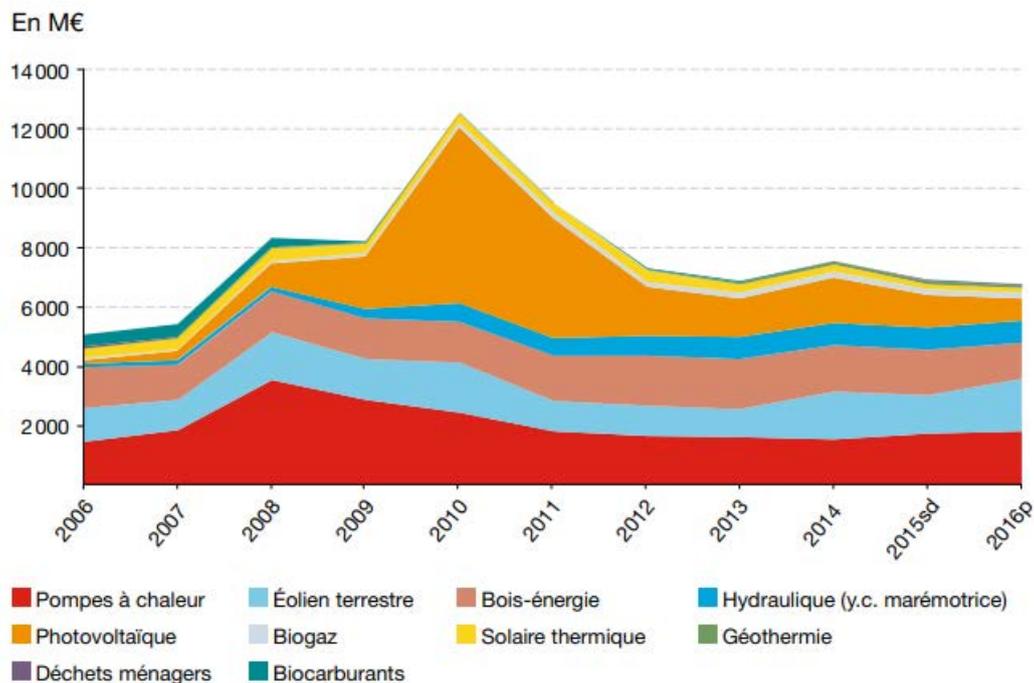


FIGURE 1.10 – Investissements annuels dans les filières des énergies renouvelables en France et depuis 2006 [14].

Parallèlement aux efforts menés dans les secteurs énergétiques, de nombreux secteurs industriels innovent afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre lors de l'utilisation de leurs produits. On peut citer en exemple le marché de l'automobile avec une augmentation des véhicules électriques, dont les ventes en France ont été multipliées par 10 entre 2011 et 2017.

Aujourd'hui, il s'agit donc de faire progresser la part des énergies renouvelables. Cependant, deux limites sont souvent pointées du doigt :

- Leurs faibles rendements et donc les surfaces importantes qu'elles nécessitent.
- Leur production intermittente et irrégulière.

Trouver des solutions pour repousser ces limites fait parti des défis technologiques à relever pour palier au dérèglement climatique.

### 1.2.4 Démographie et urbanisation.

La population mondiale augmente, passant d'environ 3 milliards en 1960, à 7,5 milliards en 2015 [16]. La progression projetée entre 2015 et 2050 est de +110% pour l'Afrique [17]. Les autres continents assistent en effet à un ralentissement de leur croissance démographique. C'est notamment le cas de l'Asie et de l'Amérique latine, qui ont des progressions projetées de respectivement +20 et +24% [17]. L'Europe aurait une croissance démographique pratiquement nulle entre 2015 et 2050, avec même une diminution de sa population de -4%. En moyenne, on chiffre la croissance démographique à +0,6% dans les pays développés contre +2,56% dans les pays les moins développés, sur la période 2010-2015 [18]. En France, la population continue d'augmenter, bien que subissant un très léger ralentissement : +0,4% par an entre 2014 et 2016, +0,5% par an entre 2008 et 2013 et +0,3% par an depuis 2017.

De plus, la plus grande partie de la population quitte les zones rurales, pour aller rejoindre la ville. Cette croissance est relativement linéaire, de +0,38% par an depuis 1960 et jusqu'en 2015, amenant la part de population vivant en ville à passer de 34% en 1960 à un peu plus de 55% en 2015 [16]. Cela se traduit par une augmentation du nombre de grandes villes. L'INED considère que la population est, en 2019, équitablement répartie entre villes de moins et de plus de 500.000 habitants [18] mais que cette balance pourrait être modifiée avec l'attractivité sociale de ces grandes villes.

Pour faire face à cet urbanisation massive, l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) considère que des efforts doivent être menés sur la consommation énergétique des bâtiments et des transports. En France, le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation énergétique, et 25% des émissions de CO<sub>2</sub>. La part des émissions CO<sub>2</sub> monte à 36% à l'échelle de l'Europe [19]. Les différentes Réglementations Thermiques (RT) visent à limiter la consommation énergétique des bâtiments, notamment par une forte étanchéité à l'air et une bonne isolation des façades et toitures, en fixant des objectifs minimaux de performance énergétiques. Le Programme national de REcherche et d'expérimentation sur les BATiments (PREBAT) initié en 2005 a permis dans un premier temps, au travers des nombreux projets financés par l'ADEME, de réduire les besoins énergétiques de bâtiments isolés et affranchis des contraintes urbaines, puis dans un second temps de prendre en compte les contraintes de l'environnement urbain dans lequel est implanté le bâtiment, à savoir le quartier et à plus grande échelle, la ville. Aujourd'hui, la recherche s'oriente vers les Bâtiments dit « à Energie POSitive » (BEPOS). Ces bâtiments ont pour vocation de produire annuellement au moins autant d'énergie, issue de ressources renouvelables, que ce qu'ils en consomment.

Dans le bâtiment, le chauffage, qui représente environ un tiers de la consommation énergétique, et la climatisation, qui représente 5% de la consommation mais dont la part augmente, sont identifiés comme 2 postes clés sur lesquels l'efficacité énergétique doit être améliorée. Par ailleurs, le changement climatique et ses effets sur les zones urbaines modifient les modes de consommation. Il a été démontré que le phénomène d'îlot

de chaleur urbain, détaillé plus loin dans ce rapport, est corrélé à une augmentation de la demande électrique l'été, notamment pour l'utilisation de climatiseurs comme par exemple à Hong-Kong [20], mais aussi à Paris [21]. Ces phénomènes sont également observés dans d'autres climats occidentaux. A l'inverse, et sur les mêmes zones géographiques, les demandes de chauffage diminuent durant l'hiver [20, 22]. Pour répondre à ce besoin croissant en énergie, et dans une volonté de réduire l'impact environnemental de chaque bâtiment, plusieurs stratégies de production, d'acheminement et d'économies d'énergie en milieu urbain se mettent en place [23]. Deux moyens de productions sont aujourd'hui identifiés. Concernant la production d'électricité, le potentiel solaire est identifié comme un potentiel énergétique important. Mais il fait face à des rendements relativement faibles, et aux difficultés d'installation sur lesquelles nous reviendront par la suite. Concernant le chauffage, les réseaux de chaleur permettent de mutualiser les besoins de chauffage. Ils peuvent reposer sur l'utilisation d'énergie naturelle, comme la géothermie ou des chaufferies mutualisées situées en périphérie urbaine. Enfin la chaleur peut également être récupérée et issue d'usines d'incinération, de bassins (naturels ou non), de l'industrie ou de systèmes de cogénération [24].

La majorité des études convergent sur le fait qu'une ville économe en énergie est une ville dense. Ces études mettent en avant le maillage compact des bâtiments qui permet en particulier de réduire les besoins en consommations liées aux déplacements ou au chauffage [25]. Sur ce second point, ce sont notamment les dimensions des nouveaux bâtiments qui sont responsables de pertes thermiques [26]. Toutefois, c'est cette même densité importante qui génère des effets d'îlot de chaleur urbain [27]. On peut alors supposer qu'un optimum de densité existe.

Par ailleurs, il n'en reste pas moins que la densification et l'étalement des surfaces urbaines jouent un rôle majeur dans le réchauffement climatique. Dans ces zones, l'humain remplace les surfaces végétalisées et les points d'eau par des surfaces opaques et étanches absorbant plus de rayonnement solaire et aux propriétés d'émissions plus élevées. Ces surfaces ont également des propriétés différentes en terme de conduction et de stockage de l'énergie qu'elles absorbent. L'augmentation et la concentration de ces surfaces, couplées à une diminution des phénomènes d'évapo-transpiration des surfaces végétalisées et à une concentration de polluants plus importante en milieu urbain [28], amène à une augmentation des températures au sein de ces zones. L'EPA (l'Agence Américaine de la Protection de l'Environnement) parle de température annuelle supérieure de 1 à 3°C en ville par rapport aux environnements ruraux. Elle mentionne également que cet écart de température peut atteindre 12°C en soirée [29], lorsque les différentes surfaces rayonnent l'énergie absorbée durant la journée. Cependant, ces mêmes façades qui contribuent au réchauffement de l'environnement urbain sont également des zones exposées au rayonnement de courte longueur d'onde, que l'on définit comme la bande 400nm – 1100nm, cette bande spectrale correspondant à celle absorbée par le silicium pour produire de l'électricité. Différentes technologies solaires ont été développées pour permettre l'exploitation de cette ressource.

Parallèlement à l’encouragement à la production énergétique en milieu urbain, la réduction de la consommation énergétique des villes s’inscrit pleinement dans une stratégie de réduction globale de leur impact [30]. Dans cette optique, la densité urbaine est aujourd’hui reconnue comme un facteur de minimisation de l’impact énergétique des villes [25, 31]. Cette densification permet de réduire l’impact énergétique sur deux points. Si des études comme celle de Maïza [32] montrent que la densité urbaine permet de réduire la consommation de chaque bâtiment, d’autres études comme celle de Steemers [33] montrent que la densité urbaine permet également de réduire l’empreinte énergétique des transports. Toutefois, comme le souligne Bonhomme [34] dans sa thèse, les études interdisciplinaires restent minoritaires et l’interconnexion de ces phénomènes liés à la densification urbaine reste mal connue.

Afin d’évaluer l’impact de l’architecture urbaine sur la consommation énergétique d’une ville, ou sur son potentiel solaire, une approche possible consiste à définir la morphologie urbaine optimale en fonction du climat. L’objectif de ces études consiste généralement à fournir des indicateurs fiables permettant d’évaluer rapidement la performance énergétique issue des apports solaires sur un quartier. D’un point de vue énergétique, une architecture adaptée permet de valoriser l’éclairage intérieur naturel, mais aussi de modifier les besoins de chauffage et de rafraîchissement des bâtiments. Morganti [35] montre que l’exposition des façades au soleil, fonction de la topographie urbaine, est corrélée à la performance énergétique de ces bâtiments. Il évalue l’impact de la topographie urbaine au travers d’indicateurs nommés UMIs (Urban Morphology Indicators). Pour cela, il étudie la corrélation entre les indicateurs UMIs et le potentiel solaire en façade dans le cas d’un climat méditerranéen. En se basant sur 14 quartiers à l’architecture typique méditerranéenne, il montre notamment que sur un quartier donné de surface au sol  $A$ , se sont les coefficients d’emprise au sol des bâtiments (notés  $GSI$  (*Gorss Space Index*)), du ratio de façade par rapport à la surface du quartier (noté  $VH_{urb}$  (*Facade to site ratio*)) et le facteur de ciel (noté  $SF$  (*Sky Factor*)) qui présentent les meilleures corrélations avec l’irradiance solaire annuelle incidente sur les façades (noté  $SI_y$  (*Solar Irradiation*)).

### 1.3 Le rayonnement solaire en milieu urbain.

#### 1.3.1 Les enjeux du rayonnement solaire en ville.

La pénétration de la lumière naturelle en milieu urbain a plusieurs avantages. Si elle est identifiée comme une source importante d’énergie, elle joue également un rôle important dans le bien être des citoyens [36]. Comme repris par Vermeulen dans ses travaux [37], la thèse d’Amina Harzallah [38] liste les différents axes de recherche et de mutation urbaine à réaliser afin d’associer l’urbanisme avec bien être humain :

- L’orientation des bâtiments et des voies.
- Les gabarits des rues et des bâtiments.
- Les formes des bâtiments.
- Les différents dispositifs de contrôle solaire.

Le défi de la ville solaire se manifeste ainsi au travers de trois axes : le défi architectural, le défi climatique, notamment à l'échelle urbaine locale, et le défi technologique [39].

### 1.3.1.1 Le défi architectural.

L'homme a rapidement compris que l'accès à la lumière solaire en milieu urbain est fortement dépendant du contexte urbain local. L'architecture locale, initialement influencée par le contexte physique et culturel [37], impacte les gains solaires des bâtiments, en particulier en façade. L'adaptation des bâtiments pour lutter contre l'impact du climat apparaît avant J.-C. Dans les régions fortement ensoleillées proches du pourtour méditerranéen, les villes présentent des rues étroites permettant de limiter l'irradiance solaire et ainsi l'effet d'îlot de chaleur.

On assiste dès la fin du *XIX*<sup>ème</sup> siècle à une volonté d'amener le soleil en ville [40] par l'utilisation de systèmes canalisant la lumière céleste. Par la suite, la découverte des propriétés sanitaires, et en particulier d'asepsie, du rayonnement direct du soleil amène les architectes à composer avec le mouvement du soleil et envisager des constructions tournantes. Dans le même esprit et pour s'adapter à la contrainte de la ville, l'architecte allemand Ludwig Hilberseimer propose en 1920 d'orienter les bâtiments vers le sud en limitant la projection des ombres.

Après la seconde guerre mondiale, plusieurs études commencent à prendre en compte l'impact de l'architecture urbaine sur les apports solaires. Knowles [41] est l'un des premiers à s'intéresser à la problématique de l'ensoleillement dans les villes modernes, et à chercher à réglementer son accès. Il définit l'enveloppe solaire, qui permet de traduire en un problème géométrique l'accès à la ressource solaire. Ses études étaient motivées par la mise en place d'un droit à l'ensoleillement dans les réglementations d'urbanisme [37]. Cela sera traduit par ce qu'il nomme *Solar Right Enveloppe (SRE)*. Comme l'explique Vermeulen [37] dans ses travaux, la SRE réglemente la hauteur des nouvelles constructions afin de ne pas obstruer l'accès à la lumière solaire sur des périodes prédéfinies. La forme des bâtiments est alors optimisée afin de limiter l'impact des ombres à dates fixées sur l'année, comme illustré figure 1.11.

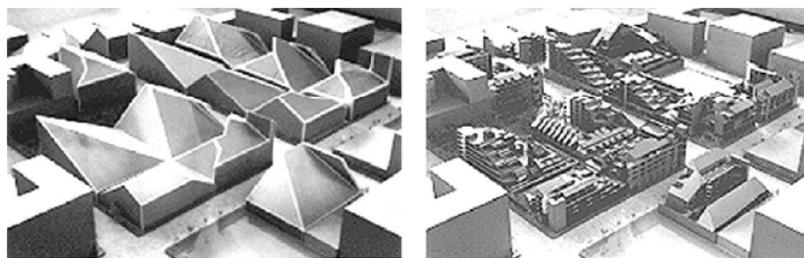


FIGURE 1.11 – Optimisation du volume de nouveaux bâtiments selon la définition de l'enveloppe solaire de Knowles [41].

La crise pétrolière des années 1970 [40] motive une volonté de valoriser et d'exploiter l'énergie solaire localement. Cette vision change dans les années 1980. Les recommandations médicales visant à combattre les "troubles affectifs saisonniers" générés par un manque d'exposition à la lumière naturelle, et des carences en vitamine D, inciteront également à encourager l'accès à la lumière solaire. Cependant, l'impact nocif sur le corps humain d'une exposition longue au rayonnement direct liée au rayonnement ultra violet inquiète. Parallèlement aux inquiétudes sanitaires, les études sur le phénomène d'îlot de chaleur urbain mettent en cause le piégeage de l'énergie solaire généré par la topographie urbaine et les matériaux de construction utilisés. Sur le plan scientifique, Aida et Goth montrent à ce moment là, en 1982, que le piégeage radiatif est maximal lorsque le rapport d'aspect des rues, qui correspond au ratio "Hauteur des bâtiments / Largeur des bâtiments" ( $H/W$  pour *Height/Width*), est de 2 [42]. Autrement dit, les rues de hauteur deux fois supérieure à la largeur favorisent les effets d'îlot de chaleur urbain.

Aujourd'hui, il existe une volonté de favoriser la pénétration de la lumière solaire en ville, en particulier pour motiver à l'utilisation du photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV), tout en minimisant les effets d'îlot de chaleur urbain. Cela s'appuie notamment sur l'utilisation de nouveaux matériaux. Manni propose par exemple l'utilisation de matériaux à rétro-diffusion afin d'éviter de générer du piégeage radiatif [43]. Les volontés de valoriser l'ensoleillement en milieu urbain et de produire de l'électricité à l'échelle du bâtiment incitent même à l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays nordiques [44]. La température froide de ces pays favorise un bon rendement des systèmes photovoltaïques [45, 46], et la faible élévation du soleil une partie de l'année permet de valoriser les surfaces verticales [44].

### 1.3.1.2 Le défi climatique à l'échelle urbaine.

L'implantation des technologies BIPV en milieu urbain ne doit pas modifier le climat local en favorisant les effets d'îlot de chaleur urbain. En effet, chaque module présente un corps noir susceptible d'augmenter les échanges radiatifs dans l'infrarouge. A l'inverse, les effets d'îlot de chaleur urbain affectent les performances des technologies photovoltaïques [47].

### 1.3.1.3 Le défi technologique : les technologies solaires.

Le choix des matériaux d'enveloppe des bâtiments, et plus généralement de l'ensemble des surfaces composant la scène urbaine, joue également un rôle important dans la sobriété énergétique de la ville. Le taux de vitrages et son intégration sur le bâtiment ont par exemple un impact significatif sur la consommation énergétique de ce dernier [48], en particulier sur les consommations énergétiques liées au chauffage, au rafraîchissement mais aussi à l'éclairage intérieur [49]. L'ensoleillement des toitures et façades en milieu

urbain ouvre également la porte à la production d'énergie au travers des technologies solaires. Ces technologies permettent de valoriser le rayonnement solaire de deux façons, au travers de l'utilisation de technologies thermiques, ou photovoltaïques.

Dans les technologies destinées à la production d'énergie en milieu urbain, le photovoltaïque apparaît aujourd'hui comme l'une des technologies les plus attendues [30]. On parle alors de BIPV (Building Integrated PhotoVoltaïc - PhotoVoltaïque Intégré au Bâtiment), et cette terminologie définit l'ensemble des technologies actives permettant de remplacer un élément structurel du bâti tout en produisant de l'électricité photovoltaïque [50, 51]. Le cadre normatif pour ces technologies est défini par la norme EN50583. Si l'élément producteur d'électricité photovoltaïque ne fait pas partie intégrante de la structure du bâti, mais est simplement apposé en surimposition à la structure du bâti, autrement dit sans remplir de fonction structurellement essentielle, on parle alors de BAPV (Building Attached PhotoVoltaïc) [52].

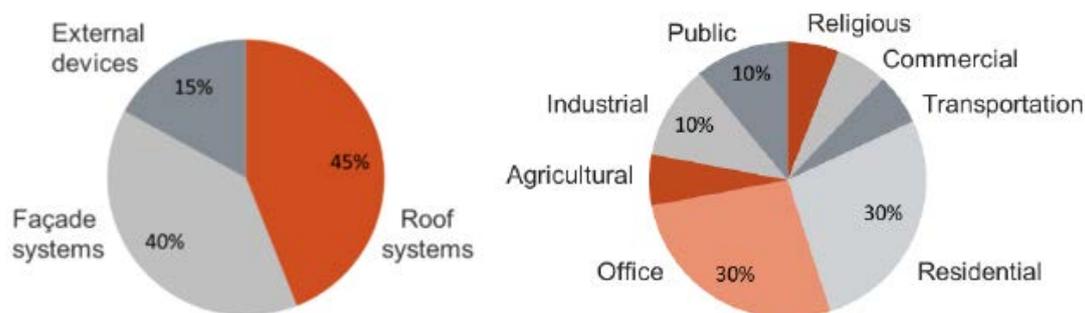
D'autres systèmes exploitant l'irradiance solaire existent. Ce sont des systèmes thermiques, ou hybrides, couplant production d'électricité et de chaleur pour le bâtiment. Enfin, une bonne utilisation des systèmes de ventilation, éventuellement naturelle, et des ouvrants permet également de réduire l'emprunte énergétique du bâtiment. Cette thèse ayant une orientation photovoltaïque, nous ne détaillerons que les systèmes incorporant une technologie PV.

### 1.3.2 Valorisation énergétique : le BIPV.

Aujourd'hui, le BIPV doit répondre à plusieurs enjeux et contraintes. Ce type de technologie doit produire de l'énergie, être intégrés au bâtiment et être acceptés sur le plan esthétique [53, 54]. Ils ne doivent pas non plus impacter négativement ni le bâtiment sur lequel ils sont installés, ni l'environnement auquel ils sont intégrés. Bien que les coûts des modules aient chuté de manière importante ces dernières années, le coût des systèmes BIPV reste aujourd'hui un frein. Par ailleurs, une installation massive de modules photovoltaïques pourrait également perturber le réseau [55]. La production électrique générée par les modules se fait la journée, et augmente avec l'irradiance solaire. Historiquement, on a cherché à maximiser la production brute d'électricité face au coût des installations photovoltaïques. L'irradiance est maximale lorsque le soleil passe au zénith, et l'emplacement privilégié pour les modules a donc été les toitures horizontales et orientées sud. Or, cette période de la journée correspond à une heure de faible demande électrique. Le déploiement des énergies photovoltaïques soulève donc la question de la synchronisation de la demande et de la production, ou du stockage de l'excédent énergétique emmagasiné la journée.

Une étude effectuée par l'EURAC en Italie basée sur plus de 40 bâtiments [56], dont 18 retenus pour l'analyse, a fait ressortir les résultats suivants. Parmi les technologies photovoltaïques intégrées au bâtiment, dénommées BIPV dans l'étude, un décompte des emplacements d'installation permet de faire ressortir les chiffres suivants : 40% des technologies BIPV sont installées lors de rénovation et 60% lors de la construction. La

même source indique que 40% des technologies disponibles sont installées en façade, 45% sont installées aux toitures et 15% sont installées de manière dissociée au bâtiment (figure 1.12). La figure 1.12 illustre également la répartition des typologies des bâtiments intégrant des systèmes photovoltaïques. On note qu'aujourd'hui les bâtiments résidentiels et les bureaux sont les principaux bâtiments sur lesquels des systèmes PV sont installés. Notons toutefois que la faible taille de l'échantillon et la méthodologie de sélection des 18 cas les plus "intéressants" sur laquelle est basée l'étude peut interroger sur la représentativité de ces résultats.



(a) Répartition des zones d'intégration du PV sur le bâtiment. (b) Typologie des bâtiments intégrant un système PV.

FIGURE 1.12 – Zones d'intégration et typologies des bâtiments équipés de systèmes BIPV [56].

### 1.3.2.1 La contrainte d'intégration.

Historiquement, les modules photovoltaïques ont été installés en toiture. Ces emplacements permettent de s'affranchir en grande partie des problèmes d'orientation et d'ombrages. De plus, les surfaces disponibles sont généralement importantes et l'installation est alors simplifiée. Il arrive cependant, notamment dans le secteur du tertiaire, que les toitures ne soient pas dimensionnées pour supporter un poids supplémentaire. Toutefois, les installations en toiture se heurtent à deux difficultés en milieu urbain. D'une part, comme le souligne Freitas dans ses travaux [55], les toitures sont généralement encombrées de systèmes associés au bâtiment, comme des systèmes d'air conditionné ou de communication. Par ailleurs, la verticalisation des villes amène les surfaces de façade à être plus importantes que les surfaces de toiture [55]. Il est également précisé par Freitas que l'installation verticale des modules permet de minimiser leur encrassement par rapport à une position horizontale. Enfin, comme nous le soulignons toujours Freitas, et comme le montreront nos mesures, l'installation verticale des modules permet de produire plus le matin et en fin de journée. Cela permet de synchroniser la production avec la montée en charge le matin et un pic de consommation des ménages le soir vers 19h.

Il existe actuellement une variété de technologies BIPV associées à différentes contraintes d'intégration. Citons quelques exemples de technologies BIPV [57] :

- Intégration de modules photovoltaïques dans les systèmes d'ombrage type pergola ou casquette solaire.
- Tuiles photovoltaïques remplaçant directement le système d'étanchéité en toiture.
- Incorporation en façade en proposant une protection par rapport aux éléments extérieurs.
- Incorporation en façade de modules ventilés avec valorisation de l'air préchauffé (technologie qui reste rare).
- Dans des systèmes de vitrage semi-transparents.

Le principal inconvénient des systèmes BIPV relevé par les installateurs est la mauvaise étanchéité du système avec un risque de fuite, notamment en toiture. Il peut également y avoir un risque moins fréquent mais à gros impact qui est le risque d'incendie.

Parallèlement aux contraintes imposées par le bâtiment, la nature du module même impose également des contraintes, en particulier de la température de fonctionnement des cellules. En effet, la montée en température génère une perte de rendement qui suit pratiquement une loi linéaire avec un impact de  $-0.3\%/^{\circ}\text{C}$  à  $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$  (coefficient de  $-0.36\%/^{\circ}\text{C}$  pour une technologie CIGS et  $-0.38\%/^{\circ}\text{C}$  pour une technologie mc-Si-back contact [58]) pour  $1^{\circ}\text{C}$  supplémentaire. Cet impact est particulièrement important sur les modules intégrés au bâtiment du fait de leur faible ventilation. Cela peut générer une perte d'environ 10 à 12% du productible en comparaison à des modules installés en plein champ [59]. Pour palier à cet impact thermique, plusieurs technologies existent. Une ventilation des modules s'intégrant aux systèmes du bâtiment peut alors être proposée. Un exemple de solution peut être la présence d'une lame d'air en face arrière des modules afin de générer une évacuation de la chaleur par tirage thermique [60]. Pour répondre aux problèmes de rendement liés à la montée en température des cellules, les modules peuvent être ventilés. Une étude des écoulements est cependant imposée par le CSTB [61]. L'air préchauffé dans la lame d'air peut par ailleurs être utilisé en étant injecté dans un système de chauffage. L'air peut toutefois être échangé avec le milieu extérieur, et la lame de verre en face supérieure remplacée par un matériau filtrant les longueurs d'ondes (quelques fois appelé TIM (Transparent Insulation Materials) [62]). Cela permet de préserver la production d'électricité tout en limitant ainsi l'absorption des autres longueurs d'ondes par le module 1.13.

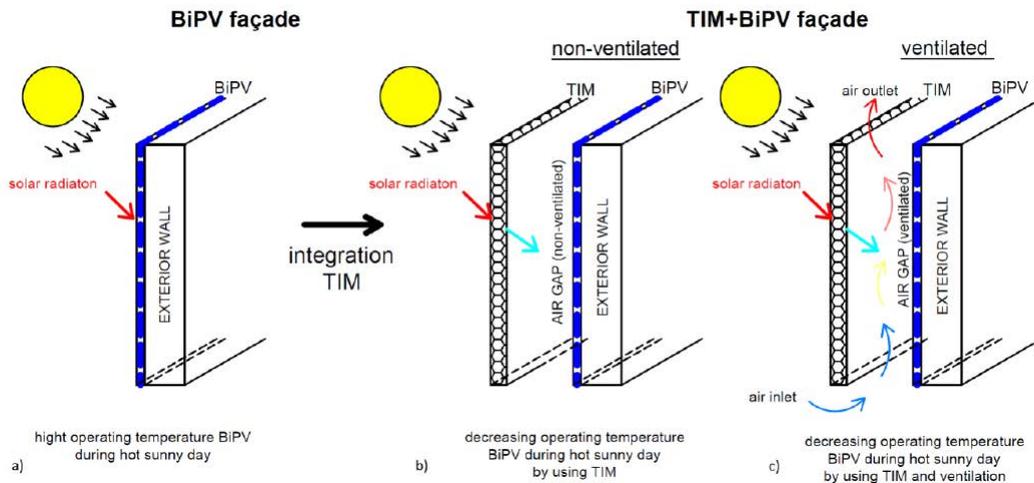


FIGURE 1.13 – Schéma des différentes configuration d'échanges thermiques dans un mur trombe incorporant un module PV et un matériau TIM filtrant les longueurs d'ondes [62]

L'association des technologies photovoltaïques semi-transparentes avec les technologies BiPV est également possible pour obtenir des enveloppes multi-fonctionnelles [63]. Leur utilisation pose également des questions d'isolation. Afin de réduire les transferts thermiques entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, Ghosh propose dans ses travaux d'utiliser une solution similaire au double ou triple vitrage en mettant sous vide les espaces entre les couches du module [64]. Il propose également de nouvelles technologies associant modules semi-transparentes et des verres s'opacifiant à la lumière. Il argumente ce type de technologie par le bien être généré par un éclairage de qualité et suffisant [64, 65].

Les bâtiments, en raison de leurs formes parfois complexes, présentent de nombreux masques solaires. 10% d'ombrage peuvent générer 30% de perte d'efficacité sur un module [66]. Des recherches sont donc menées afin de revoir les tailles de cellules optimales et les stratégies de connexions les plus efficaces pour limiter les pertes liées à des tâches d'ombre de petite taille.

### 1.3.2.2 Les contraintes technologiques.

La principale contrainte technologique d'un module photovoltaïque reste de maximiser son rendement. Cela se traduit également par une minimisation de la montée en température du module lors de son exposition au rayonnement solaire. Bruno Soria précise en effet dans sa thèse [67] qu'un module ayant 15% de rendement dissipe environ 80% du rayonnement incident en chaleur, les 5% restant étant perdus optiquement.

Un module standard photovoltaïque se compose d'une structure protectrice en-

globant les strings de cellules (cellule connectées entre elles sous forme de chaînes ou de guirlandes). Une vue en tranche d'un module standard est présentée figure 1.14. La structure protectrice comporte un cadre de support, généralement en aluminium ou en acier galvanisé [59]. Un tel châssis doit assurer plusieurs fonctions, comme la résistance mécanique aux éléments extérieurs (vent et neige en particulier) et à la corrosion. Il doit également limiter les ponts thermiques, et ne doit pas générer une charge trop importante sur le bâti. Enfin son installation doit pouvoir être aisée. Un joint assure l'étanchéité avec les éléments du module. Le *backsheet* a une fonction d'étanchéité ayant pour objectif d'éviter la diffusion d'humidité dans les couches du module et en particulier au niveau du circuit électrique. Il peut également avoir une fonction esthétique. La boîte de jonction sert à raccorder le module au réseau.

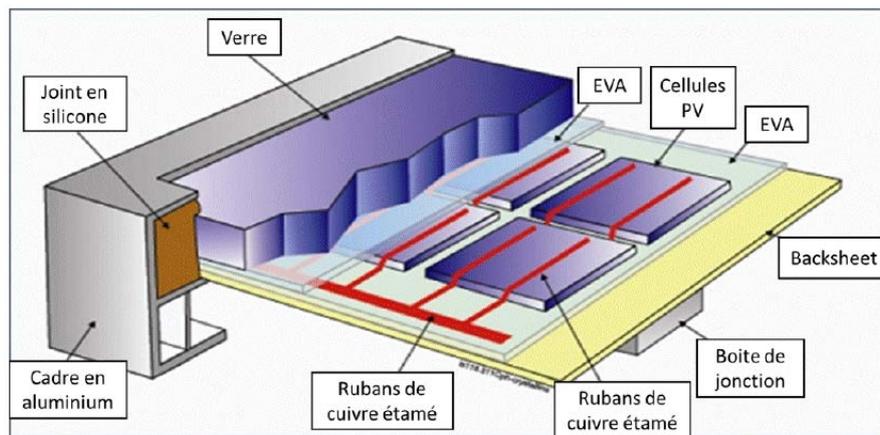


FIGURE 1.14 – Illustration de la composition d'un module photovoltaïque standard [67]

D'un point de vue optique, les matériaux utilisés dans la composition des premières couches du module doivent permettre de maximiser le rayonnement atteignant les cellules photovoltaïques et minimiser l'absorption, qui convertit une partie du rayonnement en chaleur et non en électricité. Il s'agit alors d'obtenir un module dont les premières couches sont particulièrement transparentes pour les photons ayant une énergie suffisante pour produire de l'électricité, à savoir au-dessus de  $1.1\text{eV}$ , ce qui correspond à l'ensemble des longueurs d'onde inférieures à  $1200\text{nm}$ . A l'inverse, le module doit être particulièrement réfléchissant aux photons incidents avec des énergies qui ne permettent pas la production d'électricité afin de limiter l'échauffement du module, et donc sa perte de rendement. Typiquement, dans le cas d'un module contenant des cellules silicium, les couches supérieures du modules doivent avoir une forte transmission pour les photons présentant une vibration comprise entre  $350\text{nm}$  et  $1200\text{nm}$  [68]. Ces couches doivent ainsi présenter une forte réflexion pour la lumière issue des autres longueurs d'ondes. Ainsi la couche supérieure est généralement composée d'une couche de verre (notamment à faible teneur en fer), plus rarement d'une couche acrylique (verre acrylique, plus communément appelé Plexiglass) ou d'un polymère. Ces propriétés recherchées sont similaires pour les couches d'encapsulations, en particulier pour les propriétés de transparence. Les

propriétés recherchées pour les couches d'encapsulation sont les mêmes, en particulier concernant la transparence. Ces couches doivent également être résistantes aux UV, et stables aux températures élevées que le module peut atteindre, à savoir environ 80°C. On utilise principalement une couche d'Éthylène-Acétane de Vynile (EVA). Les spectres d'absorption des couches de verre et de transmission de la couche EVA sont présentés figure 1.15. L'encapsulant englobe les cellules en face avant et en face arrière. Afin d'être posée, la couche EVA est pressée et chauffée. Un laminateur permet de faire le vide [67].

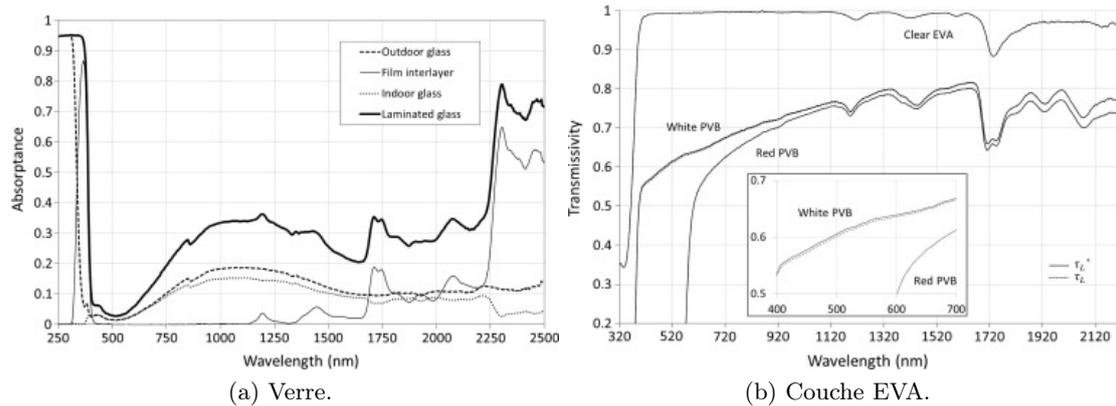


FIGURE 1.15 – Spectres d'absorption des couches Verre et de transmission pour la couche EVA au sein d'un module photovoltaïque [69].

Au coeur du module se trouvent ainsi les cellules. A l'image des autres couches, la face arrière des modules doit présenter une faible résistance thermique pour limiter la montée en température du module. On utilise généralement une feuille de tedlar® ou une couche identique à celles présentes en face supérieure du module. De manière analogue à la couche supérieure, cette couche a pour rôle d'assurer la résistance mécanique du module face aux chocs externes. Plus généralement, les matériaux utilisés doivent être résistants aux hautes températures et tensions qui peuvent être générées dans un module. Afin de limiter les pertes par réflexion, une texturation des surfaces peut être effectuée afin de "piéger" le rayonnement. Cette texturation peut être obtenue par différents procédés, et en particulier par gravure chimique. Dans le cas d'une structure cristalline du silicium, on obtient alors généralement une surface composée de pyramides [68]. Une couche anti-reflets peut également être ajoutée, toujours en vue de limiter la réflexion sur le semi-conducteur, qui peut être de l'ordre de 30% dans le cas du silicium polie [68]. Finalement, l'absorption de la lumière par les cellules est alors maximisée et on obtient un spectre d'absorption pour le module similaire à celui présenté figure 1.16.

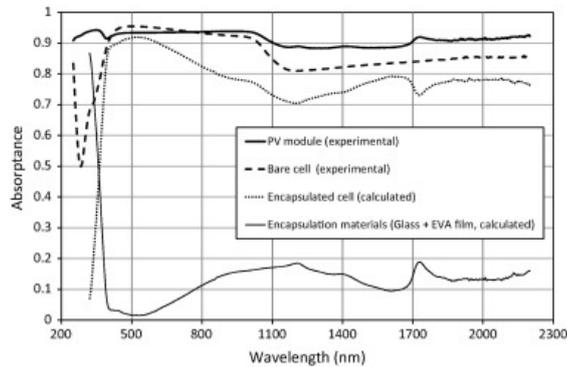


FIGURE 1.16 – Spectre d'absorption d'un module photovoltaïque [69]

On peut distinguer les photons incidents sur les modules photovoltaïques en 2 catégories. On note  $E_{ph}$  l'énergie d'un photon, et  $E_G$  l'énergie de la "bande interdite" (ou "gap") [68] :

- Les photons apportant une faible énergie et donc interagissant peu avec la couche semi-conductrice, soit la cellule. On a alors  $E_{ph} < E_G$ . Ces photons peuvent toutefois être absorbés contribuant à réchauffer le module photovoltaïque. Il s'agit des grandes longueurs d'ondes, supérieures à 1200nm dans le cas de cellules silicium.
- Les photons avec une énergie supérieure ou égale à celle nécessaire pour traverser la bande interdite. On a alors  $E_{ph} \geq E_G$ . Ces photons sont très bien absorbés dans le semi-conducteur, il s'agit des longueurs d'ondes inférieures à 1200nm. Pour l'ensemble des photons arrivant avec une énergie supérieure à 1, 1eV, soit l'ensemble des longueurs d'ondes strictement inférieures à 1200nm, une partie de l'énergie est perdue par thermalisation. Cet excès d'énergie est alors converti en chaleur dans la cellule. L'utilisation de cellules tandems, avec plusieurs semi-conducteurs, permet de limiter ce phénomène et d'augmenter le rendement des cellules. En dessous de 400nm, comme illustré figure 1.15, l'absorption des couches EVA et du verre est maximale. Ces couches absorbent alors pratiquement toute l'irradiance reçue et s'échauffent.

Plusieurs technologies de cellules existent, mais elles ne seront pas détaillées ici.

### 1.3.2.3 La contrainte esthétique.

Comme évoqué précédemment, l'implantation des modules photovoltaïques en milieu urbain doit aujourd'hui répondre à des contraintes d'intégration esthétiques [53, 54]. Les études auprès des installateurs effectuées par l'Ademe en 2016 [70] font même apparaître l'esthétisme comme un avantage pour les installations BIPV, tel que révélé par la figure 1.19. les stratégies d'intégration esthétique consistent à camoufler les modules PV installés. Ainsi, par utilisation de films présents dans le module ou rapportés en surface,

ou par impression du verre, les modules sont colorés afin de simuler visuellement, voir en apparence physique, un autre matériau de construction. Des recherches sont menées afin d'identifier les meilleures stratégies d'impression limitant les réflexions [71]. L'impression peut également se faire sur des films incorporés au sein du module. La figure 1.17 illustre un exemple de différents modules colorés. La difficulté lors de la coloration de modules photovoltaïques reste de minimiser les pertes optiques et thermiques et donc limiter la perte de rendement du module. La couleur et les texturations vont augmenter le piégeage radiatif et l'opacité des couches du module, amenant des pertes de rendement et des contraintes thermiques plus importantes sur les matériaux. Les limites de la coloration des modules photovoltaïques sont exposés dans ces travaux [72]. Halme et Mäkinen évoquent une limite théorique de 29% de rendement pour une cellule solaire colorée à partir d'une base RGB [73]. Cela correspond à une perte de rendement de 14% par rapport à la limite théorique de Shockley-Queisser, qui correspond à l'efficacité maximale théorique d'une cellule à mono-jonction p-n.



FIGURE 1.17 – Exemples de modules PV colorés (« Application of Plasmonic Coloring for Making Building Integrated PV Modules Comprising of Green Solar Cells » 2017)

#### 1.3.2.4 La contrainte de coût.

En 2020, un module photovoltaïque coûte  $0.20 \text{ €/Wc}$  (Watt-Crête), soit  $40 \text{ €/m}^2$ . En toiture, un système coûte  $0.60 \text{ €/Wc}$ , soit  $120 \text{ €/m}^2$ . Toutefois, la complexité d'intégration et la diversité des fonctions associées à un système BIPV rendent le coût de cette technologie reste plus élevé. Il reste d'ailleurs identifié comme le second inconvénient de cette technologie par les installateurs (figure 1.19). Il dépend également de l'emplacement d'intégration. Ainsi le rapport de PV Sites de 2016 montre que l'installation de BIPV en toiture est en moyenne  $200 \text{ €/m}^2$  plus chère qu'une toiture standard. Une installation en tuiles est même  $300 \text{ €/m}^2$  plus chère qu'une installation en tuiles classiques. Les industriels misent sur le côté actif de ces façades, qui produisent de l'électricité. Cette

production permet de faire un gain financier soit en diminuant la consommation électrique issue du réseau, soit en revendant l'électricité. En conclusion, le rapprochement des tarifs de rachat de l'électricité se rapprochant des tarifs moyens payés par un ménage au tarif réglementé de vente pour une puissance souscrite de  $9kVA$  1.20 n'encourage pas à la revente de l'énergie produite, et pousse le marché à se tourner vers l'autoconsommation. Les retours sur investissement sont alors moins évidents. Seul l'avantage esthétique est alors avancé par les installateurs pour justifier l'installation du BIPV.

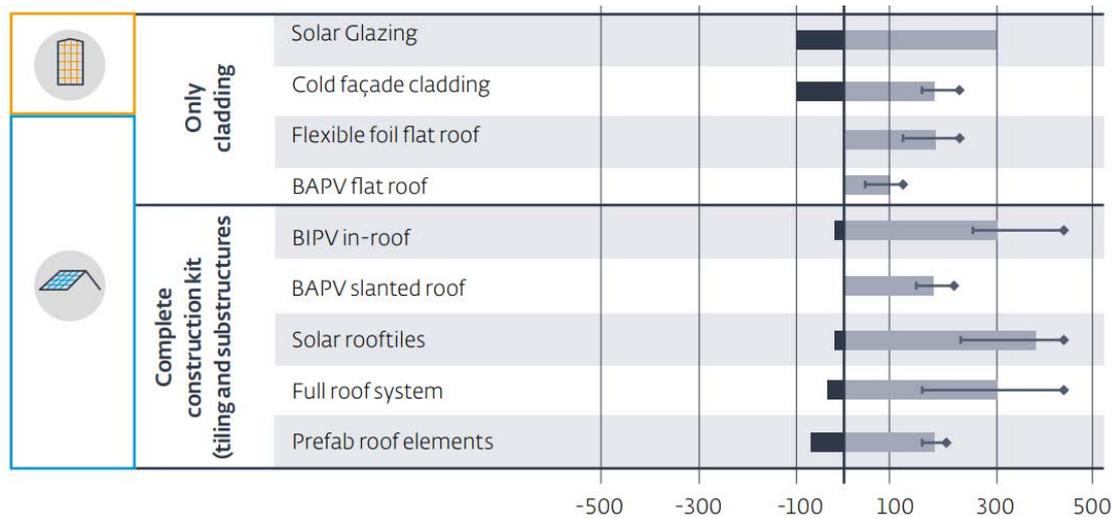


FIGURE 1.18 – Différence de coût (en €/m<sup>2</sup> entre BIPV et construction passive. Les barres sombres à gauche symbolisent le gain de coût liés à la non utilisation des éléments passifs, les barres grises de droite symbolisent le coût liés au BIPV, la différence de coût finale étant la différence des 2 [74].

L'ensemble des inconvénients et avantages relevés par les installateurs dans le cadre de l'étude effectuée par l'Ademe en 2016 [70] sont répertoriés sur la figure 1.19.

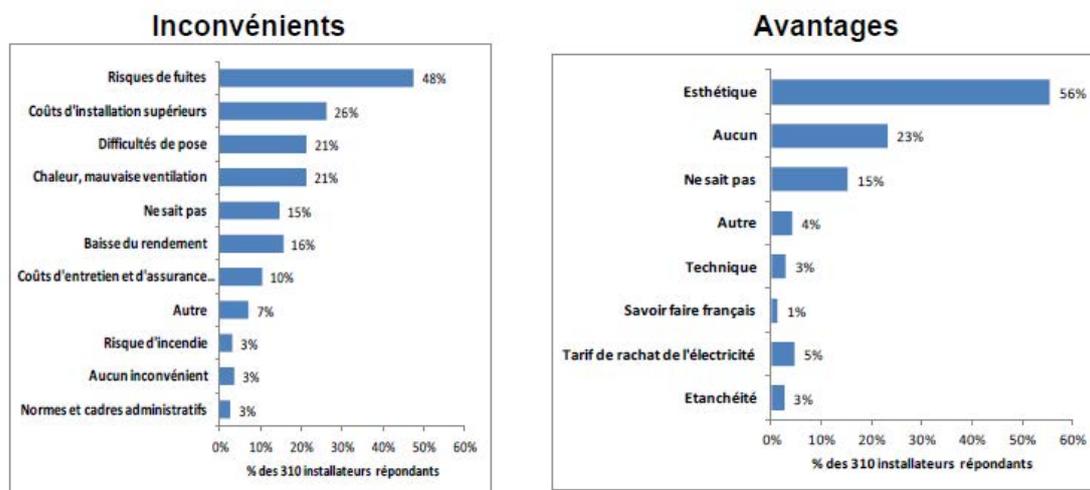


FIGURE 1.19 – Avantages et inconvénients des installations BIPV remontées par sondage sur 310 installateurs lors d'une étude effectuée par l'Ademe en 2016 [70].

L'évolution des tarifs de rachat et prix moyen de l'électricité entre 2012 et 2017

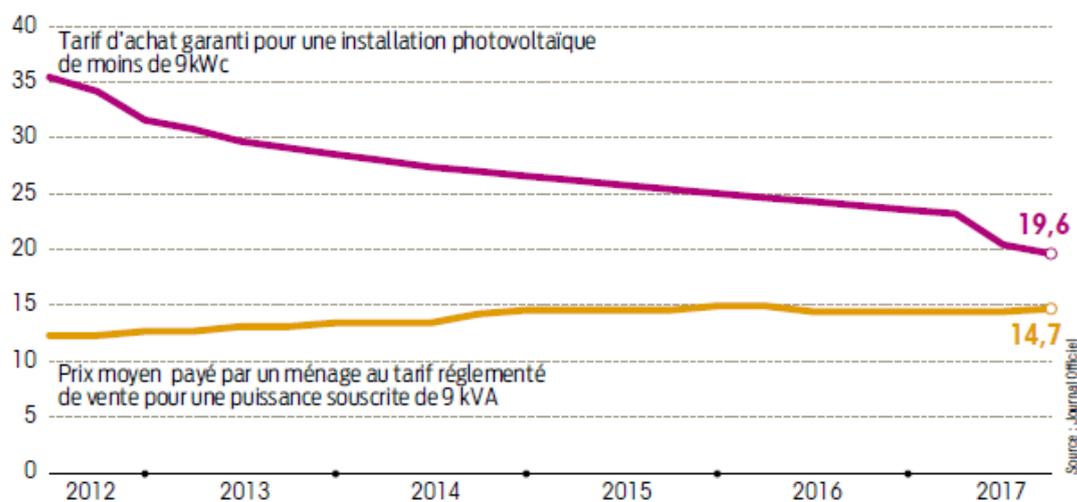


FIGURE 1.20 – Evolution des tarifs de rachat de l'électricité photovoltaïque et des prix de vente de l'électricité, par Kilowattheure, en centimes d'euro [75].

### 1.3.2.5 L'insertion des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

En moyenne sur l'année, trois pics de consommation journalière sont observés en France : à 13h, 19h et 23h [59]. Comme évoqué précédemment, le nucléaire et l'hydroélec-

trique assurent l'essentiel de la production de base de l'électricité, les pics étant absorbés par des centrales thermiques ayant une faible inertie de démarrage. Si le solaire pourrait permettre d'absorber en partie le pic de 13h, ce n'est pas le cas de l'éolien dont la production n'est pas aussi régulière.

## 1.4 La modélisation des transferts radiatifs en milieu urbain.

La modélisation des transferts thermiques en milieu urbain est aujourd'hui cruciale pour la bonne compréhension et la prédiction des phénomènes d'îlot de chaleur urbain [34]. Comme le précise Colombert [76] dans sa thèse, la modification du climat urbain se joue à deux échelles. La perturbation de phénomènes à l'échelle des bâtiments et de la rue engendre une modification des phénomènes à l'échelle de la ville.

### 1.4.1 Modification des phénomènes à l'échelle de la rue.

La topographie urbaine génère ce que l'on nomme un piégeage radiatif [76]. Dans ses travaux, Colombert détaille les causes de ce phénomène, dont Oke est l'un des premiers à en mettre en avant les effets [77]. Les causes de ce piégeage radiatif sont de nature géométrique et sont uniquement la cause de la topographie urbaine : orientation des rues peu favorable, hauteur des bâtiments importante, prospect (distance minimale entre deux bâtiments) moyen, facteur de vue du ciel peu important. Ce piégeage radiatif amène les stocks de chaleur à augmenter dans l'ensemble des matériaux constituant la scène urbaine : façades, trottoirs, rues notamment. L'augmentation de ces stocks est l'une des quatre problématiques relevée par Colombert dans l'augmentation de la température en zone urbaine. Les trois autres sont : les rejets directs de chaleur sensibles (transports, bâtiments), le manque de source de fraîcheur (eau, végétation), mauvaise ventilation du milieu urbain.

Plusieurs modèles, dont le modèle *Soil Model for Submesoscales, Urbanized Version, SM2-U* développé au sein du laboratoire de mécanique des fluides (*UMR CNRS 6598*) de Nantes, permettent l'étude des phénomènes d'îlot de chaleur urbain [78].

### 1.4.2 Modélisation des ensoleillements.

Comme vu précédemment, la simulation des ensoleillements en milieu urbain a plusieurs vocations. La pression des enjeux actuels pour la transition écologique et la réduction des empreintes carbone pousse la recherche à progresser dans de nombreux domaines. Parallèlement, les progrès informatiques permettent une avancée rapide des performances de calculs numériques. Ces mêmes progrès, notamment dans le domaine de l'infographie et des jeux vidéo, ont ouvert la voie à l'utilisation de nouvelles méthodes de calculs. Si initialement le problème du calcul des ensoleillements consistait à se ramener à un problème d'algèbre linéaire, les méthodes statistiques se sont aujourd'hui imposées comme incontournables. Dans ce cadre, on observe une volonté de rendre les modèles d'ensoleillement en milieu urbain plus précis. Ce paragraphe propose donc une revue historique des différents modèles de simulation des ensoleillements en milieu urbain.

Les premières méthodes de simulation d'ensoleillement en milieu urbain consistaient à prendre en compte uniquement les masques. La topographie urbaine était alors prise en compte par un angle d'obstruction moyen [79]. Comme le souligne Ribault dans sa thèse [79], la méthode LT (pour *Lighting and Thermal Energy* développée par Ratti et al. reposait sur la prise en compte d'un tel angle, noté *UHA* (Urban Horizontal Angle), afin d'intégrer les masques dans une ligne d'horizon corrigée [80]. La notion de *Sky View Factor (SVF)* (présenté plus tard en section 2.4.1) est ensuite rapidement apparue avec pour objectif d'évaluer les obstructions à la voûte céleste depuis un point donné.

Dans les années 90, avec les progrès de l'informatique, des modèles proposant de prendre en compte les réflexions de la lumière globale sur des zones urbaines regroupant plusieurs bâtiments sont apparues. Parallèlement à l'évolution des besoins dans la recherche du bâtiment, la croissance des puissances de calcul a permis de développer au fil du temps de nouvelles méthodes de calcul des ensoleillements, en particulier dans la prise en compte des réflexions en milieu urbain.

#### 1.4.2.1 Modèles par radiosité.

Plusieurs modèles développés au cours des années 90 reposent sur la radiosité. On peut notamment citer *Solene* [81, 82], *Laser-F* [83, 84] mais aussi *CitySim* [85]. La radiosité consiste à ramener le problème des réflexions à un problème d'algèbre linéaire. D'autres hypothèses de réflexions sont possibles mais elles impliquent de connaître la position initiale des rayons, et nécessitent un calcul particulier non désiré ici [86]. Cette méthode repose sur l'hypothèse de réflexions diffuses sur l'ensemble des éléments de la scène urbaine. Les méthodes mathématiques et informatiques associées à la radiosité sont détaillées dans l'ouvrage de Ashdown [87]. On définit par scène l'ensemble de l'enveloppe en 3 dimensions composant la surface du quartier d'étude, incluant alors les surfaces au sol et les bâtiments. Cette surface est alors maillée, et les facteurs de forme entre les mailles sont calculés. Cela conduit à l'équation suivante (Equation (1.1)) :

$$B = E + \rho FB \quad (1.1)$$

où  $B$  est la radiosité, grandeur représentant la densité de puissance incidente sur chaque maille.  $\rho$  au vecteur de réflexion,  $F$    la matrice de facteur de forme et  $E$  la puissance de densité initiale incidente sur la scène.

**Solene.** *Solene* est un logiciel qui a été développé dans les années 90 au sein du laboratoire CERMA (maintenant CRENAU). Il était à l'origine un logiciel novateur intégrant les modèles de ciel issus des travaux de Pérez et traitant également les réflexions [81].   l'époque, il répondait au besoin de considérer les problématiques d'ensoleillement sur une scène géométriquement complexe, pour différentes heures, à différentes positions géographiques et en considérant les masques liés à l'environnement du bâtiment étudié.

Depuis, ce logiciel a été utilisé dans de nombreux projets comme outil d'aide à la conception urbaine de nouveaux quartiers tels que Lyon confluence ou Ile de Nantes [88]. Aujourd'hui, *Solene* s'est étoffé et regroupe un ensemble de logiciels avec la vocation d'aider à la recherche, à la compréhension du microclimat urbain et de ses impacts sur le confort et les consommations énergétiques.

Les ensoleillements sont simulés par une méthode de radiosité [89]. Les scènes urbaines sont dessinées à l'aide de l'outil *Salomé*, puis maillées en éléments triangulaires en utilisant *GMSH*. Il en est de même pour le ciel, ce qui permet de calculer l'ensoleillement diffus (figure 1.21). Il existe également des références à des modèles de réflexion bi-directionnelles [89] mais leur développement semble ne pas avoir abouti.

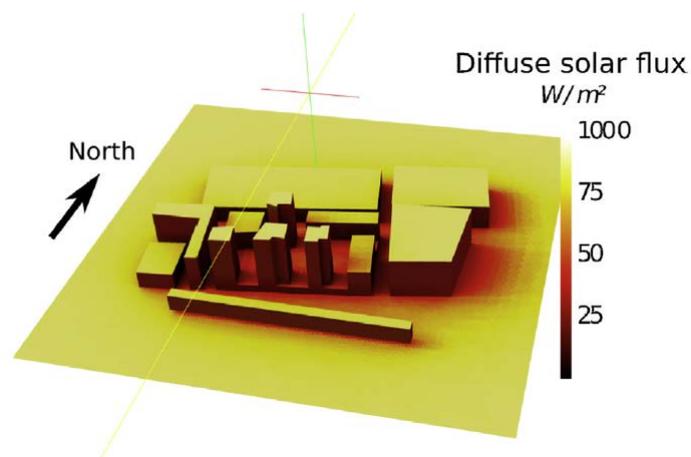


FIGURE 1.21 – Exemple d'irradiances issues du rayonnement diffus calculées avec le logiciel *SOLENE* et extraite des travaux de Benjamin Morille [90].

**CitySim.** *CitySim* est un logiciel développé au sein de l'EPFL à partir de 2013. Il est en réalité plus ancien car il bénéficie du travail réalisé sur le logiciel *SUNTool* durant le projet du même nom démarré en 2004. Il a été réalisé pour permettre la production de calculs énergétiques à l'échelle de la ville (figure 1.22). Ce logiciel se positionne comme un outil d'aide à la décision pour minimiser l'utilisation des énergies non-renouvelables. Il a depuis évolué en *CitySim Pro* qui est disponible gratuitement sur le site <http://kaemco.ch/download.php>.

D'un point de vue technique, il utilise un algorithme développé par Robinson et inspiré de la radiosité : l'algorithme *Simplified Radiosity Algorithm (SRA)*. Cet algorithme est détaillé dans les travaux de Robinson en 2005 [91] et est utilisé pour les courtes comme pour les grandes longueurs d'ondes. La modélisation du ciel repose sur un modèle de ciel de Pérez [92]. Il n'apparaît pas de différence sur la théorie mathématique distinguant *Solene* de *CitySim*. Toutefois, les méthodes de maillage, de calcul des facteurs de forme, de la résolution du problème linéaire peuvent générer des différences de résultat. La

gestion différente des données d'entrée du modèle (rayonnement direct et diffus) peuvent également générer des écarts.

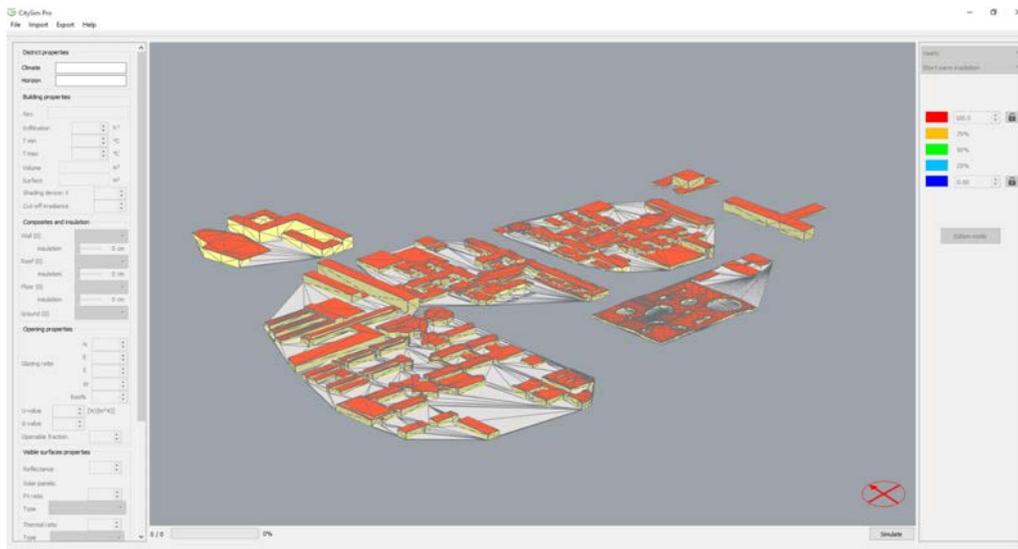


FIGURE 1.22 – Exemple d'irradiances calculées avec le logiciel *CitySim* sur une scène de taille importante. Image extraite du site <http://kaemco.ch/download.php>

**LICASO.** *LICASO* est un logiciel qui a été développé au sein de la *Lighting Analysts Inc* basé sur des méthodes de radiosité [91]. Face au faible succès du logiciel, son développement a été arrêté en 2019.

**Laser-F.** *Laser-F* est un logiciel développé au sein de l'université de Strasbourg, dont les méthodes de mathématiques sur lesquelles il repose sont analogues à celles développées pour le logiciel *Solene*. Ce logiciel a été élaboré au sein du laboratoire des sciences de l'image, de l'informatique et de la télédétection (UMR 7005) [84, 83].

#### 1.4.2.2 Modèles par lancer de rayons.

Les méthodes par lancer de rayons, à la construction intuitive, se sont développées avec les progrès de l'informatique. Ces méthodes consistent à reproduire le trajet réel de rayons. Initialement lourdes à mettre en place, notamment à cause du temps de calcul qui leur fait encore défaut [93, 94, 95, 96], elles s'imposent aujourd'hui grâce à la qualité de leurs rendus, notamment sous l'impulsion des jeux vidéo [97]. Ces méthodes sont aujourd'hui principalement utilisées au travers d'un logiciel, nommé *Radiance* [98], qui sert de moteur de calcul.

**DaySim.** *DaySim* est un logiciel développé au sein de l'EPFL entre 1999 et 2001, certainement motivé par la comparaison de 6 méthodes de simulation d'ensoleillement basées sur le logiciel *Radiance* [99]. Il utilise un module de calcul en lancer de rayons via le logiciel *Radiance* [100], et plus précisément les programmes *rtrace* [91]. Il utilise un modèle de ciel construit selon le ciel *all-weather sky model* défini par Pérez [101]. Le ciel est représenté à partir d'un maillage de Tregenza. Il peut être utilisé à la fois pour des calculs d'intérieur, et pour des calculs d'extérieur. Il est notamment utilisé pour des calculs de luminosité. Les travaux d'Ashdown proposent une comparaison entre *DaySim* et *LICASO* [91].

**Logiciels incorporés à Rhinoceros3D.** *Rhinoceros3D* est à la base un logiciel d'aide à la conception et de design sur ordinateur. Il a été associé au logiciel *Grasshopper* qui permet de dessiner de manière paramétrique. Plusieurs plug-in ont été rajoutés permettant d'effectuer des études énergétiques sur des bâtiments, permettant d'utiliser les qualités de design de *Grasshopper*. Parmi les plug-in, on peut citer *Ladybug*, *Honeybee* [102, 103] et *ARCHSIM* [104], gratuits, ainsi que *Diva* [105], payant. Tous n'ont pas les mêmes vocations.

En terme de modélisation d'ensoleillement, le plug-in *Ladybug* ne propose que des évaluations simplifiées, sans prendre en compte les réflexions sur les différentes surfaces [106]. Les modélisations sont alors simples à paramétrer, la nature des matériaux composant la scène urbaine n'étant pas nécessaire à renseigner. Les plug-in *Honeybee* et *DIVA* proposent quant à eux des simulations plus abouties, utilisant notamment le logiciel *Radiance* comme module de lancer de rayons. Les simulations effectuées directement à partir du logiciel *Radiance* sont alors d'une grande précision mais deviennent difficiles à paramétrer [91]. Toutefois, les outils de calcul d'ensoleillement proposés reposant sur le logiciel *Rhinoceros3D* et notamment les fonctionnalités associées aux plug-in *Honeybee* et *Ladybug*, mais aussi le logiciel *DIVA* développé par *Solemma*, se sont imposées comme le logiciel de référence en terme de calcul d'ensoleillement car ils permettent en apparence de concilier qualité de rendu, facilité de prise en main, précision et fiabilité des résultats. Plusieurs niveaux de paramétrisation sont également possibles, permettant d'adapter le niveau de précision et donc le temps de calcul en fonction du résultat souhaité. La diversité de ces outils permet une grande flexibilité et de nombreuses possibilités de simulation. Des résultats très détaillés peuvent ainsi être recherchés à l'échelle d'un bâtiment et dans une configuration donnée. Des analyses simplifiées, réduisant le temps de calcul pour une position du soleil fixée, peuvent également concilier grandes échelles (quartiers) et analyse sur de grandes périodes de temps (figure 1.23).

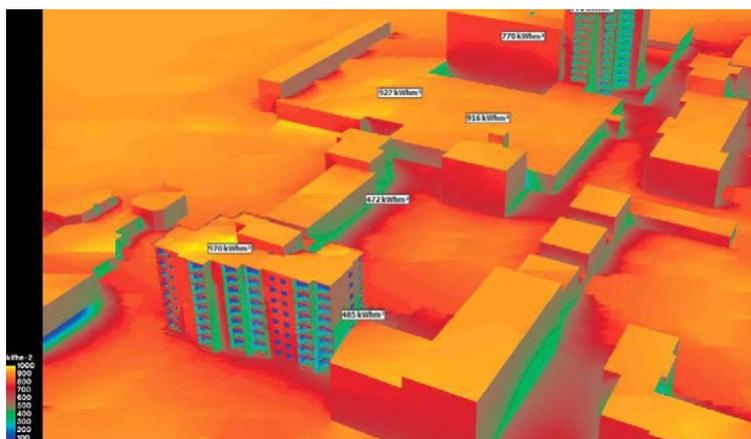


FIGURE 1.23 – Exemples de résultat obtenu avec le logiciel Rhinoceros associé au plug-in DIVA [88]

**Archiwizard.** *Archiwizard* est un logiciel français destiné aux architectes et bureaux d'études bâtiment. Il s'agit d'un logiciel "boîte noire" permettant de concevoir, valider et suivre un projet de sa conception jusqu'à sa réalisation. On sait toutefois que le logiciel utilise le moteur de calcul *RayBoss* développé par *HPC-SA* [96]. Il permet notamment de travailler avec le format de fichier *BIM*, ce qui permet un suivi proche et mutualisé par les différents acteurs. Le calcul de l'ensoleillement s'effectue via une méthode par lancer de rayons, et permet l'évaluation du potentiel solaire sur tout un quartier. Il permet en particulier le calcul d'ensoleillement en temps réel. Toutefois des études paramétriques réalisées en 2018 [88] semblent indiquer une précision limitée et une absence de prise en compte des réflexions, du moins dans les calculs en temps réel. Le logiciel permet aussi de calculer l'apport solaire amené à l'intérieur des bâtiments. Les résultats sont visualisés directement sur la maquette 3D (figure 1.24).

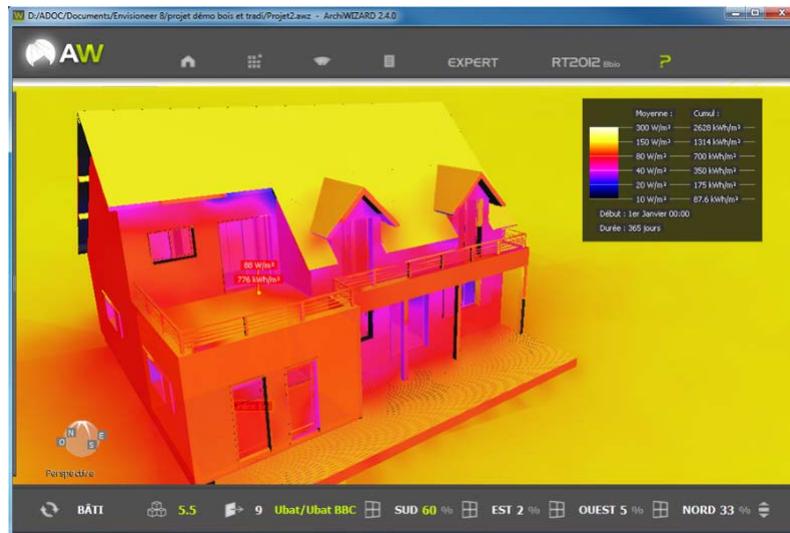


FIGURE 1.24 – Exemples de résultat obtenu avec le logiciel Archiwizzard [88]

**Open Studio.** Il existe également le logiciel *Open Studio* qui propose une interface simplifiée pour l'utilisation du logiciel *Radiance* [107].

**Autres modèles d'enseillement.** D'autres modèles permettent également de simuler les ensoleillements en zone urbaine. On peut notamment citer le modèle Solweig [108], qui a pour objectif de modéliser les flux CLO et GLO dans un environnement urbain en trois dimensions. Ce modèle, tel que décrit dans les travaux de Lindberg et al. [108] propose une approximation grossière des flux CLO, notamment en ne considérant qu'un unique coefficient de réflexion (0.15) pour l'ensemble de la scène.

Il existe également d'autres modèles destinés au calcul du productible solaire, comme *PVGIS* [109] ou *PVSYST* [110]. Ces logiciels sont en premier lieu destinés à l'aide au dimensionnement d'installations photovoltaïques. Les ombres et l'horizon peuvent être considérées dans les calculs de modélisation des ensoleillements, ce qui n'est pas le cas des réflexions sur une scène urbaine complexe. On ne détaillera pas plus ces logiciels ici.

### 1.4.3 Modélisation des transferts thermiques.

Les propriétés thermiques des matériaux utilisés dans les bâtiments, à l'image de la topologie urbaine, ont des impacts thermiques importants sur l'environnement urbain [111]. Ces effets sont particulièrement vérifiés lorsque les surfaces exposées au rayonnement issu des Courtes Longueurs d'Ondes (CLO, définies section 2.3) atteignent des températures supérieures à la température d'air. Radhi montre que la couleur des matériaux, qualifiée par l'indicateur SRI (Solar Reflectance Index), est généralement la variable prédominante dans l'élévation de la température de surface ( $T_s$ ) des matériaux composant l'enveloppe des bâtiments [112]. La capacité thermique des matériaux joue également un

rôle non négligeable. Des différences allant jusqu'à 25°C ont pu être mesurées sur des matériaux de toitures exposées à des conditions similaires. Ces fluctuations de température couplées à la densification urbaine sont reconnues pour être l'une des causes de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Afin de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain (ou *Urban Heat Island*), plusieurs études cherchent à comprendre les causes et les conséquences de ce phénomène. Plusieurs logiciels toujours en développement offrent la possibilité d'une approche par simulation numérique. Azam [113] rappelle ces principaux logiciels : *SOLENE-microclimat*, *EnviBat* et *ENVImet*. Elle rappelle également la grande diversité des phénomènes physiques pris en compte dans les modèles de simulation : flux radiatifs, flux thermiques et mécanique des fluides, notamment par rapport aux écoulements d'air.

#### 1.4.4 Limites des modèles actuels

Freitas [55] regrette que la prise en compte des géométries 3D des bâtiments reste généralement limité à une extrusion sur l'axe  $z$  de l'empreinte au sol de ces derniers. Il parle alors de modèles 2.5D. Il présente deux logiciels permettant de prendre en compte la topographie 3D de la façade :

- *Solar out of lidar (SOL)* est un logiciel où l'ensemble des points de la façade est défini à partir de 3 coordonnées. Il est en particulier utilisé pour les ombres, calculées en remontant depuis chaque point de la carte dans la direction opposée aux rayons solaires. Dans le cas d'une intersection avec un élément de la scène, le point est considéré à l'ombre.
- *Disign Iterative Validate Adapt (DIVA)*, qui est un plug-in s'inscrivant dans le logiciel *Rhinoceros*. DIVA permet de réaliser des calculs d'ensoleillement selon une méthode de lancer de rayons en utilisant le logiciel *Radiance*. Ce mode de calcul, couplé à la précision des géométries réalisées avec *Rhinoceros* permet de prendre en compte des géométries complexes.

Ashdown regrette quand à lui en 2017 le temps de calcul requis avec les méthodes par lancer de rayons. Il montre dans ses travaux que le logiciel *LICASO* est une centaine de fois plus rapide que le logiciel *DAYSIM* [91]. Il précise que cela est lié à la non-dépendance des facteurs de forme avec la position du soleil. Il précise également que les calculs par radiativité restent toutefois moins précis que ceux issus du logiciel *Radiance*, le logiciel *LICASO* sous-estimant d'environ 10% les ensoleillements sur les façades Est et Ouest. Ces écarts restent toutefois corrects selon lui, notamment si l'on considère des calculs d'éclairage intérieur. Il montre également que les résultats issus de simulations reposant sur un module de calcul *Radiance*, et notamment sur les programmes *rtrace* sont fortement dépendants des paramètres sélectionnés. En particulier des paramètres *-ad* et *-as* du logiciel impactent fortement le résultat final.

De notre côté, l'état de l'art a montré que les propriétés radiatives des réflexions

étaient peu considérées, malgré certaines études abordant la mesure et la modélisation de propriété de réflexion de matériaux [114, 115]. Les modèles par radiativité supposent, par leur construction linéaire, que l'ensemble des réflexions sont diffuses. Les modèles par lancer de rayons permettent théoriquement de prendre en compte différents modes de réflexion. Une étude de Lobaccaro [116] effectuée à l'aide de Grasshopper montre qu'il est possible de fixer un coefficient de spécularité dans les propriétés des matériaux utilisés dans ses simulations, sans que ceci ne soit effectué dans l'étude. Ma manipulation des packages *Honeybee* et *DIVA* associés au logiciel *Rhinoceros* au cours de la thèse a montré qu'ils permettent bien de modifier les propriétés de réflexion en jouant sur les paramètres proposés par *Radiance*, sans que l'on réussisse à obtenir de simulations satisfaisantes. L'hypothèse de la nature de réflexion des matériaux simulés reste aujourd'hui peu évoquée dans les travaux étudiés.

## 1.5 Objectifs de l'étude.

L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'impact des rayonnements en milieu urbain sur la productivité d'un module photovoltaïque ; mais aussi et à l'inverse l'impact sur l'environnement urbain de l'implantation de modules photovoltaïques. Comme évoqué précédemment (section 1.3.2), les différents rayonnements, suivants leur nature CLO ou GLO, ont des impacts différents sur la production d'un module photovoltaïque. Tels que définis dans cette étude, le rayonnement CLO correspond au productible mais le rayonnement amène une montée en température du module et donc une perte de rendement. L'environnement urbain entraîne une distribution complexe des rayonnements. L'ambition de cette thèse a donc été de proposer une démarche de modélisation et de validation des rayonnements, en particulier CLO, en milieu urbain.

Sur le plan méthodologique, cette étude s'est appuyée sur une reconstruction des modèles d'ensoleillement issus de la bibliographie, modèles qui doivent potentiellement servir de première pierre au développement d'un outil interne au sein du CETHIL. La reconstruction de ces modèles doit permettre le contrôle des hypothèses d'entrée des modèles, et ainsi l'évaluation des incertitudes sur les irradiances relevés sur les différentes surfaces composant la scène urbaine. Si l'état de l'art montre qu'au moins deux méthodes permettent de simuler les ensoleillements en milieu urbain, la comparaison de ces méthodes sous des hypothèses identiques reste à faire, notamment en s'affranchissant des hypothèses implicites des logiciels existants. Théoriquement, et sous les mêmes hypothèses de réflexions lambertienne, les résultats issus de ces méthodes devraient être identiques. En pratique, les contraintes imposées sur les méthodes de codage de ces méthodes sont sources de différences. L'idée est donc de coder chacune de ces méthodes afin de comparer leurs performances et apporter de la connaissance quant à leurs intérêts respectifs.

Afin permettant d'intégrer ces propriétés de réflexion afin de quantifier leur impact sur l'irradiance au sein d'un quartier. La reconstruction de ces modèles est une étape clef car elle permet le contrôle des hypothèses d'entrée des modèles.

Parallèlement à ces travaux de modélisation, des travaux de mesures ont été menés. Ces travaux ont été effectués à deux échelles. A un premier niveau, celle d'une maquette d'échelle 1 :10, a permis de valider les modèles d'ensoleillement. A un second niveau, au niveau des propriétés de surface des matériaux, a permis d'évaluer les modes de réflexion de la lumière. Ces mesures effectuées en laboratoire ont également permis de modéliser la réflexion de la lumière sur des matériaux typiques des surfaces urbaines. La prise en compte de ces modes de réflexion dans les modèles d'ensoleillement, afin de quantifier leur impact par rapport aux hypothèses effectuées dans la littérature, doit permettre de présenter et de justifier l'intérêt d'une méthodologie par rapport à une autre.

## Chapitre 2

# Simulation des transferts radiatifs avec des propriétés réfléchives fines.

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction.</b>	<b>43</b>
<b>2.2</b>	<b>Nomenclature Chapitre 2.</b>	<b>44</b>
<b>2.3</b>	<b>Généralités sur la ressource solaire.</b>	<b>48</b>
2.3.1	Position du soleil.	49
2.3.2	Rayonnement direct.	49
2.3.3	Le rayonnement diffus.	51
2.3.4	Le rayonnement réfléchi.	52
<b>2.4</b>	<b>Modèle de ciel.</b>	<b>52</b>
2.4.1	Modélisation de la voûte céleste.	52
2.4.1.1	Modèle isotropique.	53
2.4.1.2	Modèle anisotropique.	53
2.4.2	Calcul de la répartition du rayonnement diffus.	54
<b>2.5</b>	<b>Modèles d'enseillements.</b>	<b>55</b>
2.5.1	Introduction sur la prise en compte des réflexions.	55
2.5.2	Radiosité.	57
2.5.2.1	Maillages.	58
2.5.2.2	Contrôle des maillages.	59
2.5.2.3	Maillage du ciel dans les modèles.	59
2.5.2.4	Evaluation des masques.	59
2.5.2.5	Facteurs de forme.	60
2.5.2.6	Calcul des sources solaires.	62
	Source d'éclairement direct.	62
	Source d'éclairement diffus.	63
2.5.2.7	Prise en compte des propriétés des matériaux.	64
2.5.2.8	Méthodes de calcul des radiosités.	64

2.5.3	Le lancer de rayons. . . . .	65
2.5.3.1	Construction du code. . . . .	66
	Maillage de la scène urbaine. . . . .	66
	Prise en compte du ciel. . . . .	68
	Parcours des rayons. . . . .	69
2.5.3.2	Calculs énergétiques. . . . .	70
	Initialisation des rayons. . . . .	70
	Condition d'arrêt du parcours des rayons. . . . .	71
	Crénelage et méthodes d'anti-crénelage. . . . .	73
2.5.3.3	Modèles de réflexion. . . . .	73
	Modélisation des réflexions spéculaires. . . . .	74
	Modélisation des réflexions lambertiennes. . . . .	74
2.5.3.4	Validation de code. . . . .	76
<b>2.6</b>	<b>Résultats intermédiaires. . . . .</b>	<b>79</b>
2.6.1	Cas d'étude. . . . .	79
2.6.1.1	Entrées du modèle. . . . .	79
2.6.1.2	Scène d'étude. . . . .	80
2.6.1.3	Propriétés optiques des surfaces. . . . .	82
2.6.2	Cartographies d'ensoleillement. . . . .	82
2.6.3	Résultats issus de la méthode par radiosité. . . . .	83
2.6.4	Résultats issus de la méthode par lancer de rayons. . . . .	86
2.6.5	Comparaison des résultats. . . . .	90
2.6.5.1	Surface au niveau des toitures. . . . .	90
2.6.5.2	Surface au sol. . . . .	91
2.6.5.3	Façade est. . . . .	92
2.6.5.4	Façade ouest. . . . .	95
2.6.6	Synthèse des performances des codes prototypes développés. . . . .	97
2.6.6.1	Différences de performances en modélisations physiques. . . . .	97
2.6.6.2	Différences de performance en capacité de calcul. . . . .	98
<b>2.7</b>	<b>Perspectives. . . . .</b>	<b>99</b>
2.7.1	Perspectives spectrales. . . . .	100
2.7.1.1	Prise en compte du ciel. . . . .	100
2.7.1.2	Modèles de réflexion. . . . .	102
2.7.1.3	Résultats en modélisation spectrale. . . . .	102
2.7.2	Autres perspectives et limites. . . . .	104

---

## 2.1 Introduction.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les modèles d'enseillement tels que développés au cours de cette thèse. Ces modèles sont semblables à ceux issus de la bibliographie, intégrant des processus de calcul qui sont extraits de différents travaux présents dans l'état l'art et qui sont apparus comme pertinents. L'objectif était de se doter de modèles malléables avec une maîtrise totale sur l'ensemble des hypothèses.

## 2.2 Nomenclature Chapitre 2.

### Angles

$\theta$	Angle d'incidence des rayons par rapport à la normale, pour une maille de la scène	<i>rad</i>
$\gamma_s$	Angle d'élévation solaire	<i>rad</i>
$\gamma_s^{true}$	Angle d'élévation solaire corrigé	<i>rad</i>
$\Delta\gamma_{refr}$	Facteur correctif ajouté à $\gamma_s$	<i>rad</i>
$\zeta$	Angle zénithal	<i>rad</i>
$\beta$	Angle entre la direction du soleil et la normale à la maille de voûte céleste	<i>rad</i>
$\phi$	Angle dans le plan $(O, \vec{x}, \vec{y})$ dans les modèles de réflexion	<i>rad</i>
$\theta_r$	Angle de réflexion des rayons dans le plan $(O, \vec{n}, \vec{r}_s)$ dans les modèles de réflexion	<i>rad</i>

### Maillages

$M_{g/f}$	Maillage grossier / fin	-
$N_{g/f/ciel}$	Nombre de mailles sur le maillage grossier / fin / de voûte céleste	-
$V_{scene}$	Matrice d'intervisibilité entre les mailles de la scène	-
$V_{ciel}$	Matrice de visibilité des mailles de voûte céleste depuis les mailles de scène	-
$F$	Matrice des facteurs de forme entre mailles de la scène	-
$F_{ciel}$	Matrice des facteurs de forme entre les mailles de la scène et les mailles du ciel	-
$S$	Vecteur des surfaces des mailles composant la scène urbaine	$m^2$
$S_C$	Vecteur des surfaces des mailles de voûte céleste	$m^2$
$S_f$	Vecteur des surfaces des faces du cube solaire en lancer de rayons	$m^2$
$R_C$	Distance maille de la voûte céleste - point d'étude	$m^2$

### Voûte céleste

$AM$	"Air Mass"	-
$m$	Masse d'air optique relative	-
$TL(AM2)$	Turbidité de l'air dans le cas d'une "Air Mass" de 2	-
$a, b, c, d, e$	Coefficients empiriques issus des fonctions décrivant les conditions de ciel présentées dans les travaux de Pérez	-
$p$	Pression atmosphérique	Pa
$p_o$	Pression atmosphérique au niveau de la mer	Pa
$d_s$	Distance soleil - point d'étude	km
$d_o$	Distance soleil - point d'étude lorsque le soleil est au zénith	km
$\delta_r$	Épaisseur optique de Rayleigh	-
$l\nu$	Luminance relative des mailles de la voûte céleste	-
$L\nu$	Luminance des mailles de la voûte céleste	-

**Grandeurs radiatives**

$B$	Rayonnement direct	$W/m^2$
$B_h$	Rayonnement direct sur une surface horizontale	$W/m^2$
$B_n$	Rayonnement direct sur une surface orthogonale au rayonnement	$W/m^2$
$D$	Rayonnement diffus	$W/m^2$
$D_h$	Rayonnement diffus sur une surface horizontale	$W/m^2$
$G$	Rayonnement global	$W/m^2$
$G_h$	Rayonnement global sur une surface horizontale	$W/m^2$
$C_o$	Constante solaire	$W$
$E_B$	Vecteur d'irradiances directes sur la scène urbaine	$W/m^2$
$E_D$	Vecteur d'irradiances diffuses sur la scène urbaine	$W/m^2$
$E$	Vecteur d'irradiances initiales dans le cas de la radiosité	$W/m^2$
$I$	Vecteur d'irradiances reçues par les mailles de la scène	$W/m^2$
$e$	Energie transportée par un rayon	$W$
$J$	Radiosité	$W/m^2$
$Q$	Densité de flux réfléchi	$W/m^2$
$L$	Luminance réfléchie	$W/(m^2sr)$

## Divers

$n$	Nombre de rayons générés	-
$n_i$	Nombre de rayons générés depuis la face $i$ (initialisation du lancer de rayon)	-
$n_{r,i}$	Nombre de rayons reçus sur la maille $i$	-
$K$	Discrépance	-
$\lambda$	Longueur d'onde	nm
$\lambda_s$	Mesure de Lebesgue	-
$R$	Matrice de rotation	-
$a$	Axe de rotation	-
$R_i$	Variable aléatoire dans l'espace $[0, 1]$ générée selon une loi uniforme	-
$\Psi$	Espace d'entiers naturels dans lequel sont gé- nérés les rayons	-
$\kappa$	Sous espace de l'ensemble $\Psi$	-
$Id$	Matrice identité	-
$\epsilon_{loc/glob}$	Critère de convergence local / global	-
$\vec{h}$	<i>Rusinkiewicz Half vector</i> (vecteur bissec- teur)	-
$\vec{r}_{i/s}$	Direction du rayon incident / réfléchi	-
$d\omega$	Élément différentiel d'angle solide	sr
$\vec{n}$	Vecteur des normales aux mailles	-

**Note :** Certaines notations, propres à des démonstrations, peuvent localement être différentes. Ces notations locales sont alors précisées avant les équations.

### 2.3 Généralités sur la ressource solaire.

On appellera, par abus de langage dans ce manuscrit, "ensoleillement" les irradiances issues du soleil en courte longueur d'onde. De même, nous nous intéresserons en particulier à la bande spectrale dite des "Courtes Longueurs d'Ondes" (CLO) à opposer dans ce manuscrit à la bande spectrale dite des "Grandes Longueurs d'Ondes" (GLO). Les bandes spectrales sont définies en terme de longueurs d'onde dans le tableau 2.1.

Courtes Longueurs d'Ondes (CLO)	[200 nm, 2000 nm]
Grandes Longueurs d'Ondes (GLO)	]2000 nm, +∞]

TABLE 2.1 – Définition des bandes spectrales utilisées dans ce manuscrit

La complexité de l'évaluation des apports solaires sur un bâtiment dépend de l'emplacement géographique de ce dernier mais aussi de la topographie de l'environnement dans lequel il est construit. Dans le cas d'un bâtiment isolé, seuls les masques lointains, la position géographique et les conditions de ciel influenceront les apports solaires sur le bâtiment. Cependant, lorsque la densité des bâtiments augmente, la prise en compte des masques proches, et des réflexions générées, doit rentrer en compte pour un calcul rigoureux des apports solaires. Ces apports se divisent alors en trois types différents :

- Le rayonnement direct, issu directement du soleil
- Le rayonnement diffus, issu de la voûte céleste
- Le rayonnement réfléchi, issu des différentes réflexions sur l'ensemble de la scène environnante

Le rayonnement s'exprime en Watt par mètre carré [ $\text{W} \times \text{m}^2$ ].

Lorsque les rayons solaires traversent la couche atmosphérique, les particules contenues dans cette dernière génèrent un phénomène de diffusion (on peut également parler de diffraction). La succession des diffractions générées dans la couche atmosphérique génère un rayonnement provenant de toutes les directions de la voûte céleste. C'est ce rayonnement que l'on nomme éclairage diffus. Notons que c'est ce phénomène qui est à l'origine des couleurs observables dans le ciel [117]. L'absorption et la diffusion des photons par la couche atmosphérique sont caractérisées directement par la grandeur "Air Mass" [118]. Ce nombre, noté  $AM$  est donné par l'équation suivante :

$$AM = \frac{d_s}{d_0} \approx \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.1)$$

$d_s$  représente la distance parcourue par un rayon associé au rayonnement direct dans l'atmosphère, et  $d_0$  est la distance de référence représentée comme la distance parcourue par un rayon au zénith pour atteindre le niveau de la mer.  $\theta$  correspond à l'angle d'incidence des rayons solaires, à partir de la verticale.

La quantité d'Air Mass est constamment supérieure ou égale à 1. Ce nombre est notamment utilisé dans la comparaison des cellules solaires, et qualifie le spectre utilisé. On utilise ainsi le spectre dit AM1.5 normalisé, qui correspond à une puissance de  $1\text{kW}/\text{m}^2$ . Le spectre AM1.5G (Global) inclut les contributions diffuse et directe (spectre AM1.5D) du rayonnement solaire. On note toutefois AM0 le spectre hors atmosphère. La figure 2.1 présente les spectres AM0 et AM1.5G.

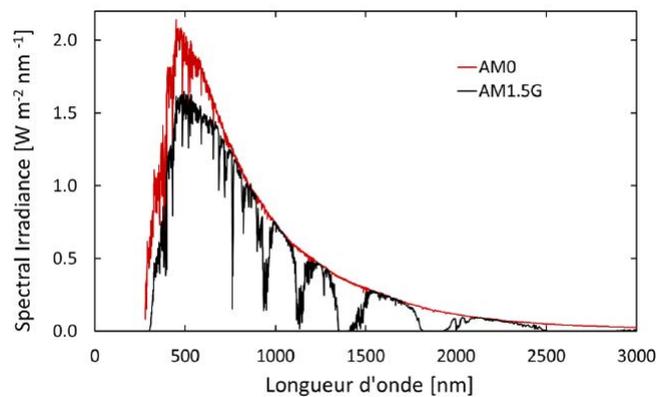


FIGURE 2.1 – Spectres solaires AM0 (rouge) et AM1.5G (noir) [118]

### 2.3.1 Position du soleil.

Comme le rappelle Vermeulen dans ses travaux [117], la Terre décrit une ellipse dont le soleil constitue l'un de ses foyers. La position du soleil dans le ciel est définie à partir de l'angle azimut et de l'angle d'élevation du soleil. L'angle azimut correspond à l'angle dans le plan de la scène entre la direction du soleil et une direction de référence, ici le Nord. L'Ouest a donc un angle azimut de  $90^\circ$ , l'est de  $-90^\circ$  et le sud de  $180^\circ$ . L'angle d'élevation du soleil correspond au complémentaire de l'angle zénithal. Autrement dit il s'agit de l'angle avec lequel le soleil s'élève par rapport à l'horizon. Un angle d'élevation de  $0^\circ$  correspond donc à un soleil situé à l'horizon, tandis qu'un angle d'élevation de  $90^\circ$  correspond à un soleil situé exactement au-dessus de la scène, sans orientation privilégiée.

La Terre met 365.25 jours à effectuer une rotation complète autour du soleil, et l'irradiance moyenne hors atmosphère, appelée constante solaire, est de  $1366.1\text{W}/\text{m}^2$  [119]. Le rayonnement solaire en un point de la surface terrestre se distingue en trois composantes : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi. La proportion de chacun de ces termes varie en fonction des conditions de ciel et de la topographie au niveau de la surface de la Terre.

### 2.3.2 Rayonnement direct.

Le rayonnement direct, noté  $B$  correspond au rayonnement issu du soleil et qui n'est pas dévié dans les couches atmosphériques. La norme *ISO 9488 :1999(fr)* définit

le rayonnement direct comme "le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire". Par ailleurs, la norme précise que le disque solaire couvre un angle de  $0,5^\circ$ . C'est cette source d'irradiance qui est souvent considérée en premier lieu lorsque l'on s'intéresse au potentiel photovoltaïque car il s'agit de la composante la plus importante en l'absence de masques et par conditions de ciel clair. On note  $B_h$  l'éclairement direct incident sur une surface horizontale, et  $B_n$  dans le cas d'une surface dont le plan est normal aux rayons incidents.

Comme le précise la norme *9488 :1999(fr)*, les appareils de mesure du rayonnement direct possèdent généralement "un angle d'ouverture allant jusqu'à  $6^\circ$ ". Ces appareils mesurent donc une part issue de la région entourant le soleil, appelée circumsolaire. Cette part du rayonnement issue du circumsolaire est donc souvent attribuée au rayonnement direct, dans les mesures comme dans les modèles d'ensoleillement.

Une évaluation de l'irradiance directe reçue par une surface horizontale, noté  $B_h$ , est donnée par l'Equation 2.2 présentée dans l'atlas européen des radiations solaires (European Solar Radiation Atlas – ESRA) [120].

$$B_h = C_0 \epsilon \sin(\zeta) \exp(-0.8662(TLAM2)m\delta_R(m)) \quad (2.2)$$

$C_0$  correspond à la constante solaire (soit l'irradiance reçue par une surface située au-dessus de la couche atmosphérique, orientée perpendiculairement aux rayons solaires et située à une distance terre-soleil du soleil, qui est égale à  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ),  $\zeta$  correspond à l'angle d'élévation du soleil,  $\epsilon$  représente une correction portant sur la distance terre-soleil au niveau de la zone sur laquelle on souhaite évaluer le flux direct et  $TLAM2$  est associé à la turbidité de l'air pour une masse d'air optique de 2 (la masse d'air optique étant la quantité d'atmosphère terrestre traversée pour atteindre l'observateur, en nombre d'atmosphères traversées).  $\delta_R(m)$  correspond à l'épaisseur optique de Rayleigh. Cette épaisseur est égale à l'épaisseur optique d'une atmosphère parfaitement diffusante selon les lois de la diffusion de Rayleigh. Enfin,  $m$  représente la masse d'air optique relative (exprimant le rapport des distances parcourues par un rayon dans l'atmosphère et dans le cas d'une atmosphère standard ( $TLAM2$ ) au niveau de la mer et avec le soleil au zénith) [120, 10]. Cette grandeur dépend donc de l'angle d'incidence avec lequel les rayons entrent dans l'atmosphère, ainsi que des coordonnées géographiques de la zone d'intérêt. Elle peut également être fonction de la longueur d'onde. Il existe plusieurs modèles mathématiques pour le calcul de cette "masse d'air optique" relative. On citera notamment la formule de Kasten and Young (1989) [121], utilisée comme référence en Europe (European Solar Radiation Atlas – ESRA) de 2000 [120]. Dans ce dernier, la masse d'air optique est calculée à partir de la hauteur angulaire du soleil corrigée à partir de la hauteur angulaire corrigée  $\gamma_s^{true}$  et des pressions atmosphériques au lieu d'étude ( $p$ ) et au niveau de la mer ( $p_0$ ).

Le calcul de la "masse d'air optique" est détaillé Equation 2.3.

$$m(\gamma_s^{true}) = \frac{p/p_0}{\sin(\gamma_s^{true}) + 0.50572(\gamma_s^{true} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (2.3)$$

Avec :

$$\gamma_s^{true} = \gamma_s + \Delta\gamma_{refr} \quad (2.4)$$

Et :

$$\Delta\zeta_{refr} = 0.061359 \frac{180}{\pi} \frac{0.1594 + 1.1230(\pi/180)\zeta + 0.065656(\pi/180)^2\zeta^2}{1 + 28.9344(\pi/180)\zeta + 277.3971(\pi/180)^2\zeta^2} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 Le rayonnement diffus.

On appelle rayonnement diffus, noté  $D$  et exprimé en Watts par mètres carrés ( $[W/m^2]$ ) l'énergie issue de la voûte céleste. L'énergie issue du circumsolaire étant intégrée au rayonnement direct, elle n'est pas associée au rayonnement diffus. On note  $D_h$  le rayonnement diffus incident sur une surface horizontale.

Dans ses travaux, Rigollier [120] propose un modèle, le modèle *ESRA* (*European Solar Radiation Atlas*) reposant sur des formules empiriques permettant de calculer les rayonnements direct et diffus. Ce modèle prend notamment en compte l'altitude de la zone d'étude, ainsi que la turbidité de l'air. La turbidité de l'air est considérée pour une Air Mass de 2, et est notée  $T_L(AM2)$ .

Le rayonnement diffus  $D_h$  (pour *Diffused horizontal*) incident sur une surface horizontale est donnée par la formule :

$$D_h = C_0 \epsilon T_{rd}(T_L(AM2)) F_d(\zeta, T_L(AM2)) \quad (2.6)$$

Les fonctions  $T_{rd}$  et  $F_d$  sont des fonctions empiriques détaillées dans les travaux de Rigollier [120], représentant respectivement les fonctions de transmittance et de diffusion au sein de la couche atmosphérique. Les courbes de ces fonctions sont détaillées figure (2.2) :

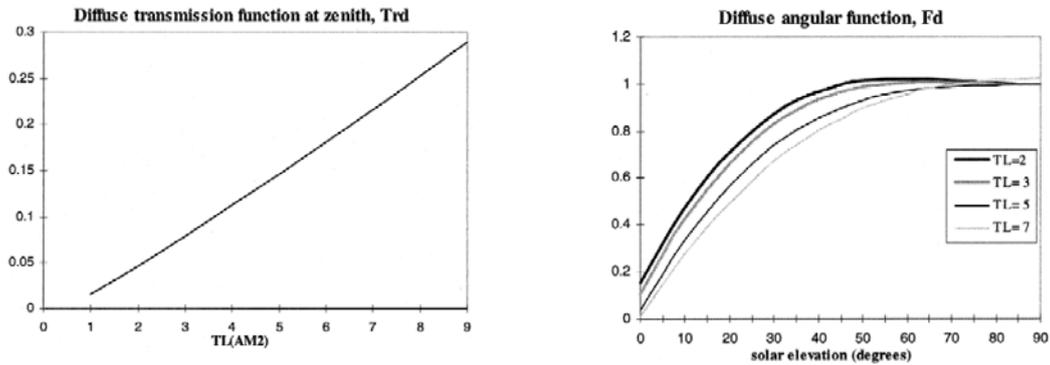


FIGURE 2.2 – Évolution de la transmittance en fonction de la turbidité atmosphérique (courbe de gauche) et évolution de la diffusion solaire en fonction de la turbidité de l'air (courbe de droite) [120].

La somme du rayonnement diffus et du rayonnement direct constitue le rayonnement global, noté  $G$ . Respectivement aux notations précédentes, on note  $G_h$  le rayonnement global incident sur une surface horizontale.

### 2.3.4 Le rayonnement réfléchi.

Le rayonnement réfléchi se constitue de l'ensemble des réflexions générées par les surfaces environnantes. De manière simplifiée, il est souvent assimilé à l'albédo du sol, mais cette approximation reste peu satisfaisante. Dans le cas d'une scène urbaine, il correspond aux apports radiatifs issus des réflexions sur l'ensemble des composants de cette scène. Les modes de calcul et d'évaluation de ce rayonnement sont directement liés à l'objet de cette thèse et seront détaillés tout au long de ce manuscrit.

## 2.4 Modèle de ciel.

Les modèles de ciel ont deux objectifs. Ils permettent dans un premier temps d'évaluer la fraction de ciel visible depuis n'importe quel point d'étude, en évaluant l'impact des masques lointains et proches. Dans un second temps, ils permettent de calculer la répartition du rayonnement diffus sur la voûte céleste.

### 2.4.1 Modélisation de la voûte céleste.

Le calcul des obstructions de la voûte, pour une géométrie donnée, est indépendant du temps. Il ne faut pas confondre les obstructions à la voûte céleste, qui s'appliquent sur le rayonnement diffus, et les masques qui s'appliquent sur le rayonnement direct. L'une des principales difficultés, quelque soit la méthode utilisée, reste la modélisation de la voûte céleste. La voûte céleste est assimilée à une hémisphère centrée sur la scène d'étude. Les calculs des masques à la voûte céleste permettent de calculer ce que l'on nomme le *Sky View Factor (SVF)* ou *Facteur de Ciel* [122]. Son calcul repose sur un

maillage de la voûte céleste. Les facteurs de forme calculés représentent le rapport de l'angle solide de la portion de voûte céleste visible sur l'angle solide de l'ensemble de la voûte céleste (équation (2.7)), avec  $S_c$  la surface de la maille de voûte céleste considérée et  $R_c$  la distance entre le barycentre de cette maille et le centre de la voûte céleste. Il est évident que la discrétisation de la voûte céleste impacte alors le calcul des *SVF*.

$$F_{ciel}(i, j) = \frac{S_c(i)}{R_c(j)^2} \frac{1}{2\pi} \quad (2.7)$$

En 2004, lorsque Robinson publie ses travaux sur la modélisation de l'irradiance solaire en milieu urbain, il relève les différents défauts des modèles de prise en compte de la voûte céleste [92]. Il signale notamment que si les modèles considérant l'ensoleillement prennent en compte les obstructions au rayonnement direct, les obstructions au rayonnement de la voûte céleste ne sont pas toujours considérées. Deux modèles de ciel sont détaillés par la suite.

#### 2.4.1.1 Modèle isotropique.

Ce modèle considère que le rayonnement reçu de la voûte céleste est indépendant de la direction. Il s'agit d'une hypothèse généralement effectuée dans les jeux vidéo car elle facilite l'utilisation de modèles de lancer de rayons en temps réel. Elle permet en effet de travailler selon une méthode *backward*, qui génère des rayons depuis l'observateur.

Une fois la voûte céleste maillée, l'intensité lumineuse ou d'irradiance de chacune des mailles la composant doit être déterminée.

#### 2.4.1.2 Modèle anisotropique.

Un modèle anisotropique est un modèle où l'irradiance issue de la voûte céleste est dépendante de la position du soleil. Des études comparatives entre modèles isotropiques et anisotropiques semblent montrer que les modèles isotropiques génèrent des valeurs d'ensoleillement trop faibles lors des mois peu ensoleillés, et à l'inverse sur-évaluent les irradiances solaires lors des mois à fort ensoleillement [123].

On peut également faire un aparté sur le modèle avancé par Tregenza. Ce modèle propose [124] une méthode de maillage dont le but est de permettre une modélisation de la voûte céleste par un modèle anisotropique. Il propose alors une décomposition de la voûte céleste en 145 sources lumineuses. D'autres méthodes de maillage sont également possibles. La figure 2.3 présente le maillage de Tregenza (*145 Equal-Area*), ainsi que d'autres stratégies de maillage possibles.

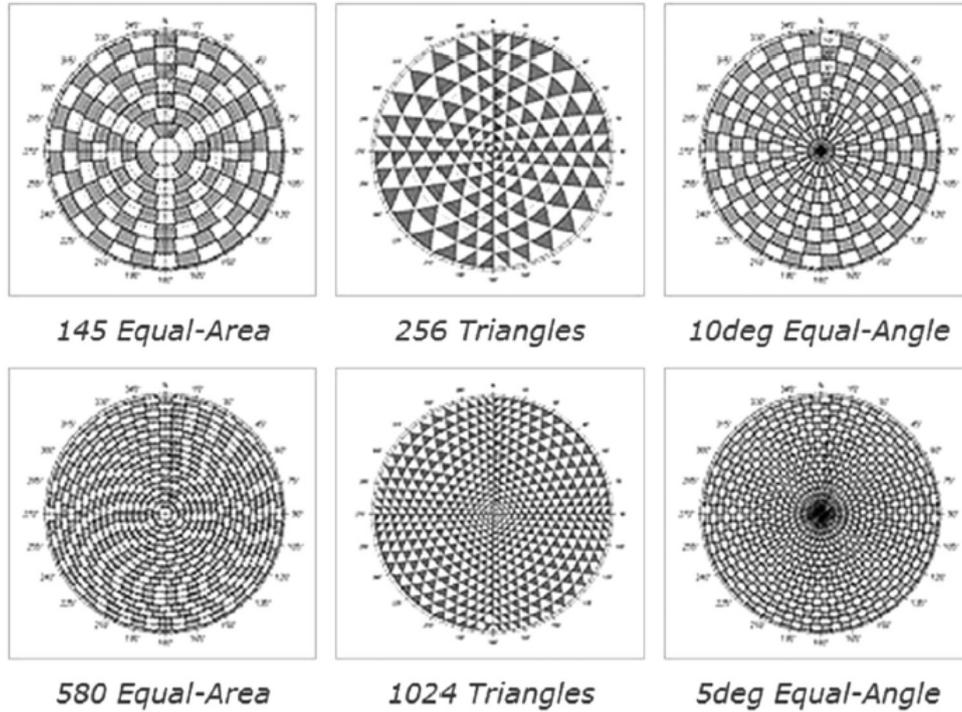


FIGURE 2.3 – Différentes stratégies de maillage de la voûte céleste [122]

#### 2.4.2 Calcul de la répartition du rayonnement diffus.

Les modèles de Pérez sont des modèles inspirés des équations de conditions standards de ciel clair CIE (Commission Internationale de l’Eclairage, [125]). La valeur d’intensité lumineuse  $L\nu$  distribuée pour chaque maille est fixée à partir des équations déterminées par Perez [101]. Pérez utilise initialement ces formules pour calculer l’illuminance de chaque maille de la voûte céleste. On réutilisera ces formules pour les appliquer à des calculs d’irradiance. Cette méthode est également reprise par Robinson pour simuler des répartitions de diffus et évaluer des ensoleillements annuels à partir d’une unique simulation [92]. La luminance  $L\nu$  de chaque maille est calculée à partir de la luminance relative  $l\nu$  (équation 2.8). Cette dernière correspond au ratio entre la luminance d’un élément de ciel déterminé, par rapport à la luminance d’un élément de référence. Ainsi, cette luminance relative est calculée pour chaque maille, et est donnée par l’équation 2.8.  $\zeta$  et  $\beta$  sont respectivement l’angle zénithal et l’angle entre la position du soleil et la normale au centre de la maille de voûte céleste considérée.

$$l\nu = f(\zeta, \beta) = \left(1 + a \exp\left(\frac{b}{\cos(\zeta)}\right)\right) (1 + e \exp(d\beta) + e \cos(\beta)^2) \quad (2.8)$$

$a, b, c, d$  et  $e$  sont des variables empiriques déterminées en fonction des conditions

de ciel, et dont l'influence est détaillée dans les travaux de Pérez [101]. Il en suit le calcul de la luminance  $L\nu$  émise par chaque maille (équation 2.9).

$$L\nu = \frac{l\nu D_h}{\int_0^{2\pi} (l\nu(\zeta, \beta) \cos(\beta)) d\omega} \quad (2.9)$$

$D_h$ , exprimé en  $[\text{Wm}^{-2}]$ , correspond au rayonnement diffus incident sur une surface horizontale,  $d\omega$  l'angle solide de l'élément différentiel, soit ici la maille étudiée.

## 2.5 Modèles d'ensoleillements.

### 2.5.1 Introduction sur la prise en compte des réflexions.

Une partie du rayonnement solaire reçu par la scène est réfléchi vers la scène elle-même. Chaque surface composant la scène étudiée se comporte donc comme une source d'énergie secondaire. La quantité d'énergie renvoyée par chacune de ces surfaces est notamment fonction du coefficient de réflexion des matériaux composant les enveloppes extérieures des bâtiments, mais aussi du reste des surfaces de la scène urbaine considérée. La difficulté des calculs d'évaluation des rayonnements réfléchis par chacune des mailles de la scène réside dans la prise en compte de l'architecture du milieu urbain. Plusieurs méthodes de calcul existent afin d'évaluer la quantité d'énergie ainsi réfléchie vers les différents points de la scène. Parmi ces méthodes, deux d'entre elles sont couramment utilisées :

- Les méthodes par radiosité
- Les méthodes par lancer de rayons

Dans l'évaluation de l'irradiance en milieu urbain dense, la bonne modélisation des réflexions sur les différents bâtiments est essentielle. Bien qu'il existe différents modèles pour évaluer l'intensité de la densité de puissance sur chaque zone de chaque partie d'une scène urbaine, les propriétés de réflexion des différents éléments urbains sont généralement simplifiées : les réflexions sont supposées lambertiennes, sans prise en compte d'effets de réflexion géométriques (figure 2.4), et ce pour l'ensemble des longueurs d'ondes. Cela soulève des questions sur la pertinence de ces hypothèses et de leur influence dans l'évaluation de la distribution des apports solaires après réflexions. Ainsi, cette partie passe en revue les différentes alternatives de modélisation des apports solaires en milieu urbain dense. L'objectif final est d'évaluer l'influence des propriétés de réflexion des matériaux sur la densité de puissance incidente sur une façade. Deux modèles sont examinés : l'un basé sur la méthode de la radiosité et l'autre sur la méthode de lancer de rayons. Les constructions des deux méthodes sont détaillées et les résultats des deux modèles sous des hypothèses similaires sont comparés. De plus, l'influence des différentes propriétés de réflexion est également étudiée.

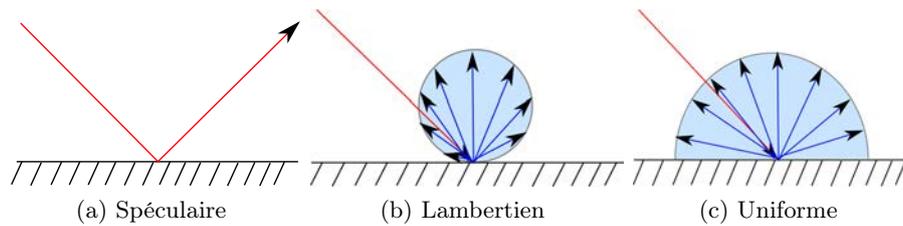


FIGURE 2.4 – Schéma des différents modèles de réflexion.

L'état de l'art a montré qu'il était difficile de simuler l'incidence solaire en tenant compte à la fois des rayonnements solaires direct et diffus dans les zones urbaines [126]. En outre, chaque surface urbaine a des propriétés de réflexion spécifiques. L'influence de ces propriétés sur la répartition de la densité de puissance résultant des radiations solaires reste mal évaluée. De plus, le spectre issu des réflexions multiples est encore moins connu, bien que ce spectre incident sur le module BIPV soit à considérer pour une meilleure intégration dans les bâtiments comme le montre la publication de Ghosh et al. [64]. La question du spectre incident sur un module situé sur une façade en milieu urbain reste alors un sujet ouvert. Ou, tout simplement, rechercher la réalité de la densité de puissance incidente sur une façade en tenant compte des propriétés de réflexion réelles sur toutes les surfaces urbaines. En général, on suppose que toutes les réflexions sur les bâtiments et le sol sont lambertiennes. Ces hypothèses sont faites en utilisant les modèles actuels tels que ceux utilisés dans Solene, Simplified Radiosity Algorithm (SRA, pour CitySim) ou DIVA [92, 44, 127]. Cependant, certains modèles prennent en compte les réflexions spéculaires comme c'est le cas des travaux de Waibel et al. [128].

La réglementation française RT2012 impose un taux minimum de 17% de vitrage sur les bâtiments. Dans une telle configuration, l'hypothèse de réflexion diffuse semble inadaptée. L'hypothèse de réflexions spéculaires semble alors plus appropriée. La figure 2.4 illustre la différence entre les différents modes de réflexion. Il apparaît clairement que les hypothèses sur le modèle de réflexion peuvent modifier l'évaluation de la densité de puissance incidente sur les façades. Comme souligné précédemment, les performances des technologies BIPV et l'esthétisme d'intégration associé à cette technologie [129, 130] sont des critères majeurs dans son développement. Dans ce cadre, les travaux de thèse présentés ici visent à intégrer et à comparer différents modèles d'ensoleillement intégrant différentes propriétés de réflexion. Les modèles utilisés sont la radiosité et le lancer de rayons. Plus exactement, ces modèles simulent la densité de puissance résultante des rayonnements solaires avec prise en compte des réflexions sur l'ensemble des surfaces. Leur intégration dans les modèles d'ensoleillement sera détaillée par la suite. Enfin, ces modèles permettent d'obtenir des ensoleillements sur des surfaces de l'ordre de grandeur du  $1m^2$ , et sont ainsi tout à fait légitimes dans le calcul d'ensoleillements pour modules photovoltaïques.

Une première sous-partie présente la construction du modèle par radiosité tandis

que la seconde présente la méthode de lancer des rayons telle que développée dans ces travaux. Les méthodes de maillage de scène urbaine propres à chaque modèle sont également détaillées dans ces deux sections. Les avantages et les inconvénients théoriques de chacune des méthodes de calcul sont présentés, et les preuves de la convergence sont introduites.

### 2.5.2 Radiosité.

La radiosité est une méthode numérique permettant l'évaluation de la quantité d'énergie incidente sur une géométrie donnée, notamment en 3 dimensions. Cette méthode pré-suppose l'ensemble des revêtements de la scène d'étude comme parfaitement diffusants : autrement dit l'ensemble des réflexions sont supposées lambertiennes. D'autres modèles de réflexion peuvent être intégrés à la méthode, mais nécessitent un calcul des fonctions de texture de surface à chaque position du soleil, ce qui devient alors très coûteux en temps de calcul, et n'est donc pas désiré ici [86]. Elle repose sur une discrétisation sous la forme d'un maillage de la géométrie. A partir de ce maillage, l'ensemble des facteurs de forme (connus sous le nom de *view factor* en anglais), dont le calcul est détaillé Section 2.5.2.5, sont calculés. L'équation de la radiosité (équation 2.10) est alors une équation linéaire dont l'inversion permet d'obtenir les irradiances sur chacune des mailles.

$$J = E + \rho F J \quad (2.10)$$

où  $J$  est la radiosité et représente l'irradiance diffusée ( $[W/m^2]$ ) par chacune des mailles composant la scène urbaine,  $F$  la matrice de facteur de forme et  $\rho$  représente le vecteur des coefficients de réflexion, où  $\rho_i$  correspond au coefficient de réflexion de la maille  $i$ .  $E$  est le terme source, avec  $E_i$  l'irradiance initialement émise par la maille  $i$  ( $[W/m^2]$ ).

La méthode de la radiosité implique le calcul de la matrice de facteur de forme  $F$ . Ce calcul représente la principale difficulté de cette méthode. Classiquement, des méthodes analytiques ou des méthodes de lancer de rayons sont utilisées pour évaluer les facteurs de forme [131]. Des méthodes expérimentales sont également utilisées [132]. Comme détaillé par la suite, les travaux présentés ici utilisent des fonctions analytiques (Section 2.5.2.5).

L'approche sur laquelle se base la méthode des radiosités repose sur l'hypothèse que toutes les surfaces sont lambertiennes. De cette façon, toute l'énergie reçue par une surface est redistribuée uniformément dans l'espace. Sous cette hypothèse, le problème peut être écrit comme un système linéaire d'équations (équation 2.11), appelé "méthode de la radiosité" et qui est détaillé dans les travaux de Fernandez [133]. La linéarité du système permet de réécrire l'équation 2.10 de la façon suivante (équation 2.11), avec  $I_d$  la matrice identité :

$$(Id - \rho F)J = E. \quad (2.11)$$

La méthodologie de la radiosité présente deux défauts. Le premier concerne le temps de calcul important, notamment concernant le calcul des facteurs de forme dans le cas de géométries complexes, et le stockage de ces facteurs dans des matrices de grande dimension. Le second défaut concerne les hypothèses physiques en elles mêmes. Les propriétés de réflexion sont supposées intrinsèquement lambertiennes et la méthode ne permet alors pas de modéliser le comportement optique de certains matériaux présentant notamment des propriétés spéculaires.

### 2.5.2.1 Maillages.

Pour chaque scène étudiée en radiosité, trois maillages sont utilisés. Le premier maillage concerne la scène d'étude : il définit la géométrie du bâtiment étudié et son environnement. Le second est un maillage dit *grossier* de cette même scène qui est utilisé dans le calcul des masques solaires. Le troisième maillage concerne le ciel. Ce dernier permet d'obtenir une voûte céleste au rayonnement non uniforme. Il permet également d'évaluer les masques à la voûte céleste et la proportion de ciel visible. Tous ces maillages sont générés via le logiciel *GMSH* qui est un mailleur gratuit en accès libre [134].

Pour accélérer le calcul des masques, deux maillages différents de la scène d'étude sont utilisés. Le premier maillage possède des mailles de taille importante, il est nommé *maillage grossier*. Le second maillage correspond au maillage sur lequel on souhaite réaliser l'étude. On l'appellera *maillage d'étude*. C'est sur ce maillage que les facteurs de forme sont déterminés par la suite. Le maillage grossier sert uniquement à identifier les masques en permettant de limiter le nombre d'itération lors de leur identification. La scène est maillée de la façon la plus grossière possible tout en respectant la géométrie d'étude fixée. Les deux maillages ne sont pas nécessairement inclus l'un dans l'autre. Pour identifier un masque entre les éléments  $i$  et  $j$  du maillage d'étude, un rayon est généré depuis  $i$  vers  $j$ . On cherche alors à identifier une intersection sur le maillage grossier, ce qui correspondrait à la présence d'un masque entre les mailles  $i$  et  $j$ . Pour déterminer rapidement si un rayon traverse une maille du maillage grossier, on utilise l'algorithme de M  ller et Trumbore [135].

En effet, soit  $M_f$  le maillage fin sur lequel on souhaite évaluer l'irradiance et  $M_g$  le maillage grossier permettant l'évaluation des masques. Soit respectivement  $N_f$  et  $N_g$  le nombre de mailles des maillages  $M_f$  et  $M_g$ . Dans le cas de l'utilisation du maillage  $M_f$  seul, l'ordre de grandeur du nombre d'opérations à réaliser est  $O(N_f^3)$  tandis que dans le cas de l'utilisation des maillages  $M_f$  et  $M_g$  il est de  $O(N_f^2 * N_g)$ . L'utilisation d'une telle stratégie est donc particulièrement justifiée si  $N_g \ll N_f$ , ce qui est généralement le cas.

### 2.5.2.2 Contrôle des maillages.

Avant tout calcul, il est nécessaire de s'assurer de la bonne orientation des normales de chaque maille. Les scènes étudiées durant cette thèse ne sont pas nécessairement fermées. Un algorithme a alors été élaboré permettant de vérifier l'orientation des mailles. Il consiste à placer un point  $P_c$  à une altitude supérieure à l'ensemble de la scène et à la verticale du centre de la scène. On étudie alors l'ensemble des chemins depuis les barycentres de chaque maille de la scène d'étude vers ce point  $P_c$ . Lorsque le chemin intersecte un nombre pair d'éléments de la scène (ou masques), alors la normale à la maille est correctement orientée. Dans le cas contraire, lorsque le nombre d'intersections est impair, l'orientation de la normale à la maille a besoin d'être corrigée.

### 2.5.2.3 Maillage du ciel dans les modèles.

Le modèle de voûte céleste s'apparente à une demi-sphère décomposée de  $N_{ciel} = 420$  mailles triangulaires. Ce modèle de voûte céleste est utilisé pour évaluer les masques et la répartition du rayonnement diffus dans la voûte céleste. Pour chaque calcul, la voûte céleste est recentrée sur la maille d'étude. Cette stratégie permet d'assurer la justesse des facteurs de forme indépendamment de la position des mailles composant la scène urbaine.

### 2.5.2.4 Evaluation des masques.

Une méthodologie d'identification des masques à la voûte céleste est proposée dans la thèse. Les facteurs de visibilité sont stockés dans une matrice  $V_{ciel}$ . La détermination des coefficients de  $V_{ciel}$  repose sur un algorithme simple (Algorithme 1).

---

**Algorithm 1** Évaluation des masques à la voûte céleste

---

```
Initialisation de la matrice de visibilité  $V_{ciel}(1 : N_f, 1 : N_{ciel}) = 1$ 
for  $i$  allant de 1 à  $N_f$  (le nombre de mailles de la scène d'étude) do
  for  $j$  allant de 1 à  $N_{ciel}$  do
    for  $h$  allant de 1 à  $N_g$  (le nombre de masques potentiels) do
      if Identification d'un masque entre les mailles  $i$  et  $j$  then
         $V_{ciel}(i, j) = 0$ 
      return
    end if
  end for
end for
end for
```

---

De la même façon, on procède à un calcul des masques d'inter-visibilité entre

mailles de la scène. Les masques sont de nouveaux évalués en utilisant le maillage grossier. Ces facteurs de visibilité sont stockés dans une matrice  $V_{scene}$  (équation 2.12). L'algorithme d'évaluation des masques entre éléments de la scène étant similaire à l'algorithme d'évaluation des masques à la voûte céleste, celui-ci n'est pas détaillé. Il est évident que la matrice de visibilité  $V_{scene}$  est symétrique, permettant de ne calculer que la moitié de cette dernière.

$$V_{scene}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ voit } j. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.12)$$

La figure (2.5) illustre les mailles de ciel et les mailles de la scène visible depuis une maille d'étude située au sein d'une rue canyon et située au niveau du sol.

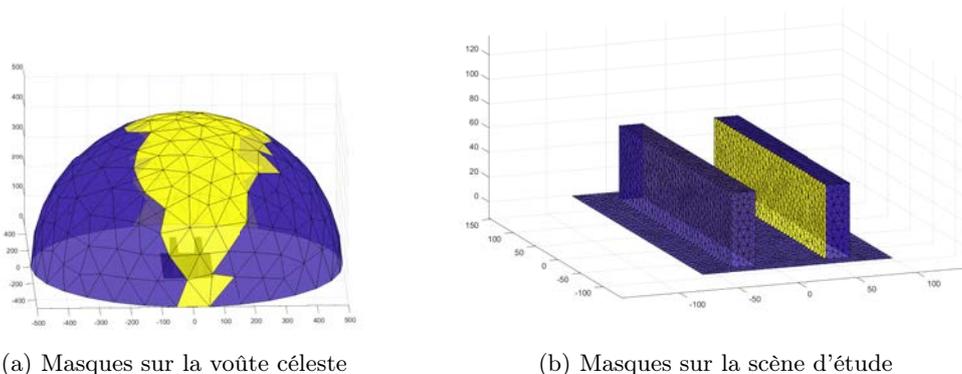


FIGURE 2.5 – Visualisation éléments masqués (mailles bleues) et des éléments visibles (mailles jaunes) depuis une maille d'étude située au centre de la rue canyon.

### 2.5.2.5 Facteurs de forme.

Différentes méthodologies existent pour le calcul des facteur de forme. Elles sont dans un premier temps présentées. Plusieurs thèses détaillent les stratégies de calcul des facteurs de forme [136, 10].

Un facteur de forme se calcule entre deux mailles (figure 2.6). Il correspond à la fraction de flux émis (de manière lambertienne) par la première maille (maille A) intercepté par la seconde maille (maille B). La définition du facteur de forme est donnée par l'équation suivante (équation 2.13). Une notation propre à ce paragraphe et utilisée ici.

$$F_{A \rightarrow B} = \frac{1}{S_A} \int_A \int_B \frac{\cos \theta_B \cos \theta_A}{\pi r^2} dS_A dS_B \quad (2.13)$$

Avec  $S_A$  l'aire de la maille  $A$ ,  $\theta_A$  l'angle entre la normale à  $A$  et  $\vec{r}$ ,  $\theta_B$  l'angle entre la normale à  $B$  et  $-\vec{r}$ .

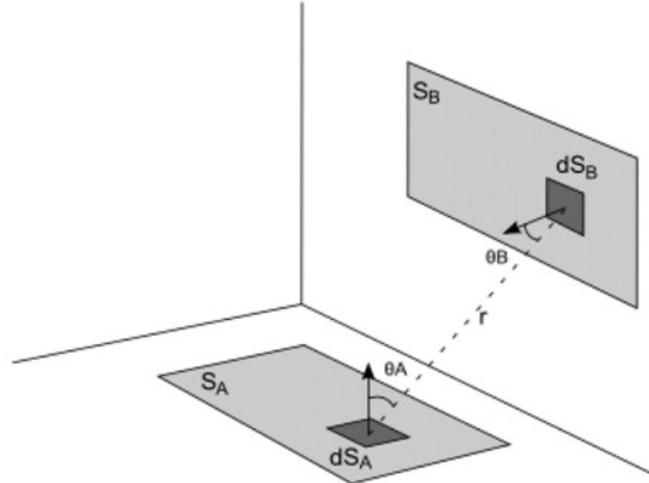


FIGURE 2.6 – Illustration du facteur de forme entre deux mailles rectangulaires (extrait de [10]).

Cette relation est symétrique à condition de multiplier les facteurs de forme par les aires des surfaces étudiées (équation 2.14) :

$$S_A F_{A \rightarrow B} = S_B F_{B \rightarrow A} \quad (2.14)$$

La formule présentée Equation 2.13 reste toutefois difficile à mettre en œuvre dans un calcul informatique, en particulier si l'on a un grand nombre de surfaces, et donc un grand nombre de facteurs de forme à calculer. En effet, son utilisation reste coûteuse en temps de calcul. Une stratégie possible est alors d'utiliser le théorème de Green. Cela permet de ramener le calcul des facteurs de forme de deux intégrales surfaciques à deux intégrales de contour. Le calcul des facteurs de formes devient alors (équation 2.15) :

$$F_{A \rightarrow B} = \frac{1}{2\pi S_i} \int_{C_A} \int_{C_B} \log r_{i,j} dC_i dC_j \quad (2.15)$$

Cette formule reposant sur une double intégrale de contour, elle permet de gagner en temps de calcul. C'est cette dernière qui a été retenue pour calculer les facteurs de forme dans le modèle de radiosité.

Afin de réduire le temps de calcul de la matrice des facteurs de forme, ces derniers ne sont calculés que pour les mailles visibles entre elles.

### 2.5.2.6 Calcul des sources solaires.

**Source d'éclairement direct.** La position du soleil est calculée à partir des coordonnées géographiques du lieu d'étude, de l'heure et de la date. A partir de ces données, sa position est déterminée grâce à un algorithme similaire à celui du logiciel *HELIOSTAT* [137]. La position du soleil est alors corrigée pour correspondre au barycentre de la maille de voûte céleste la plus proche. Cela permet d'utiliser la matrice des visibilitées entre les mailles composant la voûte céleste et celle composant la scène urbaine. On obtient alors directement l'ensemble des mailles exposées au rayonnement direct.

Il s'agit à présent de déterminer l'irradiance directe incidente sur chacune des mailles exposées. Dans un premier temps, on détermine l'irradiance directe incidente sur une surface horizontale ( $B_h$ ). Cette valeur est obtenue à partir de la position réelle du soleil et de la masse optique de l'air en utilisant les équations du modèles *ESRA* [120]. L'irradiance  $B_h$  ainsi obtenue est ensuite corrigée en fonction de l'orientation du soleil, permettant d'obtenir le rayonnement collecté par une surface orthogonale au rayonnement solaire, valeur notée  $B_o$ . Cette opération s'effectue en divisant la valeur  $B_h$  de l'irradiance sur une surface horizontale par le sinus de l'angle zénithal  $\zeta$  du soleil (équation 2.16). Notons que ce rayonnement est le rayonnement direct maximal théorique que l'on peut obtenir à date, heure et position géographique fixées.

$$B_o = \frac{B_h}{\sin \zeta} \quad (2.16)$$

On corrige ensuite une seconde fois en prenant l'orientation de chacune des mailles. Cela revient à multiplier le rayonnement  $B_o$  obtenu par le cosinus de l'angle entre la direction d'ensoleillement et la normale à la maille d'étude (équation 2.17). On note  $\beta$  l'angle entre la direction d'ensoleillement et la normale à la maille  $i$ . On note également  $E_B(i)$  le rayonnement direct incident sur la  $i^{\text{ème}}$  maille de la scène. Si l'orientation de la maille ne lui permet pas de recevoir du rayonnement direct, ce dernier est nul.

$$E_B(i) = \begin{cases} B_o \cos(\beta) & \text{si } \beta < \frac{\pi}{2}. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.17)$$

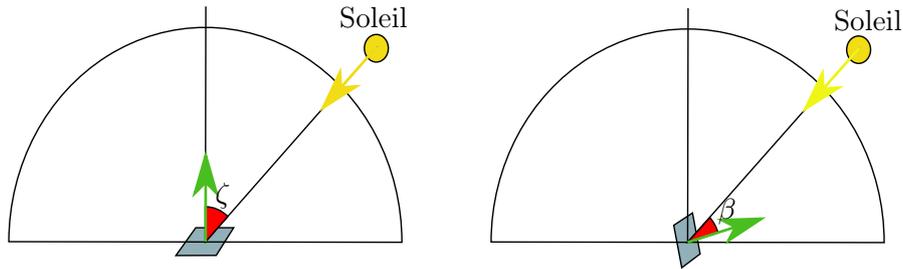


FIGURE 2.7 – Représentation schématique des angles  $\zeta$  et  $\beta$  évoqués dans le processus de correction du rayonnement direct.

**Source d'éclairage diffus.** La section 2.4.2 montre comment obtenir la luminance  $L_V$  émise par une maille de voûte céleste via les formules issues des travaux de Pérez. Il s'agit à présent d'intégrer ces luminances de mailles de voûte céleste dans le calcul du rayonnement diffus sur la scène urbaine.

A chaque nouveau pas de temps, il suffit donc de recalculer l'irradiance en chaque maille de ciel, noté  $B_D$ , fonction de l'intensité du rayonnement diffus sur une surface horizontale ( $D_h$ ) et de la position du soleil. Comme pour le direct, le rayonnement diffus sur une surface plane  $B_h$  est calculé par le modèle *ESRA* détaillé dans les travaux de Rigloier [120]. Les voûtes célestes diffuses suivantes sont alors obtenues (2.8).

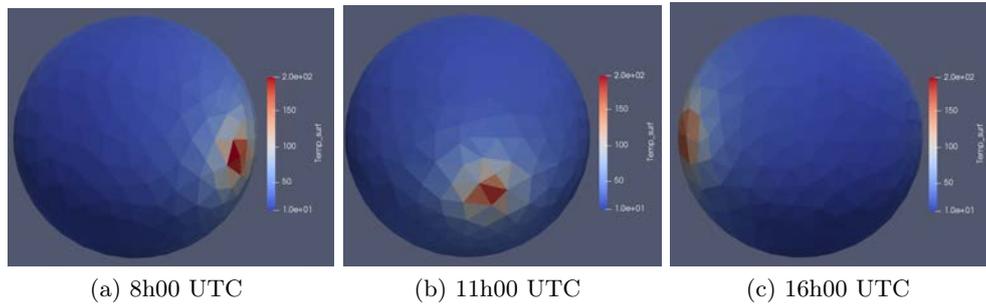


FIGURE 2.8 – Représentation de la répartition du rayonnement diffus ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) dans la voûte céleste pour la journée du 6 janvier 2018 au Bourget du Lac par une journée de ciel clair, depuis une vue supérieure. Le Nord est situé en haut, l'Est à droite.

La matrice des facteurs de forme  $F_{ciel}$  entre les mailles de ciel et les mailles de scène urbaine est calculée. Il s'agit d'une matrice rectangulaire (équation (2.18)) indépendante de la position du soleil, et donc de la date.

$$F_{ciel}(i, j) = f_{ciel}(i, j)_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n_{ciel}} \quad (2.18)$$

Par produit matriciel (équation 2.19), on peut alors obtenir l'irradiance diffuse

reçue par l'ensemble des mailles de la scène. Cette irradiance diffuse primaire est stockée dans le vecteur  $E_D$  qui servira comme matrice source pour le calcul des réflexions générées à partir du rayonnement diffus.

$$E_D = F_{ciel} B_D \quad (2.19)$$

### 2.5.2.7 Prise en compte des propriétés des matériaux.

Lors de la création de la scène, chaque surface est assimilé à un unique matériau. Plusieurs surfaces peuvent être assimilées à un même matériau. Une surface correspond à un polygone simple. Les propriétés des matériaux pour les CLO se déclinent en trois coefficients :

- Le coefficient de réflexion  $\rho$
- Le coefficient d'absorption  $\alpha \in [0, 1]$
- Le coefficient de transmission  $\tau \in [0, 1]$

Ces trois coefficients sont fonctions de la longueur d'onde  $\lambda$  et respectent la loi de conservation de l'énergie (équation 2.20).

$$\tau(\lambda) + \rho(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (2.20)$$

Les modèles développés laissent le choix de considérer ces paramètres comme indépendants de la longueur d'onde ou non.

### 2.5.2.8 Méthodes de calcul des radiosités.

La méthode des radiosités conduit à résoudre l'équation (2.11) vue précédemment dans la partie 2.5.2. Plusieurs méthodes existent pour résoudre numériquement cette équation [138]. La première méthode, intuitive, est celle de la radiosité classique. Elle consiste dans un premier temps à considérer l'ensemble des éléments composant la scène (souvent l'ensemble des mailles) comme des sources d'irradiance initiale  $E_i$ . On itère ensuite, chaque itération correspondant au calcul d'une réflexion. Cette méthodologie de résolution s'apparente à une résolution de type Gauss-Seidel forward. L'algorithme est alors celui décrit dans les travaux de Peyré [138].

Une autre méthode de résolution consiste à utiliser un algorithme de radiosité progressive. Cette méthode se distingue par le fait qu'on distribue l'énergie d'un élément vers les autres éléments et que l'on ne cherche plus à évaluer l'énergie incidente depuis

---

**Algorithm 2** Calcul de la radiosité : méthode itérative

---

```
 $J = E$   
while L'erreur est supérieure à la précision souhaitée do  
  for  $i$  allant de 1 à  $n$  le nombre de mailles de la scène d'étude do  
     $J_i = E_i + \rho_i F(i, :) J$   
  end for  
end while
```

---

les autres éléments. L'algorithme, nommé *algorithme de Southwell*, est disponible page 22 dans les travaux de Gabriel Peyré [138].

Finalement, l'utilisation de *Matlab*<sup>®</sup> permet une résolution directe du système. En effet, dans l'équation 2.11, il est possible d'inverser la matrice  $Id - \rho F$  afin d'obtenir directement la radiosité  $J$  (équation 2.21).

$$J = (Id - \rho F)^{-1} E \quad (2.21)$$

On choisit de résoudre indépendamment la radiosité pour le rayonnement diffus, et pour le rayonnement direct. Cela permet d'évaluer la part des contributions des réflexions pour chacune des sources. Les résultats seront présentés section 2.6.2.

### 2.5.3 Le lancer de rayons.

Le principe des méthodes dites de lancer de rayons est de reconstituer le chemin des rayons, en partant soit de la source (*forward*), soit en remontant leur chemin à partir de la zone d'étude (*backward*). Ces méthodes reposent sur un tirage aléatoire des positions initiales. Chaque rayon est indépendant. Mathématiquement, dans notre cas cela se traduit par l'estimation statistique des irradiances en chaque point de la scène d'étude. Dans cette thèse, la méthode de lancer de rayons est intégrée numériquement par l'utilisation de la méthode de Monte Carlo. Cette technique est couramment utilisée car elle permet de traiter facilement les chemins lumineux complexes, et en particulier les inter-réflexions [139].

Les méthodes dites *backward*, qui consistent à remonter le chemin des rayons depuis le point ou la surface d'intérêt, présentent le désavantage de devoir identifier au préalable la surface sur laquelle on souhaite évaluer l'éclairement ou le potentiel solaire. C'est notamment cette méthode qui est utilisée en jeux vidéo, où la surface d'intérêt correspond à la position de la caméra. Dans notre cas, une méthode *forward* sera privilégiée. Elle sera cependant restreinte à la simulation du rayonnement direct par méthode de lancer de rayons.

La principale difficulté dans cette étude concernant le lancer de rayons est qu'il s'agit de simuler une cartographie des irradiances. Habituellement ces techniques sont

utilisées pour une position de caméra (observateur) donnée. On utilise alors une méthode *backward*. La caméra est alors assimilée à un écran dont il s'agit de déterminer la couleur de chaque pixel dans une base *RGB*. Une stratégie possible consiste alors à générer un rayon à travers chaque pixel et de remonter son chemin. A chaque intersection avec un objet de la scène, on évalue si il est éclairé et la couleur qu'il génère. La couleur finale assimilée au pixel correspond alors à une pondération des résultats obtenus à chaque objet rencontré [140]. Cette stratégie de simulation d'images permet également d'accélérer le temps de calcul en gérant des problèmes d'inter-visibilité par des stratégies comme celle du *Z-buffer*.

### 2.5.3.1 Construction du code.

**Maillage de la scène urbaine.** L'état de l'art a montré que les méthodes en lancer de rayons utilisaient généralement des maillages basés sur des constructions en arborescence. Ces structures n'ont qu'un seul objectif qui est de réduire le temps de calcul consacré à la recherche des intersections [141]. En 2008, l'état de l'art réalisé dans les travaux de Cadet présentait deux méthodes majoritairement utilisées : le *kdTree* et l'arbre *BVH* (*Boundary Volume Hierarchie*).

Une possibilité est la construction de maillages volumiques, dit en octrees [142]. Ces méthodes de maillages impliquent de discrétiser la scène en volumes et non en éléments de surface. Un volume est alors plein ou vide. Les volumes élémentaires sont de tailles diverses, permettant de définir la scène urbaine avec un nombre minimal d'éléments. Tant que le niveau de détail, qui correspond à la résolution du résultat final, n'est pas atteint, seuls les octrees ne contenant pas un unique matériau, autrement dit situés à l'interface des bâtiments, sont raffinés (Voir Section 2.9). Lorsqu'un volume est raffiné, il est divisé en utilisant 3 plans médians orthogonaux entre eux, ce qui conduit à la subdivision du volume en 8 sous éléments. Idéalement les plans séparateurs sont situés au niveau des façades des bâtiments, mais afin de limiter le nombre de volumes traversés par un rayon, l'emplacement des plans séparateurs reste un problème en soi.

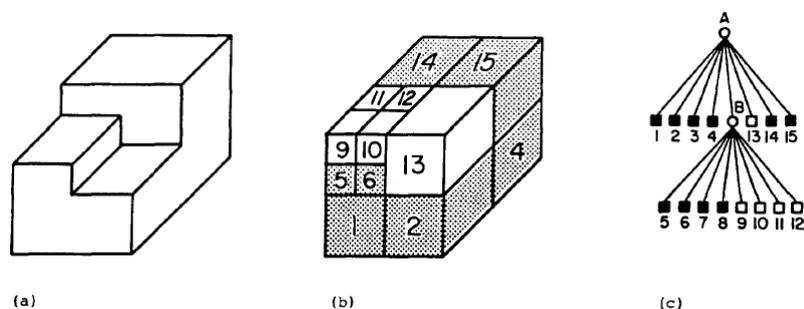


FIGURE 2.9 – Exemple d'un maillage en octrees. L'image de gauche représente la scène à mailler, celle du milieu le maillage volumique utilisé, et l'image de droite l'arborescence qui en découle [142].

Dans le cadre de la thèse, afin d'identifier rapidement les intersections sur une scène maillée finement (mailles d'une surface de l'ordre du  $m^2$ ), une autre stratégie de maillage a été mise en place pour s'affranchir de la contrainte d'utilisation des octrees. Il est en effet constaté par des études en imagerie de synthèse que l'identification des intersections représentait 90% du temps de calcul [143]. Cette méthode est toutefois directement inspirée de celle utilisée pour les maillages en octrees, et plus généralement des stratégies consistant à regrouper les mailles en "groupes" [141]. Elle a également permis de rendre raisonnable le calcul d'enseillement en lancer de rayons par l'utilisation de *Matlab* raisonnable. A l'image de celle pour la radiosité, elle repose sur l'utilisation d'un maillage grossier, raffiné par la suite. L'idée est donc de mailler grossièrement la scène (figure 2.10, avec un maillage noté  $M_1$ , que l'on raffine progressivement jusqu'à obtenir la résolution souhaitée sur l'ensemble de la scène. Son fonctionnement simplifié est détaillé dans l'algorithme (3). Chaque maille raffinée est subdivisée en 4 mailles de tailles identiques entre elles.

---

**Algorithm 3** Maillage de la scène : lancer de rayons

---

```

Définir un maillage grossier initial  $M_1$ 
Identifier son nombre de mailles  $N_1$ 
Définir une résolution  $\epsilon$  souhaitée (taille de maille maximale)
Initialiser  $i = 1$ 
while Il existe une maille de surface supérieur à  $\epsilon$  do
  Identifier  $N_S$  le nombre de mailles de surface trop importante
  Créer le maillage  $M_{i+1}$  de taille  $N_i + N_S$ 
  Subdiviser en 4 mailles les mailles de surface supérieure  $\epsilon$  et les stocker dans  $M_{i+1}$ 
   $i = i + 1$ 
end while

```

---

L'algorithme (3) est construit de sorte à ne pas raffiner toute la scène aveuglément mais de ne raffiner que les mailles de taille trop importante.

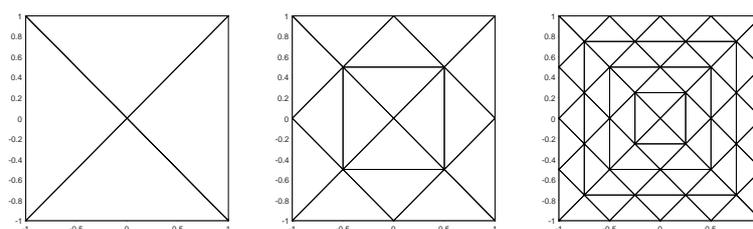


FIGURE 2.10 – Le maillage initiale  $M_1$  (à gauche) est raffiné en  $M_2$  (au centre) puis  $M_3$  (à droite).

Lorsqu'un nouveau niveau de maillage est défini, les informations du maillage précédent sont enrichies des numéros des mailles filles générées. Cela permet de construire une arborescence entre les maillages (figure 2.11). L'idée sous-jacente est d'identifier les

intersections entre les rayons et la scène sur le maillage de niveau 1, puis de ne parcourir que les mailles filles qui sont celles potentiellement intersectées.

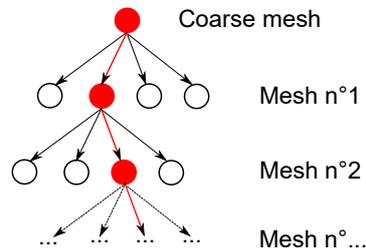


FIGURE 2.11 – Construction d'une structure en arborescence qui permet une identification rapide de la maille intersectée à chaque réflexion.

**Prise en compte du ciel.** Contrairement à la radiosité, seul le rayonnement direct est ici considéré. Cette contrainte découle directement de problèmes de temps de calcul. Il est théoriquement possible de considérer le diffus selon le même schéma algorithmique que celui utilisé pour le direct. Il faudrait alors considérer chaque maille de voûte céleste comme une source. L'utilisation simple de la voûte céleste telle que présentée dans le modèle par radiosité ne serait pas possible. Il serait toutefois possible de considérer un ciel pour chaque direction d'ensoleillement, correspondant à la normale de chaque maille. Mais cela imposerait de considérer un grand nombre de sources avec une méthodologie par itération sur chacune de ces sources. Les temps de calculs seraient alors considérables, et des problèmes de stockage mémoire apparaîtraient probablement. La prise en compte du rayonnement diffus semble plus aisée en procédant par une méthode de lancer de rayons "backward". Il s'agirait alors de sélectionner la zone précise sur laquelle on souhaite évaluer l'ensoleillement, puis de remonter aux ensoleillements diffus par identification de chemins inverses des rayons. Cela présente l'inconvénient de devoir identifier dès le départ la zone précise (une ou quelques mailles voisines et présentant de préférence la même orientation) sur laquelle on souhaite évaluer l'irradiance incidente. Cela peut être fait en particulier si l'on s'intéresse à l'implantation d'un module photovoltaïque dans une zone précise.

Deux stratégies de modélisation du ciel ont été considérées durant cette thèse. Dans un premier temps, le ciel a été considérée comme une surface plane projetée dans la direction opposée au rayonnement solaire. Cette stratégie présentait l'avantage d'être simple à implémenter. Mais elle ne permettait pas d'assurer un ensoleillement global de la scène, notamment à cause de la topographie 3D de la scène. Il a alors finalement été choisi d'enfermer la scène dans un volume. La surface du bas correspond au sol, les faces latérales et celle du dessus correspondent au ciel. En fonction de la position du soleil, de 1 à 3 de ces faces sont ensoleillées (figure 2.12). Ces dernières sont les faces *sources*, et les rayons seront générés à partir de ces faces.

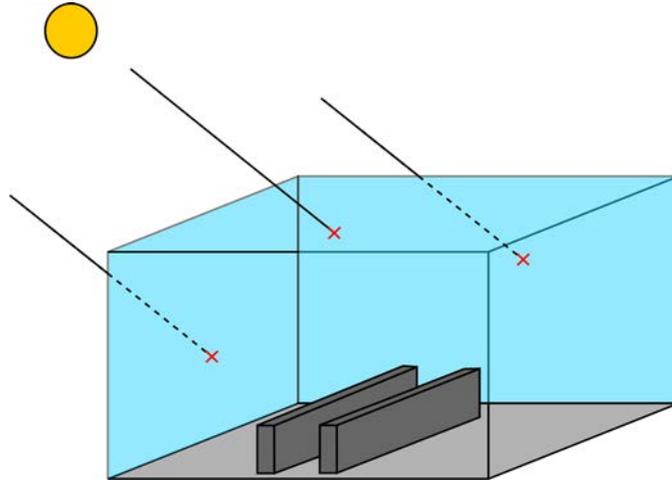


FIGURE 2.12 – Schéma de la méthodologie de prise en compte du ciel dans le cas de l'algorithme par lancer de rayons.

**Parcours des rayons.** Chaque rayon est identifié par les coordonnées de sa position initiale. Seul le rayonnement direct étant considéré, l'ensemble des rayons est "lancé" dans la même direction. Le calcul de l'irradiance perçue par la scène se fait en deux passes.

Les coordonnées initiales de chaque rayon sont générées au choix en utilisant une suite de Halton ou une loi uniforme. Dans le cas d'une génération des positions initiales par une méthode de Halton, on parle alors de méthode de *quasi Monte Carlo*. Cette suite est connue pour sa discrèpance faible : le tirage aléatoire des positions initiales des rayons est forcé de sorte à assurer l'homogénéisation dans la répartition des positions initiales des rayons. Cela se résume par la propriété présentée Equation 2.22, qui définit la discrèpance  $K$ . Soit  $\kappa$  un sous espace de l'ensemble  $\Psi$  sur lequel sont générés les rayons. Soit  $\#\kappa$  le nombre de rayons générés dans le sous espace  $\kappa$  et  $\lambda_s(\kappa)$  la mesure de Lebesgue de  $\kappa$  (qui s'apparente ici à la surface du sous ensemble  $\kappa$ ).

$$K = \sup_{\kappa \in \Psi} \left| \frac{\#\kappa}{N} - \lambda_s(\kappa) \right| \quad (2.22)$$

Ramenée dans le cadre de notre étude, cette propriété présentée Equation 2.22 montre qu'une suite de Halton force à générer, par sous espace  $Q$  de ciel, un nombre de rayons proportionnel au ratio de la surface de ce sous espace par rapport à la surface totale de ciel. Cela permet notamment de limiter les effets de crénelages observés avec un tirage initial basé sur une loi uniforme. Ces stratégies, avec les suites de Sobol ou de Faure, permettent de ramener la convergence de la méthode de Monte-Carlo, qui est en  $O(1/\sqrt{n})$ , en une convergence en  $O(\ln(n)^2/n)$ . Cependant, l'utilisation d'une

initialisation par une loi de Halton augmentant le temps de calcul, une loi uniforme est finalement utilisée.

Pour chaque rayon, la première passe ne sert uniquement qu'à déterminer les coordonnées et les mailles sur lesquels des réflexions sont identifiées. Le calcul des coordonnées d'intersection se fait à partir des coordonnées des sommets de chaque triangle et en utilisant l'algorithme de Rölleer and Trumbore [135]. L'ensemble du parcours du rayon est ainsi calculé, jusqu'à la perte du rayon ou son extinction. La perte d'un rayon s'apparente à une sortie de la scène de ce dernier. Autrement dit, après le parcours de l'ensemble des mailles, aucune intersection n'a été identifiée. Dans le cas de la détection d'intersections successives, l'extinction d'un rayon correspond à l'atteinte du nombre maximal de réflexions autorisées.

La seconde passe permet l'identification des mailles sur lesquelles l'évaluation de l'irradiance reçue est souhaitée. Pour chaque intersection identifiée, l'arborescence des maillages est parcourue, permettant de déterminer le numéro de maille intersectée sur le maillage souhaité.

Les méthodes de lancer de rayons basées sur des méthodes de Monte-Carlo sont particulièrement bien adaptées à l'utilisation de calculs parallèles dans la mesure où chaque rayon est strictement indépendant. C'est notamment l'une des raisons qui a rendu ces méthodes populaires avec l'augmentation des capacités de calcul [93].

### 2.5.3.2 Calculs énergétiques.

**Initialisation des rayons.** Comme indiqué précédemment, seul le rayonnement direct est calculé par la méthode de lancer de rayons et les positions initiales des rayons sont réparties sur les différentes surfaces ensoleillées du volume encapsulant la scène. A chaque rayon est également affectée une énergie initiale, fonction du nombre de rayons lancés. Chaque rayon transporte initialement la même énergie  $e$ , indépendante de sa position initiale et à déterminer. Le nombre de rayons à générer par face "source" est également à déterminer.

Soit  $E_{B,i}$  l'irradiance directe incidente sur la face  $i$ ,  $n_i$  le nombre de rayons générés sur la face  $i$ , et  $S_{f,i}$  sa surface.  $e$  est l'énergie transportée par un rayon et  $n$  est le nombre total de rayons générés. On a alors le système d'équation (équation 2.23).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_{B,1} * S_{f,1}}{n_1} = e \\ \frac{E_{B,2} * S_{f,2}}{n_2} = e \\ \frac{E_{B,3} * S_{f,3}}{n_3} = e \\ \frac{E_{B,4} * S_{f,4}}{n_4} = e \\ \frac{E_{B,5} * S_{f,5}}{n_5} = e \\ n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 = n \end{array} \right. \quad (2.23)$$

$e$  est calculé facilement (équation 2.24), permettant d'obtenir facilement le nombre de rayons générés sur chaque face.

$$e = \frac{\sum_{i=1}^5 E_{B,i} S_{f,i}}{n} \quad (2.24)$$

Afin de s'assurer un nombre entier de rayons, le nombre de rayons par face est arrondi à l'entier le plus proche.

**Condition d'arrêt du parcours des rayons** Il est commun de prédéfinir un nombre maximum de réflexions. L'arrêt du parcours du rayon s'effectue alors une fois que le nombre maximum de réflexions autorisé est atteint, où lorsque que ce dernier repart de la scène sans intersecter aucune surface. C'est cette méthode qui a été utilisée dans la suite de l'étude. Une autre méthode classique peut consister à interrompre le parcours d'un rayon lorsque ce dernier ne transporte plus suffisamment d'énergie.

Toutefois, une autre approche permettant de ne pas prédéfinir le nombre de rayons à générer et ainsi visant à limiter le temps de calcul, a été étudiée. Elle ne s'est malheureusement pas imposée en raison de sa complexité. Ces critères d'arrêts sont ceux détaillés dans l'article proposé à IBPSA (*International Building Performance Simulation Association*) [144]. Cette méthode repose sur l'utilisation de deux critères d'arrêt, mesurant à la fois la variation d'énergie à une échelle locale et une échelle globale sur la scène d'étude. L'algorithme de lancer de rayons s'arrête si les deux critères suivant sont atteints :

- L'énergie transportée par un rayon devient inférieure à un pourcentage  $\epsilon_{glob}$  de l'énergie totale incidente sur la scène.
- En moyenne, la variation de l'énergie reçue par une maille devient inférieure à un pourcentage  $\epsilon_{loc}$  de l'énergie déjà reçue localement.

Toutefois, un nombre maximum de rayons est défini, afin de limiter le temps de calcul si le critère de convergence locale ne parvient pas à être atteint en temps raisonnable. Par ailleurs, l'utilisation de ces deux critères d'arrêt amène à une condition sur le nombre minimum de rayons à générer.

*Critère de convergence global.*

En reprenant les notations précédentes, le critère de convergence global s'écrit de la façon suivante (équation 2.25) :

$$e = \frac{1}{n} E_B \quad (2.25)$$

On peut alors en déduire une première condition sur le nombre de rayons  $n$  à générer (équation (2.26)) :

$$\frac{e}{E_B} \leq \epsilon_{glob} \iff n \geq \frac{1}{\epsilon_{glob}} \quad (2.26)$$

*Critère de convergence local.*

Soit  $I$  l'irradiance reçue par les mailles composant la scène urbaine. Localement, le critère de convergence se traduit par l'équation 2.27.

$$\frac{\Delta I}{I} \leq \epsilon_{loc} \quad (2.27)$$

Soit  $n_{r,i}$  le nombre de rayons reçus par la maille  $i$ . Ce critère se transforme en la condition suivante sur le nombre de rayons par maille nécessaires (Équation 2.28) :

$$n_{r,i} \geq \frac{1}{\epsilon_{loc}} \quad (2.28)$$

Ainsi, soit  $N$  le nombre de mailles du maillage et  $n_{r,mean}$  le nombre moyen de rayons reçus par chaque maille. En utilisant la loi des grands nombres, et en supposant que l'ensemble des mailles présente la même exposition au soleil, on obtient alors la condition suivante (Équation 2.29) :

$$\begin{aligned} n &= n_{mean} N \\ \iff N_r &\geq \frac{N}{\epsilon_{loc}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Le critère final portant sur le nombre minimum de rayons à générer est alors (Équation 2.30) :

$$n \geq \max \left( \frac{1}{\epsilon_{glob}}, \frac{N}{\epsilon_{loc}} \right) \quad (2.30)$$

Or, en pratique et par soucis de temps de calcul, l'hypothèse sous laquelle est utilisée la loi des grands nombre est peu souvent vérifiée. La condition d'arrêt locale n'est alors généralement pas vérifiée, conduisant le code à s'arrêter lorsque le critère de secours limitant le nombre de rayons est atteint. Pour cette raison, ces conditions d'arrêt n'ont finalement plus été utilisées dans la suite de la thèse, le nombre de rayons lancés étant alors prédéfini au début du calcul.

**Crénelage et méthodes d'anti-crénelage.** Le crénelage (aliasing en anglais) correspond au bruit statistique généré par la méthode de lancer de rayon, et plus précisément par l'utilisation d'une loi uniforme dans la façon de générer les positions initiales. Plusieurs méthodes permettent de réduire ce bruit. Par manque de temps, elles n'ont pas été implémentées au cours de la thèse. Des informations sont disponibles dans les travaux menés par l'INRIA [140]. Plus globalement, les stratégies d'anti-aliasing sont encore un sujet de recherche en soi [145].

### 2.5.3.3 Modèles de réflexion.

Les méthodes de lancer de rayons permettent de prendre en compte différents modes de réflexions. En fonction de la visée du code, les modèles de réflexion utilisés sont plus ou moins réalistes. Le plus connu reste le modèle de Phong [146, 147, 148]. Ce modèle de réflexion est basé sur l'observation qu'un maximum d'énergie est réfléchi dans la direction de réflexion spéculaire. Il s'agit d'un modèle reposant sur l'optique géométrique qui se compose d'une addition de trois termes : le terme d'ambiance, le terme diffus, et le terme spéculaire. Le terme d'ambiance correspond aux réflexions uniformes associées à une lumière d'ambiance. Les termes diffus et spéculaires sont associés à des sources lumineuses ponctuelles. Un vecteur  $\vec{h}$ , appelé vecteur bissecteur de Rusinkiewicz [149], permet d'évaluer l'angle d'écart entre la direction du rayon réfléchi et la direction de réflexion spéculaire. Plus cet angle est important, moins la quantité d'énergie réfléchie est importante.

D'autres modèles de réflexion existent. Le modèle de Cook-Torance est également un modèle largement utilisé [149] permettant de reconstruire la réflexion sur un objet à partir de la reconstitution des interactions d'un rayon sur une surface composée de micro-facettes. Ce modèle est présenté comme étant plus général que les modèles précédents [150]. D'autres modèles existent mais ne sont pas détaillés ici.

Ces modèles sont en particulier utilisés dans la génération d'images de synthèse, en temps réel ou non. Certaines hypothèses simplificatrices sont donc effectuées, au détriment des lois optiques issues de la physique mais permettant de gagner en temps de calcul. Dans un premier temps, et dans le cadre de ces travaux de thèses, deux modèles de réflexion ont été développés. Les réflexions spéculaires et les réflexions diffuses.

**Modélisation des réflexions spéculaires.** Intuitivement, ce genre de modèle permet de générer des réflexions spéculaires par l'utilisation de la géométrie optique dans les modèles. Ainsi, à partir de la direction du rayon incident, il est facile d'obtenir la direction du rayon réfléchi par symétrie.

Soit  $\vec{r}_i$  le vecteur unitaire représentant la direction du rayon incident, soit  $\vec{n}$  la normale à la surface intersectée, et soit  $\vec{r}_s$  le vecteur associé au rayon réfléchi. Soit  $\theta$  l'angle de rotation et  $\vec{a}$  l'axe de rotation permettant d'obtenir  $\vec{r}_s$  à partir de  $\vec{r}_i$ .  $\theta$  et  $\vec{a}$  sont obtenus à partir des formules indiquées Equation 2.31.

$$\begin{cases} \theta = \pi - 2 \arccos(\vec{r}_i \cdot \vec{n}) \\ \vec{a} = \frac{\vec{r}_i \wedge \vec{n}}{\|\vec{r}_i \wedge \vec{n}\|} \end{cases} \quad (2.31)$$

On peut alors calculer la matrice de rotation  $R$  puis le vecteur associé au rayon réfléchi  $\vec{r}_s$  (équation 2.32). La figure 2.13 met en image la réflexion du rayon  $\vec{r}_s$  (en bleu) issu d'une réflexion spéculaire du rayon  $\vec{r}_i$  (en rouge). L'axe  $\vec{a}$  de rotation est également apparent (en vert).

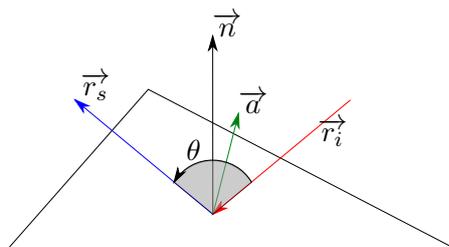


FIGURE 2.13 – Illustration du rayon réfléchi par rapport au rayon incident.

$$\vec{r}_s = R \cdot \vec{r}_i \quad (2.32)$$

Il existe le cas particulier où le rayon incident est co-linéaire à la normale de la maille intersectée. Auquel cas, le rayon réfléchi repart simplement en direction opposée.

**Modélisation des réflexions lambertiennes.** Pour ce modèle de réflexion il est nécessaire de procéder à un échantillonnage par importance (*importance sampling* en anglais). En effet, il s'agit de générer autant de rayons dans toutes les directions du demi-espace de réflexion. Un échantillonnage uniforme générerait un excès de rayon dans la direction de la normale.

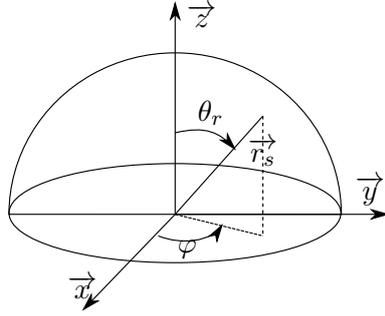


FIGURE 2.14 – Illustration des angles  $\theta_r$  et  $\varphi$  utilisés pour déterminer la direction du rayon réfléchi.

On part alors d'une densité de flux : soit  $\varphi$  l'angle dans le plan  $(O, \vec{x}, \vec{y})$ , et  $\theta_r$  l'angle défini par l'angle entre l'axe  $\vec{z}$  et le rayon réfléchi  $\vec{r}_s$ . On commence par calculer la densité de flux réfléchie  $Q$  comme la somme des flux surfaciques réfléchis, avec  $L(\theta_r, \varphi)$  la luminance réfléchie pour les angles  $\theta_r$  et  $\phi$ .

$$\begin{aligned} Q(\vec{r}_s) &= \int_0^{2\pi} L(\theta_r, \varphi) \cos(\theta_r) d\omega \\ &= \int_0^{2\pi} L(\theta_r, \varphi) \cos(\theta_r) \sin(\theta_r) d\theta_r d\varphi \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dans le cas d'un tirage de Monte-Carlo, on ré-écrit l'équation précédente (équation 2.33) de la façon suivante (équation 2.34).

$$Q(\vec{r}_s) = \int_0^{2\pi} p(\varphi) \int_0^{\pi/2} p(\theta_r) \frac{L(\theta_r, \varphi) \cos(\theta_r) \sin(\theta_r)}{p(\varphi)p(\theta_r)} d\theta_r d\varphi \quad (2.34)$$

Si on effectue le choix d'échantillonner uniformément sur l'angle  $\varphi$ , on a alors l'équation 2.35.

$$Q(\vec{r}_s) = \int_0^{2\pi} p(\varphi) \int_0^{\pi/2} p(\theta_r) \frac{2\pi L(\theta_r, \varphi) \cos(\theta_r) \sin(\theta_r)}{p(\theta_r)} d\theta_r d\varphi \quad (2.35)$$

On souhaite du coup faire disparaître  $\cos(\theta_r) \sin(\theta_r)$  en posant :

$$p(\theta_r) = a \cos(\theta_r) \sin(\theta_r) \text{ tel que } \int_0^{\pi/2} p(\theta_r) d\theta_r = 1. \quad (2.36)$$

On obtient alors  $p(\theta_r) = 2 \cos(\theta_r) \sin(\theta_r)$ , soit  $a = 2$ .

On parvient ainsi à l'équation 2.37.

$$\begin{aligned} Q(\vec{r}_s^\lambda) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} p(\varphi)p(\theta_r) [\pi L(\theta_r, \varphi)] d\theta_r d\varphi \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \pi L(\theta_r, \varphi) \end{aligned} \quad (2.37)$$

L'échantillonnage souhaité s'écrit alors tel que détaillé Equation 2.38, où  $R_1$  et  $R_2$  sont deux nombres aléatoirement générés entre 0 et 1 selon une loi uniforme. Ces résultats correspondent à ceux avancés dans la thèse de Lu Heqi [151].

$$\begin{cases} \varphi = R_1 2\pi \\ R_2 = \int_0^{\theta_r} 2 \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r = \sin(\theta_r)^2 \Rightarrow \theta_r = \arcsin(\sqrt{R_2}) \end{cases} \quad (2.38)$$

Numériquement, et pour une réflexion, on obtient alors la répartition des rayons présentée figure 2.15. La figure de droite permet de valider la distribution générée.

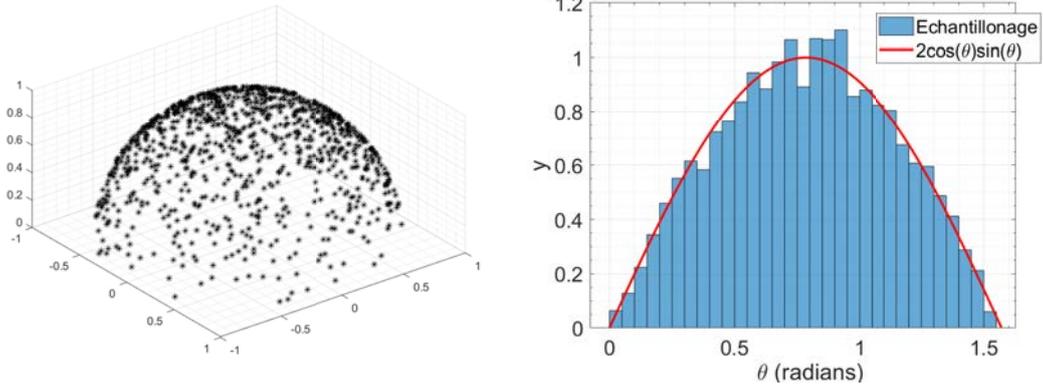


FIGURE 2.15 – Répartition des rayons obtenus numériquement lors d'une réflexion test. La figure de droite permet de comparer la distribution obtenue après tirage de 5000 rayons avec la distribution théorique, en fonction de l'angle  $\theta_r$ .

#### 2.5.3.4 Validation de code.

Lehl décrit dans sa thèse [139] la théorie mathématique permettant d'obtenir la vitesse de convergence de la méthode de Monte-Carlo. L'essentiel, à savoir l'influence du nombre de rayons sur l'erreur, sera rappelé ici. Dans ce paragraphe, par simplification, les notations peuvent varier de celles indiquées dans la nomenclature.

Soit  $M$  le maillage d'une scène plane comportant  $N$  mailles. Soit  $\Omega_c$  le domaine, en

deux dimensions, du ciel et  $\Omega_s$  celui de la scène d'étude. On note  $e$  l'énergie transportée par un rayon. Soit  $x_j$  la position initiale du rayon  $j$ , et  $y_j = f(x_j)$  sa position finale après parcours sur la scène d'étude. L'utilisation d'une scène plane simplifie le chemin parcouru par chaque rayon, qui s'assimile à une simple projection de la position initiale. Soit  $I_j$  l'irradiance reçue par la maille  $j$ . On note également  $n_{r,j}$  le nombre de rayons incidents sur la maille  $j$  et  $\Omega_j$  son domaine. L'énergie reçue par la maille  $j$  est donc simplement donnée par la relation suivante (équation 2.39).

$$I_j = n_{r,j} \times e \quad (2.39)$$

Le nombre  $n_{r,j}$  de rayons incidents sur la maille  $j$  doit alors être estimé. Soit  $g_j$  une fonction définie sur  $\Omega_s$  telle quel (équation 2.40) :

$$g_j(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \Omega_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.40)$$

$g_j$  est une fonction de  $L^2(\Omega_s)$  (c'est à dire que  $\int_{\Omega_s} g_j^2(x)dx$  existe). On peut alors estimer  $n_{r,j}$  par l'équation suivante (équation 2.41).

$$n_j = \int_{\Omega_s} g_j(x)dx \quad (2.41)$$

Soit l'hypothèse ou un seul rayon  $\vec{r}$  de position initiale aléatoire sur  $\Omega_c$  serait généré. Soit  $p = f(\vec{r})$  le point d'intersection du rayon  $\vec{r}$  avec la scène. Comme indiqué par Lehl dans ses travaux, on peut alors proposer un estimateur primaire du nombre de rayons incidents sur la maille  $j$  (2.42).

$$\langle n_{r,j} \rangle_{prim} = g_j(p) = g_j(f(\vec{r})) \quad (2.42)$$

Cet estimateur est non biaisé car l'espérance de cet estimateur est alors égale à  $n_j$ , qui correspond à la proportion de la surface  $S_j$  de la maille  $j$  par rapport à la surface totale de la scène  $S$ . Espérance et variance sont détaillés ci-dessous (équation 2.43).

$$\begin{aligned} E(\langle n_{r,j} \rangle_{prim}) &= \int_{\Omega_s} g_j(x)dx = n_{r,j} \\ V(\langle n_{r,j} \rangle_{prim}) &= \int_{\Omega} (g_j(x) - n_{r,j})^2 = \int_{\Omega} g_j(x)^2 dx - n_{r,j}^2 \end{aligned} \quad (2.43)$$

Dans la pratique, il faut générer un nombre de rayons suffisant pour réduire la variance. Soit  $N$  rayons indépendants les uns des autres. On estime alors le nombre de rayons reçus par la maille  $j$  par ce second estimateur (équation 2.44).

$$\langle n_{r,j} \rangle_{sec} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_j(p_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_j(f(\vec{r}_i)) \quad (2.44)$$

Ce second estimateur est également non biaisé (équation 2.45).

$$\begin{aligned} E(\langle n_{r,j} \rangle_{sec}) &= \frac{1}{N} \int_{\Omega_s} N g_j(x) dx = n_{r,j} \\ V(\langle n_{r,j} \rangle_{sec}) &= \frac{1}{N} \int_{\Omega} (g_j(x) - n_{r,j})^2 \\ &= \frac{V(\langle n_{r,j} \rangle_{prim})}{N} \end{aligned} \quad (2.45)$$

La variance diminue donc proportionnellement à  $\frac{1}{N}$ , et donc l'erreur standard à  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ .

Pour vérifier que l'erreur standard diminue selon la même loi dans notre modèle, on simule un ensoleillement sur une scène plate de  $4\text{m}^2$ . Le soleil est supposé à la verticale de la scène, et on suppose que l'irradiance est de  $1\text{Wm}^{-2}$ . On évalue l'évolution de la variance pour différents maillages détaillés dans le tableau 2.2. On observe figure 2.16 que la variance décroît linéairement en  $\frac{1}{N}$ , où  $N$  est le nombre de rayons. Cela valide la génération aléatoire des rayons. Par ailleurs, l'identification des intersections sur la scène d'étude se fait correctement.

Numéro de maillage	Nombre de maille	Surface des mailles
1	4	$1\text{m}^2$
2	16	$0.25\text{m}^2$
3	64	$6.25 * 10^{-2}\text{m}^2$
4	256	$1.6 * 10^{-2}\text{m}^2$
5	1024	$3.9 * 10^{-3}\text{m}^2$
6	4096	$1 * 10^{-3}\text{m}^2$

TABLE 2.2 – Différents maillages sur lesquels est testée l'évolution de la variance.

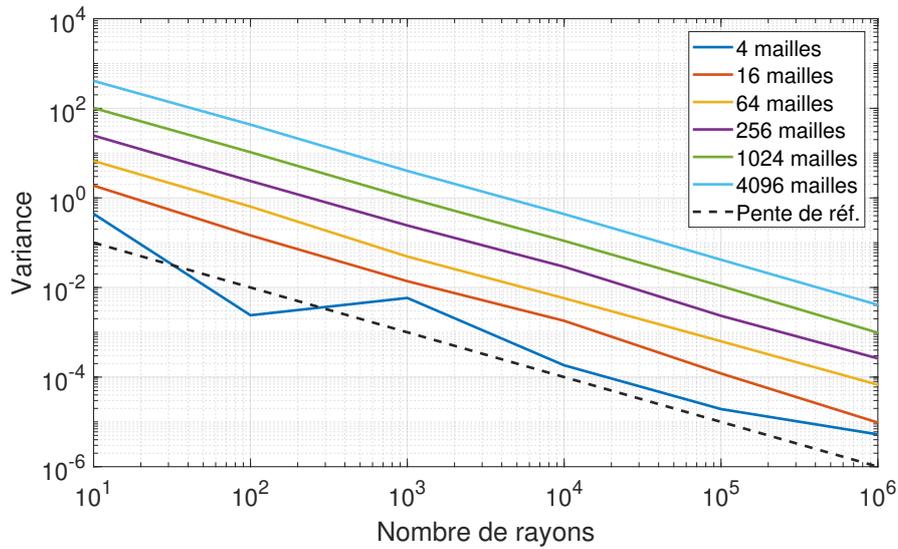


FIGURE 2.16 – Variation de la variance en fonction du nombre de rayons

Ces résultats donnent une indication sur le nombre de rayons à générer en fonction de la précision du résultat souhaité.

## 2.6 Résultats intermédiaires.

### 2.6.1 Cas d'étude.

#### 2.6.1.1 Entrées du modèle.

Les simulations ont été effectuées pour une scène urbaines localisée au niveau du Bourget du Lac (73).

L'ensoleillement fourni en entrée du modèle correspond à l'ensoleillement théorique par jour clair (que l'on assimile subjectivement à des conditions *CIE Standard Clear Sky* [125]). La figure 2.17 permet de visualiser les irradiances simulées pour cette journée avec une condition de ciel clair (TLAM2 = 3).

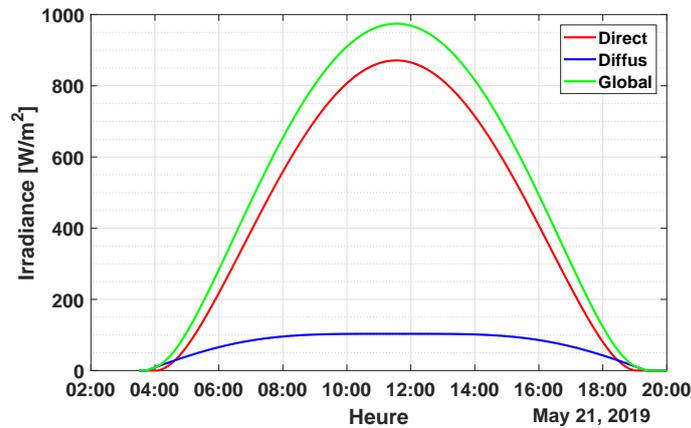


FIGURE 2.17 – Irradiances théoriques horizontales [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] calculées pour la journée du 21 Juin 2019.

### 2.6.1.2 Scène d'étude.

L'étude s'est focalisée sur le cas d'un "canyon urbain", appelé également "rue canyon" (figure 2.18). Cette géométrie permet une compréhension simple des trajectoires géométriques des rayons. Il est alors facile de directement mesurer l'impact des réflexions sur le bâtiment en vis à vis, en s'affranchissant d'apports indésirables.

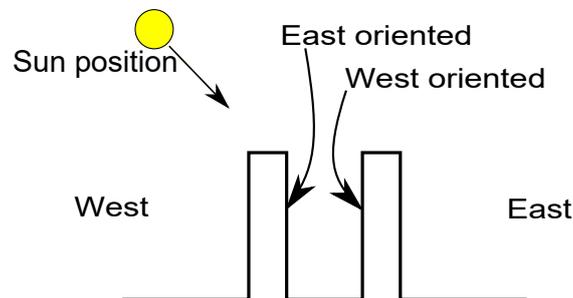


FIGURE 2.18 – Vue en coupe de la scène d'étude

La maquette est orientée selon un axe nord sud. En s'inspirant des observations réalisées par Patriarche [10], deux rapports d'aspect  $H/W$  ont été testés. L'analyse de ce ratio dans les rues canyon de Lyon aux alentours de la presqu'île a montré que ces derniers sont majoritairement compris entre 1 et 3 (figure 2.20). Des rapports  $H/W$  de 1 et de 2 sont donc retenus dans cette thèse.



FIGURE 2.19 – Caractérisation du tissu urbain Lyonnais, extrait des travaux de Patriarche [10].



FIGURE 2.20 – Etude du rapport d'aspect des rues de Lyon réalisée à partir de l'analyse de la figure précédente (figure 2.19), extrait des travaux de Patriarche [10].

Le canyon est orienté selon un axe Nord-Sud, favorisant tour à tour l'ensoleillement sur les façades des bâtiments orientées est et ouest.

### 2.6.1.3 Propriétés optiques des surfaces.

Dans un premier temps, les surfaces ne sont définies uniquement que par leur coefficient de réflexion, noté  $\rho$ , d'absorption, noté  $\alpha$ , et de transmission  $\tau$ . On ne s'intéresse pas à la lumière transmise, mais uniquement à l'irradiance sur les surfaces extérieures de la scène, et en particulier sur les façades situées à l'intérieur du canyon.

A partir des mesures spectrales réalisées (Section 3.2), on fixe les coefficients aux valeurs définies dans le tableau 2.3. Ces valeurs seront croisées à celles référencées sur le site *EnergiePlus*, ainsi que les mesures réalisées Chapitre 3 afin de vérifier leur cohérence. On retrouve également des valeurs similaires dans les travaux de Lobaccaro [44]. Les matériaux étudiés ici étant opaques, les coefficients de transmittance sont nuls.

Surface	Coefficient de réflexion $\rho$	Coefficient d'absorption $\alpha$
Mur	0.9	0.1
Sol	0.1	0.9
Toit	0.7	0.3

TABLE 2.3 – Coefficients de réflexion et d'absorption utilisés dans le cas des simulations.

### 2.6.2 Cartographies d'ensoleillement.

Les résultats sont analysés de plusieurs façons. Le mode d'analyse des résultats dépend de l'objectif visé. Il est possible de s'intéresser à la cartographie complète des irradiances à un ou plusieurs instants donnés pour vérifier quelles sont les zones cumulant le meilleur ensoleillement, mais il est également possible de regarder l'évolution de l'irradiance au cours du temps sur certaines zones cibles identifiées. Enfin il est également possible de regarder une cartographie des quantités d'énergies reçues au cours d'une période de temps donné.

Les paramètres communs à l'ensemble des simulations sont définis ci-dessous.

Paramètre	Unité	Valeur
Longitude	°	5.9233
Latitude	°	45.725
Altitude	mètre (m)	250
"Air Mass"	TLAM2	3
Pression	<i>hPa</i>	1013

TABLE 2.4 – Paramètres communs à l'ensemble des simulations jouées (*Radiosité et lancer de rayons*).

L'ensemble des résultats présentés ci-dessous sont des résultats obtenus après si-

mulation de la journée du 21 Juin 2018. Le tableau 2.5 indique le nombre de mailles dans chacune des simulations.

	<b>Radiosité</b>	<b>Lancer de rayons</b>
Nombre de mailles	3794	8000
Surface moyenne	9.7m <sup>2</sup>	4.6m <sup>2</sup>

TABLE 2.5 – Nombre de mailles utilisées dans chaque modèle.

On suppose pour les simulations suivantes les paramètres présentés Tableau 2.6.

<b>Coefficient de réflexion (<math>\rho</math>)</b>	<b>Valeur</b>
Sol	0.1
Toits	0.7
Murs	0.9

TABLE 2.6 – Hypothèses des coefficients de réflexion des surfaces dans les simulations suivantes.

L'axe  $\vec{x}$  correspond à l'Est, l'axe  $\vec{y}$  correspond au Nord. Dans chaque configuration, la première scène présentée figure 2.21 correspond à une scène de rapport  $H/W = 2$ . Ce canyon est orienté selon l'axe Nord-Sud. Les cartographies présentées sont celles retenues pour 12h20 UTC, soit 14h30 heure locale. A cette heure-ci, les rayonnements direct, diffus et globaux simulés sur une surface horizontale sont respectivement de 878W/m<sup>2</sup>, 102W/m<sup>2</sup> et de 980W/m<sup>2</sup>. Il faut faire attention concernant les comparaisons visuelles entre résultats issus de la méthode par radiosité, prenant en compte le rayonnement diffus, et ceux obtenus par lancer de rayons qui ne considèrent pas ce rayonnement. Une comparaison entre les résultats obtenus à partir des ensoleillements directs sera menée par la suite (Section 2.6.5).

### 2.6.3 Résultats issus de la méthode par radiosité.

L'observation de la cartographie des ensoleillements sur la façade orientée vers l'ouest (figure 2.21) permet de remarquer que les ensoleillements sont nettement plus importants au pied des façades exposées au rayonnement direct, avec une irradiance allant jusqu'à 1058W/m<sup>2</sup>, ce qui reste modéré par rapport au rayonnement global. Les facteurs de forme génèrent une concentration du rayonnement au niveau du pied de la façade recevant du rayonnement direct. La question du réalisme de ce phénomène est alors une question ouverte. En cohérence avec les rayonnements simulés, le rayonnement direct obtenu sur les toitures est bien de 878W/m<sup>2</sup>, le rayonnement diffus de 102W/m<sup>2</sup>, donnant bien un rayonnement global de 980W/m<sup>2</sup>.

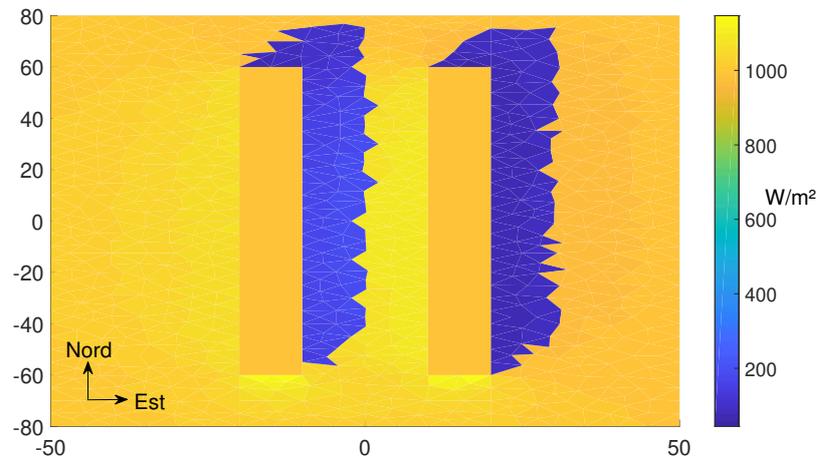


FIGURE 2.21 – Cartographie des ensoleillements obtenus par radiosité pour la journée du 21 juin 2018 à 12h20 UTC (14h20 loc.) dans le cas d'une journée claire. Vue supérieure.

Une visualisation du canyon depuis le sud (figure 2.22) permet d'observer l'allure des ombres générées. Les mailles étant considérées à l'ombre si leur barycentre ne reçoit pas de rayonnement direct, les ombres suivent le profil des mailles et ne sont donc pas réalistes sur ce point. Il est toutefois possible d'affiner leur allure en réduisant la taille des mailles. Il semble apparaître que l'approximation générée par le contour des mailles reste acceptable dans la mesure où la position du soleil évolue au cours de la journée. Cette visualisation permet également de bien observer le "halo" généré par les réflexions sur les façades exposées au rayonnement direct.

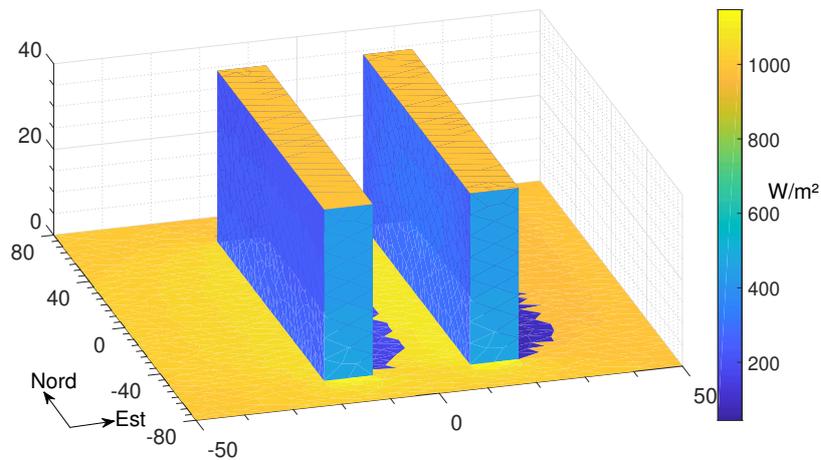


FIGURE 2.22 – Cartographie des ensoleillements obtenus par radiosité pour la journée du 21 juin 2018 à 12h20 UTC (14h20 loc.) dans le cas d'une journée claire. Vue latérale.

Une étude par radiosité progressive permet d'évaluer l'apport en irradiance de chaque "réflexion". Les figures 2.23 et 2.24 permettent de visualiser l'apport pour la composante directe sur les façades est et ouest. On observe bien qu'en l'absence de réflexion, les irradiances sont respectivement de  $160.9\text{W/m}^2$  et  $0\text{W/m}^2$ , ce qui correspond exactement aux rayonnements théoriques attendus ( $160.8974\text{W/m}^2$  sur la façade est, la façade ouest, étant quant à elle, masquée du rayonnement direct). 5 réflexions sont nécessaires pour atteindre plus de 95% de l'irradiance totale.

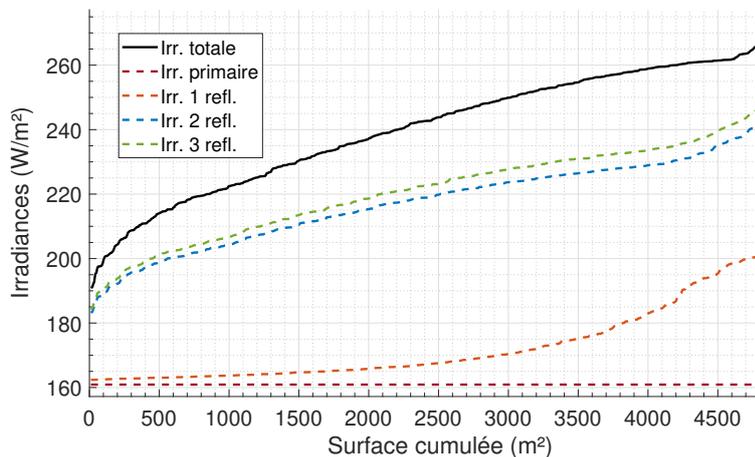


FIGURE 2.23 – Apport de chaque réflexion en irradiance sur la façade est dans le cas d'une simulation par radiosité pour la composante directe uniquement.

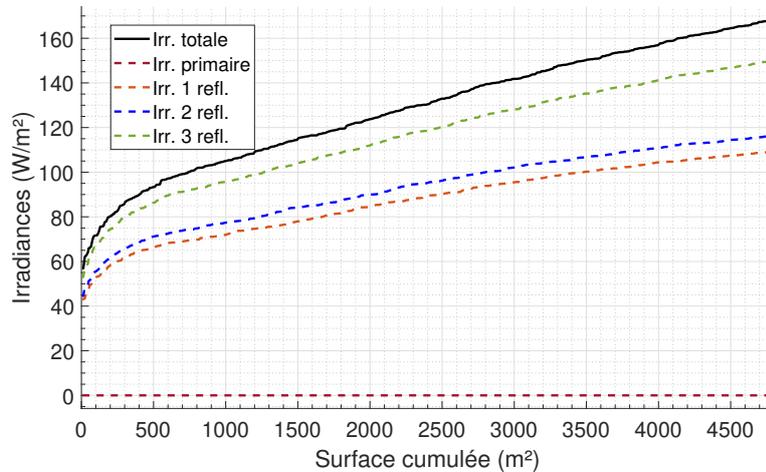


FIGURE 2.24 – Apport de chaque réflexion en irradiance sur la façade ouest dans le cas d’une simulation par radiosité pour la composante directe uniquement.

#### 2.6.4 Résultats issus de la méthode par lancer de rayons.

Pour les simulations présentées ci-dessous,  $1e7$  rayons sont générés. Afin de mieux se rendre compte des différences de cartographie d’irradiance générées par le choix de la nature des réflexions, les résultats obtenus à partir des différentes hypothèses sont comparés pour une même vue. Dans un cas comme dans l’autre, l’ensemble des surfaces sont supposées comme lambertiennes ou spéculaires. On note  $H_L$  l’hypothèse des réflexions lambertiennes sur l’ensemble de la scène. De même, l’hypothèse des réflexions spéculaires sur l’ensemble de la scène est notée  $H_S$ . Le nombre de réflexions est limité à 4.

On compare dans un premier temps les résultats obtenus à l’aide d’une vue supérieure (figure 2.25 et figure 2.26). On observe que l’énergie obtenue au sol et sur les toitures est bien identique sur les 2 cartes et cohérente avec l’irradiance fournie en entrée, soit  $878\text{W/m}^2$  en moyenne sur les mailles situées sur les toitures, dans le cas de réflexions spéculaires comme dans le cas de réflexions lambertiennes (le rayonnement diffus n’étant pas simulé ici). On observe également que les ombres sont identiques.

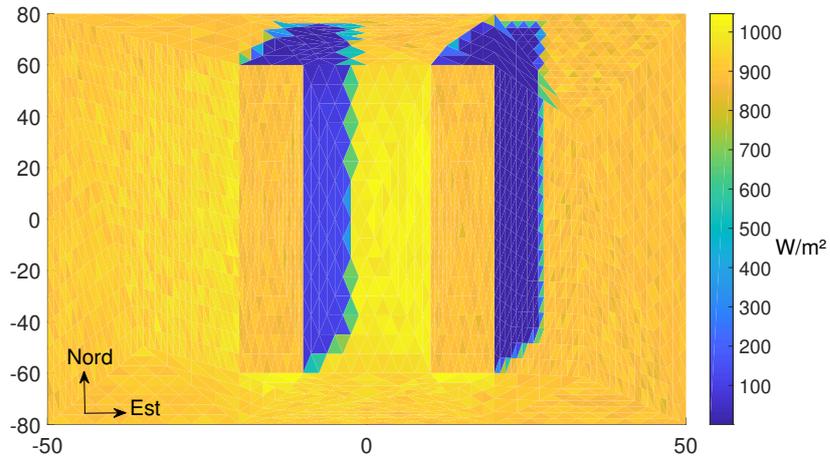


FIGURE 2.25 – Cartographie des ensoleillements obtenus par lancer de rayons avec réflexions lambertiennes pour la journée du 21 juin 2018 à 12h20 UTC (14h20 loc.) dans le cas d’une journée claire. Vue de dessus.

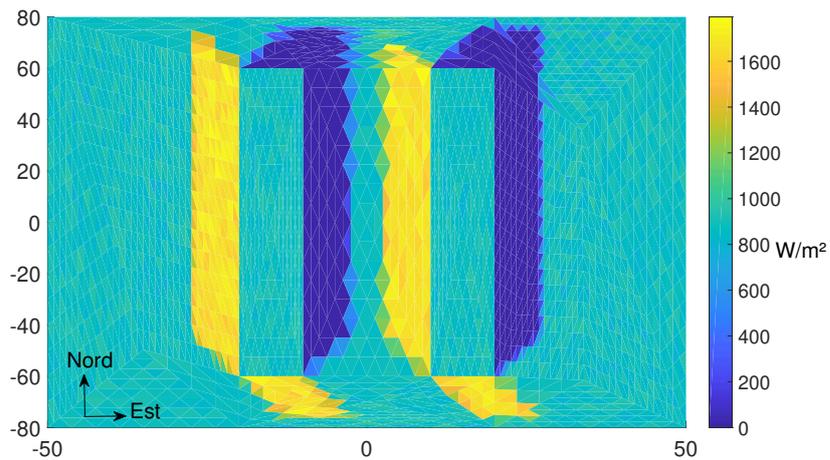


FIGURE 2.26 – Cartographie des ensoleillements obtenus par lancer de rayons avec réflexion spéculaire pour la journée du 21 juin 2018 à 12h20 UTC (14h20 loc.) dans le cas d’une journée claire. Vue de dessus.

Une seconde vue est présentée figure 2.27 et figure 2.28. Elle permet de visualiser les irradiances relevées sur la façade orientée vers l’ouest, dans le cas des hypothèses  $H_L$  et  $H_S$ . Les différences sur les façades sont plus faibles, l’irradiance relevée étant principalement due au rayonnement direct. On observe un léger halo dans le cas de réflexions lambertiennes (Hypothèse  $H_L$ ).

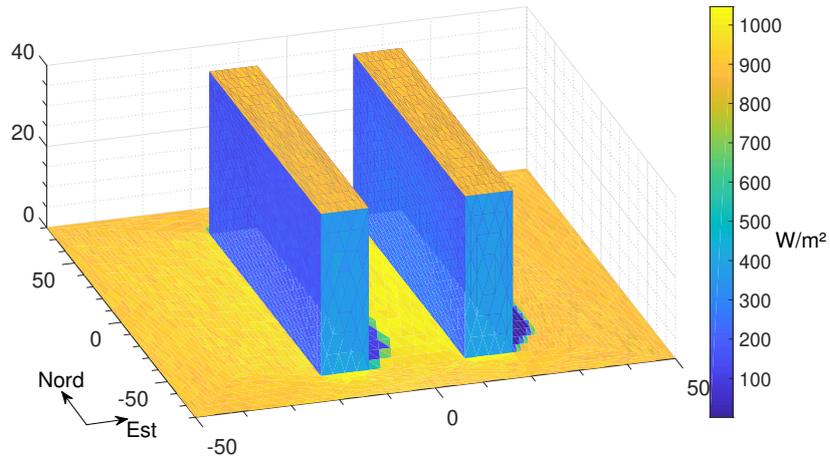


FIGURE 2.27 – Cartographie des ensoleillements obtenue par lancer de rayons avec réflexions lambertiennes pour la journée du 21 juin 2018 à 12h20 UTC (14h20 loc.) dans le cas d’une journée claire. Vue latérale.

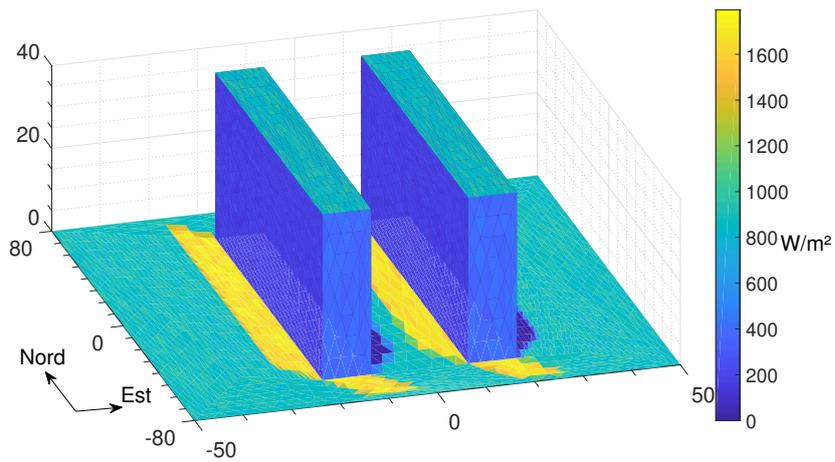


FIGURE 2.28 – Cartographie des ensoleillements obtenue par lancer de rayons avec réflexions spéculaire pour la journée du 21 juin 2018 à 12h20 UTC (14h20 loc.) dans le cas d’une journée claire. Vue latérale.

L’observation de chaque hypothèse permet de visualiser les effets géométriques obtenus par la méthode de lancer de rayons, cohérents avec la projection des surfaces de réflexion que l’on peut retrouver figure 2.29. Les réflexions spéculaires génèrent une disparité des énergies plus importante, allant de  $0W/m^2$  sur les zones masquées au rayonnement direct, jusqu’à  $1738W/m^2$  en moyenne pour les 20 mailles recevant les irradiances

les plus importantes. Ces irradiances sont cohérentes avec les irradiances théoriques attendues sous l'hypothèse  $H_S$ , faciles à calculer dès lors que les directions de réflexion sont identiques pour tous les rayons, et que l'on connaît la direction d'ensoleillement. On répertorie les irradiances théoriques attendues Tableau 2.7.

Zone d'étude	Irradiance théorique [W/m <sup>2</sup> ]
Sol sans réflexion	878.28W/m <sup>2</sup>
Sol avec réflexion	1668.7W/m <sup>2</sup>
Toits	878.28W/m <sup>2</sup>
Façade ouest	0W/m <sup>2</sup>
Façade est	175.63W/m <sup>2</sup>

TABLE 2.7 – Irradiances théoriques (W/m<sup>2</sup>) relevées sur les différentes surfaces de la scène d'étude dans le cas d'une configuration comportant uniquement des réflexions spéculaires.

Dans le cas de réflexions lambertiennes, l'ensemble des mailles reçoit une irradiance minimum non nulle (1.42W/m<sup>2</sup> en moyenne pour les 20 mailles recevant les plus faibles irradiances). L'irradiance maximale relevée est de 1029.4W/m<sup>2</sup> (toujours en moyenne sur les 20 mailles recevant les irradiances les plus importantes). Les mailles recevant les irradiances les plus importantes étant situées dans la même zone, à savoir au sol et en face est des pieds des bâtiments (en particulier au centre du canyon dans le cas de réflexions diffuses), cela montre que le mode de réflexion peut générer des écarts d'irradiance d'un facteur 1.69 sur une même zone et à heure donnée. On peut alors supposer que des écarts importants d'énergie (exprimée en Watt-heure (Wh)) peuvent être observés, en particulier sur les zones situées en pied de bâtiment sur lesquelles se concentrent les réflexions spéculaires.

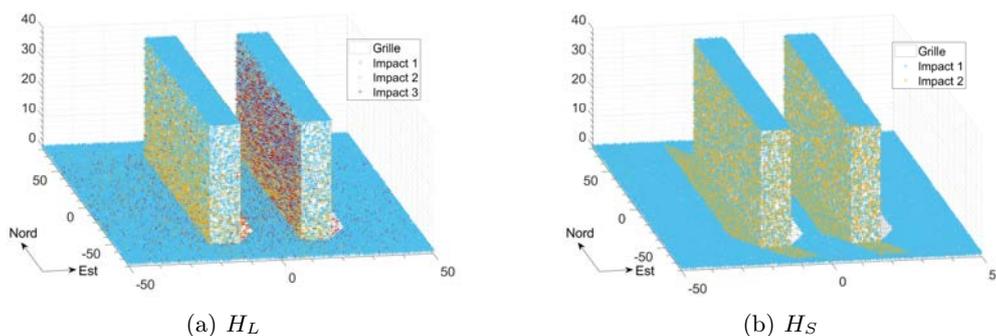


FIGURE 2.29 – Visualisation des impacts des réflexions successives en lancer de rayons, en fonction des hypothèses de réflexion.

Afin de mieux comprendre ces phénomènes et de vérifier dans quelle mesure ils

sont susceptibles de se produire en milieu réel, l'influence des matériaux composant les surfaces urbaines doit à présent être mesurée. Le Chapitre suivant (Chapitre 3) a pour objectif de mesurer l'impact de tels matériaux au travers de deux méthodes. La première consiste à qualifier les modes de réflexion de certains matériaux par des mesures en laboratoire. La seconde méthode consiste à directement mesurer les irradiances sur une maquette installée en milieu extérieur.

### 2.6.5 Comparaison des résultats.

On ne s'intéresse ici seulement qu'aux résultats issus du rayonnement direct, en supprimant l'apport issu du rayonnement diffus en radiosité. Le canyon est divisé en quatre zones d'intérêt. Trois d'entre elles sont situées à l'intérieur de ce dernier : on distingue le sol, la façade ouest et la façade est. La quatrième zone correspond au toit.

#### 2.6.5.1 Surface au niveau des toitures.

On s'intéresse dans un premier temps aux irradiances reçues en toiture. On compare les distributions obtenues entre les différents modèles par l'utilisation de boxplots. De part le mode d'initialisation des irradiances en toiture en radiosité, l'ensemble des mailles reçoivent la même irradiance, générant une distribution à variance nulle. Cette valeur correspond exactement à la valeur théorique (soit  $B_h = 878.28\text{W/m}^2$ ). Les irradiances moyennes reçues par les modèles en lancer de rayon, respectivement sous les hypothèses  $H_S$  et  $H_L$ , sont respectivement de  $877.5\text{W/m}^2$  et  $879.4\text{W/m}^2$ , semblables aux valeurs médianes représentées figure 2.30. Sous les deux hypothèses, 50% des valeurs sont comprises entre 850 et  $900\text{W/m}^2$ .

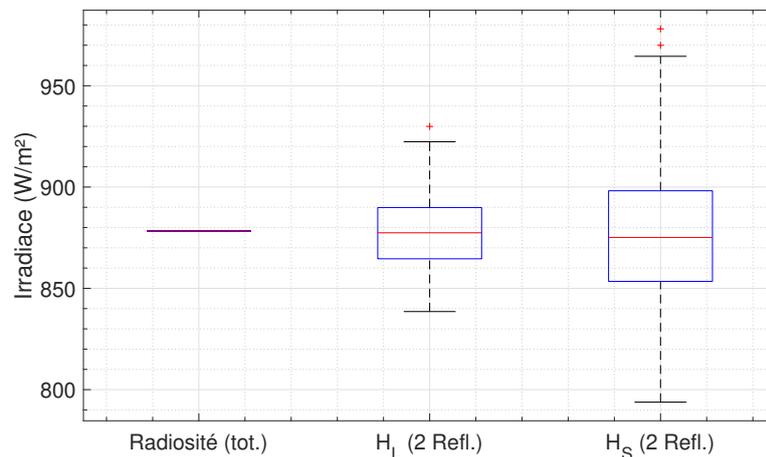


FIGURE 2.30 – Visualisation par boxplot de la distribution des irradiances reçues en toiture.

### 2.6.5.2 Surface au sol.

On s'intéresse à présent à la surface au sol (figure 2.32). Comme observé figure 2.30, c'est le modèle par lancer de rayons sous l'hypothèse  $H_S$  qui génère l'irradiance la plus importante, liée à une concentration des réflexions sur les zones en pied de bâtiments. Cela représente un surplus d'irradiance d'environ 60% sur 900m<sup>2</sup> de canyon (soit 37.5% du canyon). Les irradiances relevées par les modèles de radiosité et de lancer de rayons sur les zones éclairées et sur les zones ombragées sont similaires. Le découpage des ombrages est différent, en raison de l'approximation de la position du soleil dans le modèle par radiosité (figure 2.31). La surface ombragée supplémentaire obtenue par le modèle en radiosité est de 318m<sup>2</sup>, soit 13% de la surface au sol du canyon. Les "marches" observées au niveau des ombrages sur les modèles en lancer de rayons correspondent aux mailles qui ne reçoivent que partiellement du rayonnement direct.

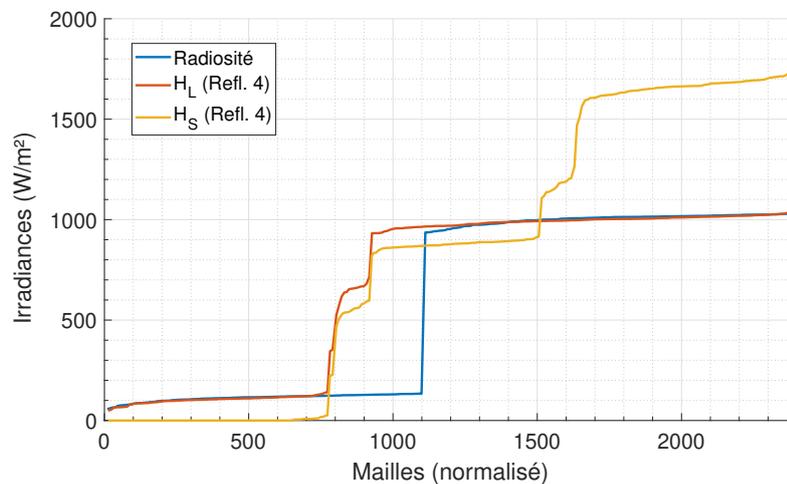


FIGURE 2.31 – Distribution des irradiances ( $W/m^2$ ) sur la surface au sol au centre du canyon.

On compare à présent les distributions sur les mailles éclairées recevant une irradiance supérieure à  $B_h$ . On observe que les valeurs médianes des modèles par radiosité et en lancer de rayons sous l'hypothèse  $H_L$  sont respectivement de 1011W/m<sup>2</sup> et 999W/m<sup>2</sup> (figure 2.32). Ce décalage est lié au nombre de réflexions limitées à quatre dans les modèles en lancer de rayons, mais aussi à des mailles partiellement ombragées recevant des irradiances entre  $B_h$  et 1000W/m<sup>2</sup> (en raison des réflexions) dans le cas de l'hypothèse  $H_L$ .

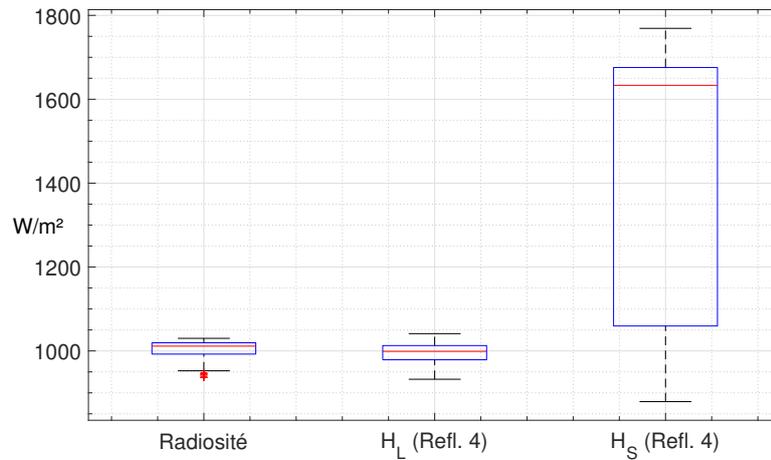


FIGURE 2.32 – Visualisation par boxplot de la distribution des irradiances supérieures à  $B_h$  reçues au sol.

### 2.6.5.3 Façade est.

La façade est (orientée vers l'ouest) est celle exposée au rayonnement direct. On observe figure 2.34 que la distribution en lancer de rayons sous hypothèse  $H_S$  est représentative d'irradiances plus faibles, du fait de l'absence de réflexions incidentes sur cette façade sous cette hypothèse. Il en est de même en lancer de rayons, sous hypothèse  $H_L$ , dont la valeur médiane est de  $237.7\text{W/m}^2$  après quatre réflexions, contre  $242.5\text{W/m}^2$  en radiosité totale ou  $235.3\text{W/m}^2$  après quatre réflexions. Cet écart est représentatif du nombre de réflexions générées en lancer de rayons qui est limité à quatre.

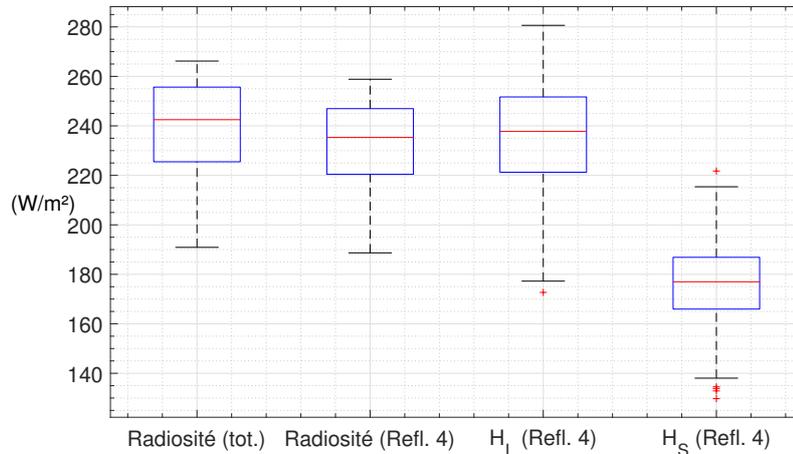


FIGURE 2.33 – Visualisation par boxplot des irradiances ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sur la façade est (orientée vers l'ouest).

La figure 2.31 présente la comparaison des distributions d'irradiance sur la façade est. La distribution des irradiances après quatre réflexions, ce qui correspond à la simulation en lancer de rayons, en radiosité, est également représentée. On observe que ces deux distributions coïncident, ce que l'on retrouve via la visualisation des boxplots figure 2.33. On observe également que le lancer de rayon sous hypothèse  $H_L$ , de part l'aspect statistique du modèle, sous estime l'irradiance sur certaines mailles tandis qu'il le surestime sur d'autres. La visualisation de ces zones est présentée figure 2.35, où l'on observe que les mailles sur lesquelles l'irradiance est sous-estimée sont situées en haut et dans les coins de la façade tandis que les mailles situées en pied et au centre de la façade semblent présenter des sur-estimations de l'irradiance. On peut alors supposer que cet écart provient du découpage des ombrages au sol qui est différent dans les modèles par radiosité et par lancer de rayons, générant un apport énergétique plus important dans le cas des simulations par lancer de rayons.

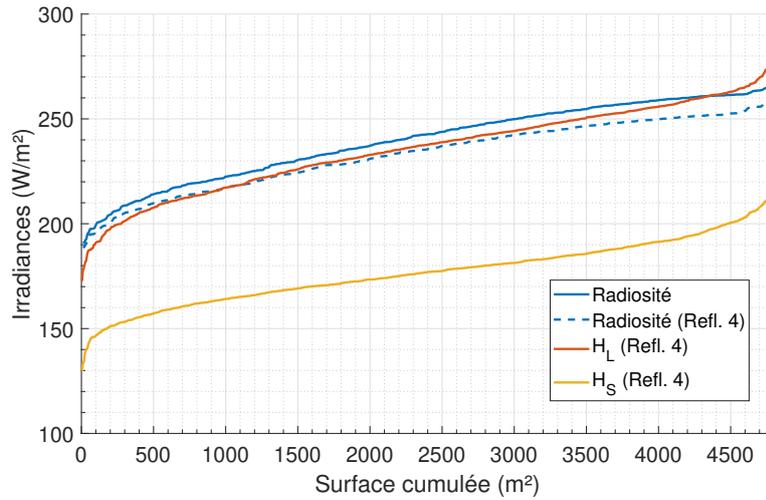


FIGURE 2.34 – Distribution des irradiances ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sur la façade est (orientée vers l'ouest).

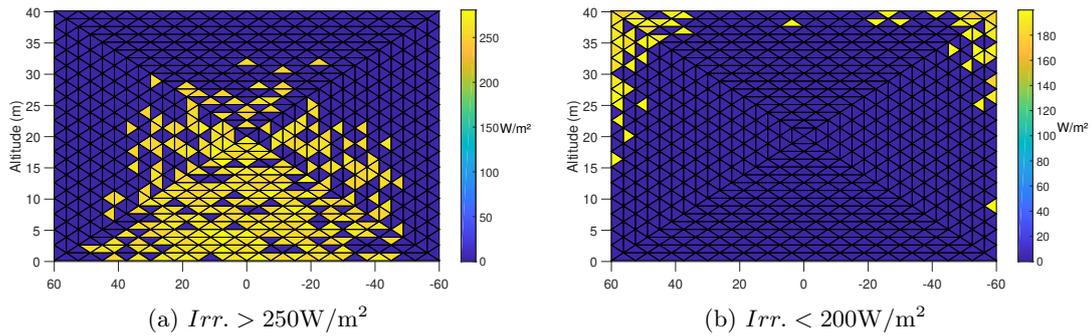


FIGURE 2.35 – Visualisation des zones où la méthode par lancer de rayons, sous hypothèse  $H_L$ , semble sous-estimer et sur-estimer les irradiances.

Pour s'en persuader, on réalise alors la même étude sur la façade orientée ouest située à l'extérieur du canyon (figure 2.36 et figure 2.37). Cette analyse montre une différence négligeable entre les modèles radiosité et lancer de rayons sous hypothèse  $H_L$ , avec une différence entre les irradiances moyennes qui est alors de  $0.2\text{W}/\text{m}^2$ . Les mailles sur lesquelles l'irradiance est sous-estimée restent les mailles situées en hauteur de la façade, tandis que celles où l'irradiance est sur-estimée sont situées en pied de façade. Les faibles écarts avec le modèle en radiosité laissent suggérer des erreurs statistiques.

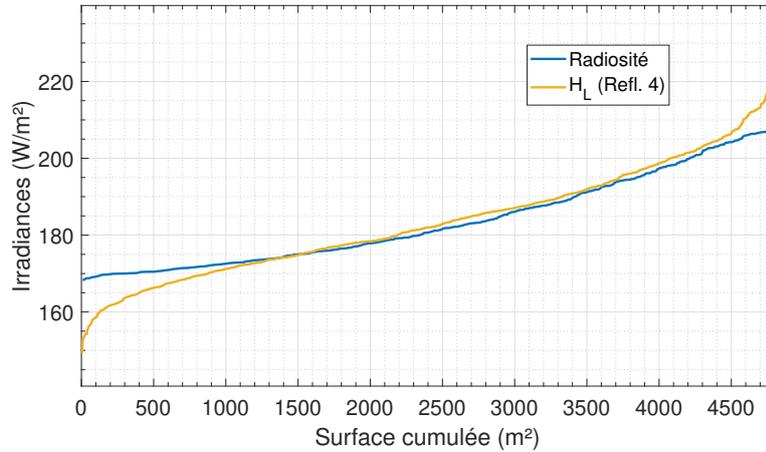


FIGURE 2.36 – Distribution des irradiances ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sur la façade orientée vers l'ouest à l'extérieur du canyon (du bâtiment ouest).

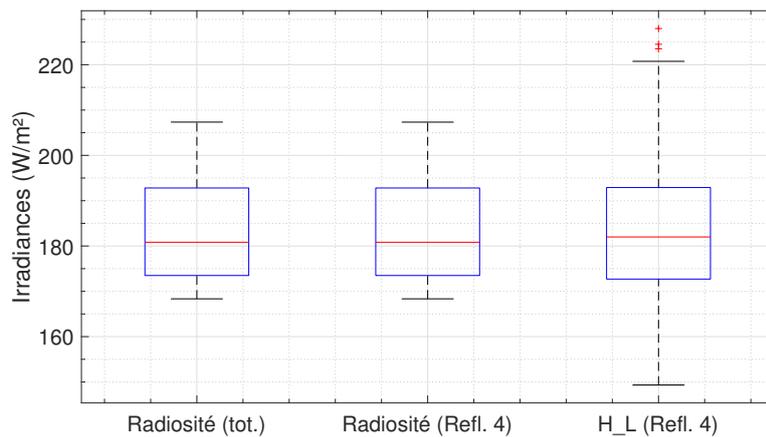


FIGURE 2.37 – Visualisation par boxplot des irradiances ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sur la façade orientée vers l'ouest à l'extérieur du canyon (du bâtiment ouest).

#### 2.6.5.4 Façade ouest.

Les mêmes phénomènes sont observés sur la façade ouest. La distribution associée au résultat obtenu en lancer de rayons sous hypothèse  $H_S$  n'est pas représentée du fait que cette façade ne reçoit pas d'irradiance directe, même après réflexions. La figure 2.38 montre des distributions similaires après 4 réflexions en radiosité et en lancer de rayons sous hypothèse  $H_L$ , avec des valeurs médianes respectivement de 121.2 et 124.6  $\text{W}/\text{m}^2$ .

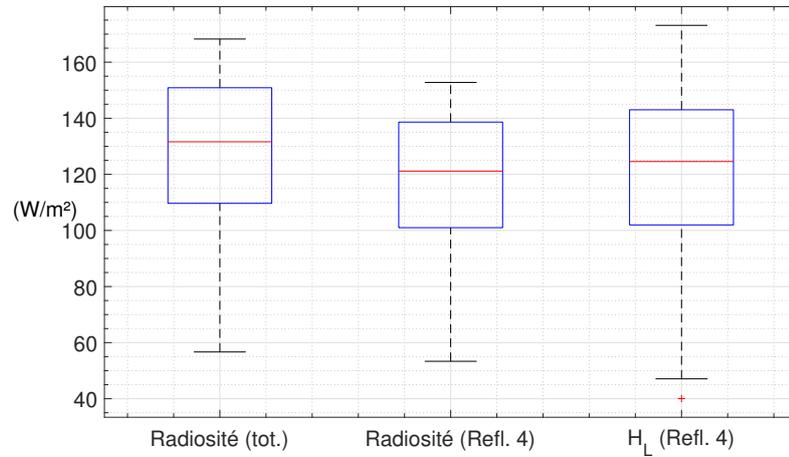


FIGURE 2.38 – Distribution des irradiances ( $W/m^2$ ) sur la façade ouest (orientée vers l'est).

La figure 2.39 permet de visualiser la distribution des irradiances en fonction des surfaces cumulées. Le constat est le même avec des résultats similaires en radiosité et en lancer de rayons sous hypothèse  $H_L$  après 4 réflexions. De nouveau, la méthode par lancer de rayons sous hypothèse  $H_L$  semble montrer une légère sur-évaluation de l'irradiance, comme déjà révélé par les boxplots figure 2.38.

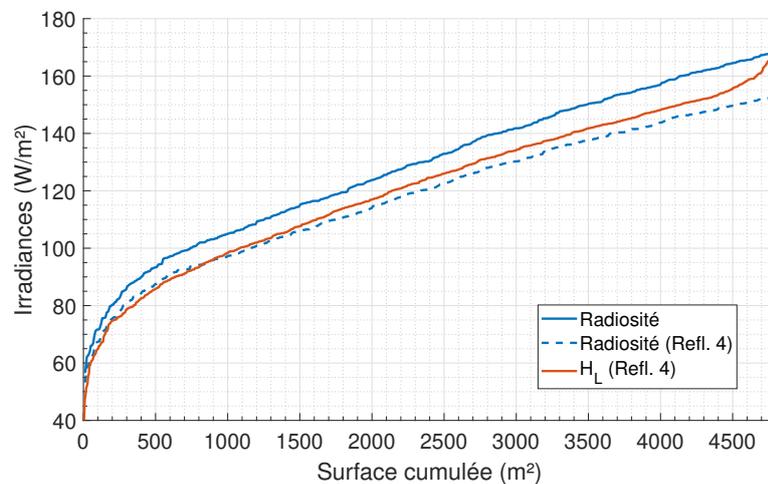


FIGURE 2.39 – Distribution des irradiances ( $W/m^2$ ) sur la façade ouest (orientée vers l'est).

L'analyse approfondie des irradiances sur chacune des faces intérieures du canyon

permet de valider la cohérence des modèles. Le modèle en lancer de rayons sous hypothèse spéculaire est validé par confrontation aux irradiances théoriques, les modèles de radiosité en lancer de rayon sous hypothèse lambertienne se valident par leurs résultats similaires, et les différentes étapes de validation préalablement présentées.

Ces résultats valident la pertinence des méthodes par radiosité pour simuler les inter-réflexions diffuses, méthodes aujourd'hui délaissées au profit des méthodes par lancer de rayons. L'objectif des chapitres suivants est de vérifier si ces méthodes restent pertinentes pour simuler des matériaux typiques des surfaces urbaines, présentant des réflexions qui ne sont pas toujours uniquement lambertiennes.

### **2.6.6 Synthèse des performances des codes prototypes développés.**

Les modèles et en particulier les prototypes de code développés au cours de cette thèse s'opposent par des performances différentes. Ces différences peuvent prendre différents aspects, en impactant soit les résultats physiques issus des modélisations, soit les capacités de calcul des codes. Les avantages et inconvénients sont inhérents à la structure des codes développés durant ces 3 années. Leur généralisation à l'ensemble des codes reposant sur les mêmes méthodes mathématiques impliquerait alors d'étudier le code de chaque modèle, ce qui n'a pas été effectué. On peut toutefois supposer que des modèles tels que *Radiance*, de part la communauté utilisatrice et le développement produit, ont été optimisés pour s'affranchir des limitations liées à la structure du code. Par ailleurs, le développement effectué ici en *Matlab*<sup>®</sup> n'est pas optimal en terme de capacité de calcul, en particulier sur le modèle en lancer de rayons. Plus généralement, les différences de performance sont liées à la fois aux méthodes et à leurs implantations. Séparer ces deux aspects relèverait alors de travaux de recherches en algorithmique ou programmation.

#### **2.6.6.1 Différences de performances en modélisations physiques.**

Trois principales différences relevées permettent de justifier les écarts dans les modélisations physiques.

On relève dans un premier temps l'approximation des ombrages générée par la méthode en radiosité. Cela provient de l'approximation de la position du soleil à une maille de voûte céleste, permettant de gagner en temps de calcul. Plusieurs solutions sont envisageables pour réduire cette erreur. La première solution consiste simplement à réduire la tailles des mailles de ciel et de scène. Cette stratégie présente deux défauts : d'une part le temps de calcul des facteurs de forme et des coefficients d'intervisibilité augmenterait, d'autres part ces matrices augmenteraient en taille, rendant leur stockage et l'inversion de la matrice des facteurs de forme plus lourds. Une autre solution consisterait à revoir la méthode d'initialisation de la radiosité, typiquement en se rapprochant d'une initialisation type lancer de rayons. Une initialisation en lancer de rayons de type "backward" depuis chaque maille dans la direction du soleil serait envisageable et pourrait permettre

de conserver un temps de calcul raisonnable.

La seconde différence entre les modèles en radiosité et en lancer de rayons concerne la conservation de l'énergie reçue par la scène. Le caractère itératif du code en lancer de rayons, avec un parcours sur l'ensemble des rayons puis sur l'ensemble des intersections de ces derniers avec la scène, contraint à fixer des conditions d'arrêt sur le parcours de ces derniers. Lors de l'arrêt du parcours d'un rayon piégé dans la scène, une part non délivrée d'énergie est alors perdue. Il s'agit donc de trouver un juste milieu entre un nombre suffisant de réflexions pour limiter cette perte d'énergie, et un nombre suffisamment restreint de réflexions pour garantir des temps de calcul raisonnables. L'impact d'une réflexion supplémentaire sur le temps de calcul est difficilement prévisible, car il dépend notamment de la scène mais aussi des conditions d'éclairage de cette dernière.

La troisième différence concerne la modélisation physique des réflexions. Si ici le modèle en radiosité ne permet que de simuler des réflexions lambertiennes, ce n'est pas le cas du modèle en lancer de rayons qui permet de modéliser n'importe quel type de réflexion à condition de connaître sa distribution spatiale, et idéalement de connaître l'échantillonnage par importance qui y est associé.

#### 2.6.6.2 Différences de performance en capacité de calcul.

D'un point de vue informatique, les différences entre les deux modèles se distinguent en deux grandes catégories : le temps requis pour obtenir une image et le stockage mémoire requis pour obtenir cette image.

Concernant le temps de calcul, la principale difficulté en radiosité est d'obtenir la matrice des facteurs de forme. Soit  $n$  le nombre de mailles de la scène étudiée, ce calcul est alors en  $O(n^2)$ . Chaque facteur de forme étant indépendant, des méthodes de parallélisation peuvent être utilisées pour accélérer leur calcul. Une fois ce calcul effectué, l'inversion de la matrice est immédiate (si la matrice est de taille raisonnable), permettant facilement de générer un grand nombre de résultats. En lancer de rayons, la méthode itérative est très coûteuse en temps de calcul. Comme pour les facteurs de forme en radiosité, chaque rayon est indépendant, ce qui permet l'utilisation de méthodes de parallélisation. Toutefois le grand nombre de rayons requis nécessite un temps de calcul conséquent pour obtenir une image. Le tableau 2.8 recense les temps de calcul pour les simulations présentées récemment, et donc avec un nombre de mailles différent entre les résultats en radiosité et ceux en lancer de rayons. Ces résultats sont donc à relativiser, et c'est pour cette raison qu'ils ne sont pas précisés par ailleurs. Les écarts entre les modèles en lancer de rayons en spéculaire et en lambertien s'expliquent par un nombre moins important de réflexions en spéculaire. Le temps en radiosité ne tient pas compte du temps de calcul des facteurs de forme. Les calculs sont réalisés sur ordinateur à double processeurs *Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v4 2.10GHz*, possédant 64.0 Go de RAM.

<b>Radiosité</b>	<b>Lancer de rayons lambertien</b>	<b>Lancer de rayons spéculaire</b>
27.8 sec.	92.6 min.	73.4 min.

TABLE 2.8 – Temps de calcul dans le cas simulations présentées précédemment.

Concernant les aspects de stockage mémoire, les méthodes par lancer de rayons ne nécessitent qu'un stockage de vecteurs et non un stockage en matrice. Toutefois, cette méthode permettant de travailler plus facilement avec un nombre de mailles plus important, les vecteurs sont généralement de taille plus importante. Comparer les tailles de stockage nécessaire par chaque méthode ne paraît alors pas pertinent. Toutefois on peut imaginer qu'une matrice de taille importante peut générer différents problèmes en radiosité : calcul, inversion et stockage de la matrice inversée.

Le tableau 2.9 présente un comparatif des performances des codes prototypes développés durant cette thèse. Il utilise une échelle à trois couleurs : pour chaque caractéristique évaluée, la couleur verte indique une bonne capacité du code à simuler en s'affranchissant des problèmes liés au point relevé, la couleur orange des capacités discutables et rouge de mauvaises capacités.

	<b>Radiosité</b>	<b>Lancer de rayons</b>
<b>Modélisation des réflexion lambertiennes</b>	bon	bon
<b>Modélisation des réflexion spéculaire</b>	impossible	bon
<b>Prise en compte de l'ensemble des réflexions</b>	bon	mauvais
<b>Précision des ombrages</b>	moyen	bon
<b>Prise en compte du diffus</b>	bon	impossible
<b>Temps de calcul</b>	bon	mauvais
<b>Stockage mémoire</b>	potentiellement mauvais	bon

TABLE 2.9 – Tableau récapitulatif des caractéristiques des codes prototypes tels que développés au cours de cette thèse.

## 2.7 Perspectives.

Les modèles développés dans cette partie laissent apparaître différentes perspectives, notamment sur la possibilité d'adapter ces simulations à différentes bandes du spectre. En fonction de la bande spectrale considérée, la modélisation des termes sources ne se fait pas de la même façon. Certains logiciels, comme *Modtran* [152] permettent de simuler des spectres sous atmosphère, qui peuvent alors servir de données d'entrée au modèle. En associant la bonne densité de flux énergétique à chaque bande spectrale arbitrairement définie, il est possible de réaliser des simulations spectrales voire même

de reconstituer le spectre incident sur chaque maille. Cela peut être utile dans le cas d'applications particulières, comme l'intégration visuelle de modules photovoltaïques afin d'augmenter leur acceptation.

### 2.7.1 Perspectives spectrales.

Comme présenté précédemment (Chapitre 2), l'éclairement solaire est également fonction de la longueur d'onde. On a vu dans le Chapitre 1, (section 1.3.2.2 et section 1.3.2.3) que l'allure du spectre incident peut avoir un impact sur la couleur, et donc l'acceptation visuelle, mais aussi le rendement énergétique des modules photovoltaïques. Les modèles présentés dans ce chapitre ouvrant la perspective à la réalisation de modélisations spectrales, on propose ici une adaptation du modèle par radiosité pour obtenir le spectre incident sur chaque maille. Il s'agit alors de vérifier l'impact de la dépendance en longueur d'onde sur l'allure des spectres incidents. L'étude s'effectue sur la même scène que les résultats précédents. On s'intéresse à trois mailles en particulier : une située au centre de la façade ouest à 13.5m de haut, une située sur la façade est à 13.5m de haut et une située au sol au centre du canyon.

L'utilisation de la radiosité pour des modélisation spectrales fait ici l'objet de fortes hypothèses qui seront détaillées. Il s'agit ici de présenter les perspectives rendues possibles par l'utilisation d'un modèle en radiosité.

#### 2.7.1.1 Prise en compte du ciel.

La source solaire étant composée de deux sources, l'ensoleillement direct et l'ensoleillement diffus, un spectre associé à chacune de ces sources doit être utilisé comme variable d'entrée du modèle. Le logiciel *Modtran*, développé par la *NASA* et habituellement utilisé pour des études spectrales, permet de générer ces spectres d'irradiances directe et diffuse, en tenant compte des conditions de ciel. La figure 2.40 permet de visualiser les spectres solaires direct au-dessus de l'atmosphère (jaune), et sous atmosphère (violet). On peut également visualiser les spectres du rayonnement diffus incident sur la surface terrestre (vert) et ré-émis dans l'espace (bleu).

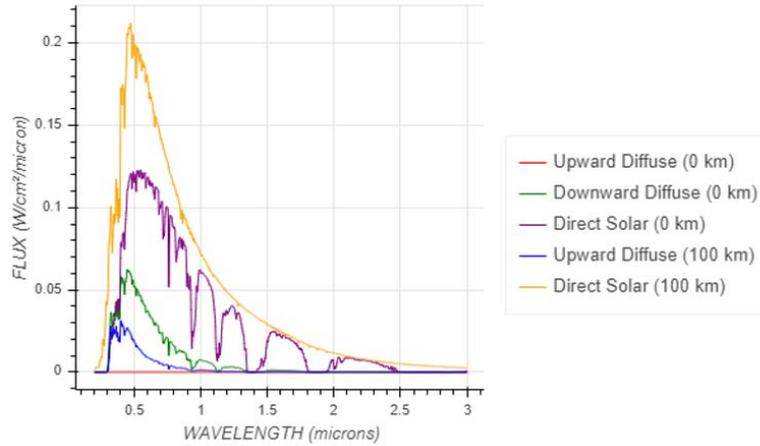


FIGURE 2.40 – Capture d’écran des spectres obtenus à partir de la version de démonstration du logiciel Modtran.

Les paramètres utilisés pour obtenir ces spectres sont récapitulés Tableau 2.10.

Variable	Valeur
Modèle atmosphérique	Latitude moyenne ( $\approx 45^\circ$ )
Saison	Eté
Colonne d’eau	3635.9 atm-cm
Colonne d’ozone	0.33176 atm-cm
$CO_2$	400 ppm
$CO$	0.15 ppm
$CH_4$	1.8 ppm

TABLE 2.10 – Paramètres utilisés dans les simulations Modtran.

La version de démonstration du logiciel *Modtran* ne permettant pas de récupérer les données des spectres simulés, un spectre AM1.5 sera utilisé par la suite (figure 2.41) pour représenter l’irradiance directe. Le spectre diffus variant en fonction de son origine dans la voûte céleste, il ne sera pas considéré et seuls les résultats issus de simulations d’ensoleillement direct seront présentés. D’autre part l’énergie incidente étant essentiellement apportée par le rayonnement direct, cela conforte l’hypothèse effectuée ici dans le cadre d’une étude préliminaire. Notons cependant que la considération du rayonnement diffus se ferait selon une méthodologie similaire.

### 2.7.1.2 Modèles de réflexion.

Les modèles de réflexion sont similaires à ceux détaillés au Chapitre 2. Seuls les coefficients de réflexion sont dépendants de la longueur d'onde. L'utilisation du modèle en radiosité impose une hypothèse de réflexions lambertiennes, et ce sur l'ensemble des longueurs d'ondes considérées.

On suppose que le spectre de réflexion du sol correspond au spectre de l'enrobé mesuré sur la plateforme INCAS. On suppose que les spectres de réflexion des parois sont ceux mesurés sur le crépis blanc (Echantillon *ECH1701000* présenté tableau 3.1 de la section 3.2.3). La figure 2.41 présente sur l'axe de droite les coefficients de réflexion pour les matériaux crépis et enrobé en fonction de la longueur d'onde. La courbe violette, rattachée à l'axe de droite, représente le spectre AM1.5 utilisé comme source direct dans la simulation. Les spectres mesurés étant compris entre 350 et 1050nm, seule cette bande spectrale sera considérée. Afin d'être cohérent avec la position du soleil calculée, le spectre AM1.5 est normalisé puis multiplié par le rayonnement direct incident sur une surface horizontale ( $B_h$ ) simulé à l'heure souhaitée.

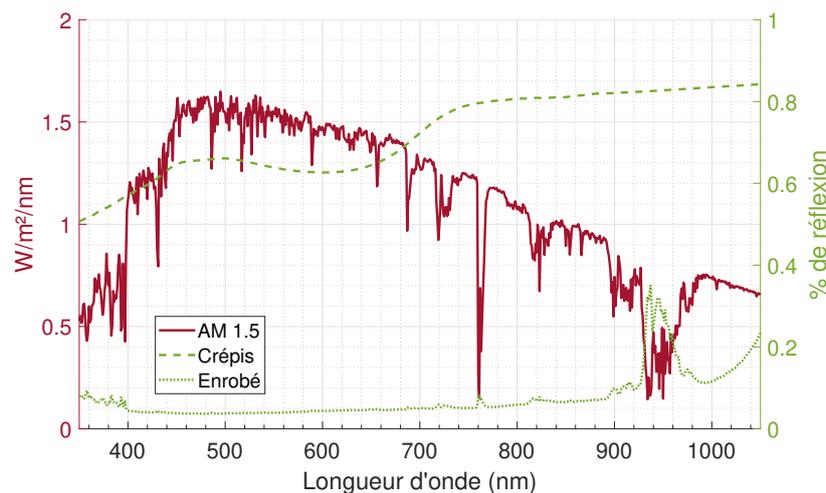


FIGURE 2.41 – Visualisation du spectre solaire AM1.5 et des spectres de réflexion (crépis et enrobé) utilisés dans les modélisations spectrales réalisées par méthode par radiosité.

### 2.7.1.3 Résultats en modélisation spectrale.

Identiquement au Chapitre 2, on effectue une simulation pour la journée du 21 Juin 2018 à 12h20 UTC. La même scène, avec un rapport  $H/W = 2$  est utilisé.

La figure 2.42 permet de visualiser les résultats obtenus. Les énergies obtenues intégrées sur l'ensemble du spectre sont respectivement de  $167.4\text{W/m}^2$ ,  $86.0\text{W/m}^2$  et

$923.7\text{W}/\text{m}^2$ , cohérentes avec les résultats obtenus au Chapitre 2 et avec le rayonnement direct incident initial sur une surface horizontale ( $B_h = 878.3\text{W}/\text{m}^2$ ).

Toutefois, il est difficile de visualiser les déformations générées par le spectre solaire incident sur les spectres de réflexion. On décide alors de normaliser chacun des spectres obtenus par l'irradiance totale qui lui est associée, calculée comme l'intégrale du spectre entre  $350\text{nm}$  et  $1050\text{nm}$ . Ces spectres sont également comparés au spectre solaire, lui aussi normalisé (figure 2.43). On observe que sur les mailles exposées au rayonnement direct, les spectres incidents sont pratiquement identiques au spectre solaire, ce qui est logique car le principal apport en irradiance se fait par l'exposition au rayonnement direct. On observe toutefois bien une déformation du spectre incident sur la façade ouest, masquée du rayonnement direct. Cette déformation se manifeste par une atténuation des apports énergétiques sous  $700\text{nm}$ , ce qui correspond à la bande spectrale du domaine visible, et une augmentation des apports énergétiques au dessus de  $700\text{nm}$ . Des effets différents au sein même de la bande spectrale exploitée par les technologies photovoltaïques sont donc observés. Ces effets sont bien évidemment différents en fonction des spectres de réflexion des matériaux composant le paysage urbain. En l'occurrence, ils coïncident avec les variations du coefficient de réflexion du spectre du crépis en fonction de la longueur d'onde.

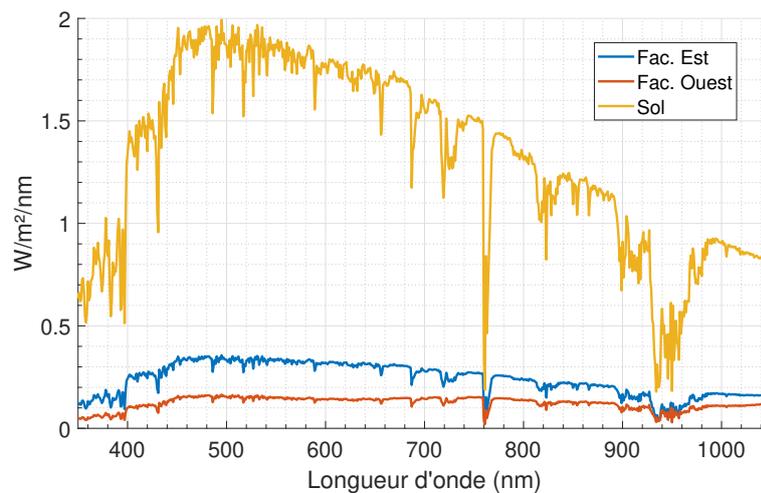


FIGURE 2.42 – Visualisation des spectres obtenus pour les mailles situées à  $13.5\text{m}$  sur les façades est et ouest, ainsi que pour la maille située au sol au centre du canyon.

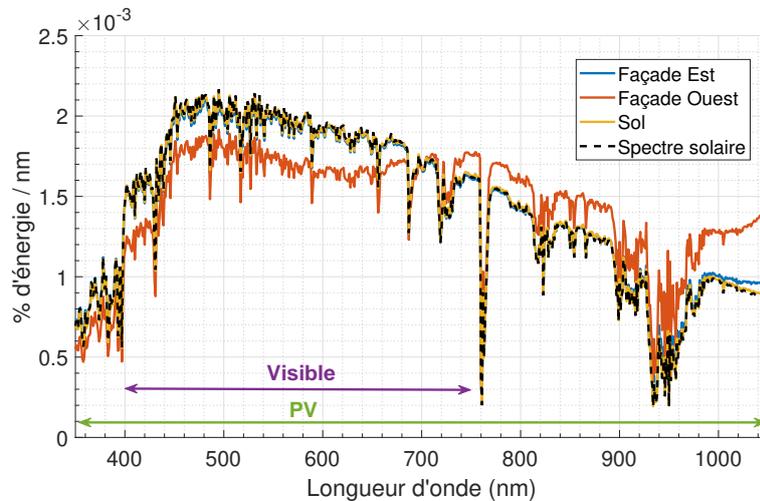


FIGURE 2.43 – Comparaison des spectres incidents normalisés obtenus après réflexions.

Ces résultats préliminaires ouvrent la possibilité à des études de l'influence de l'environnement sur les performances et l'intégration esthétique de modules photovoltaïques dans le paysage urbain.

### 2.7.2 Autres perspectives et limites.

Tels que les modèles sont développés dans cette thèse, seul le modèle par lancer de rayons permet de considérer les effets géométriques de réflexion. Si numériquement cela apparaît comme impossible avec les modèles en l'état (temps de calcul trop important), on peut toutefois imaginer de traiter la dépendance en longueur d'onde des effets optiques en lancer de rayon. Une stratégie consisterait alors à associer à chaque rayon une longueur d'onde aléatoire. Le tirage de ces longueurs d'ondes se ferait selon une loi uniforme sur la bande spectrale considérée. Chaque matériau composant la scène urbaine aurait deux spectres associés, l'un représentatif de la réflexion lambertienne, l'autre spéculaire. Chaque rayon serait alors traité de manière analogue à ce qui est fait actuellement. Soit  $N_\lambda$  le nombre de bande spectrales que l'on souhaite considérer. Si l'on s'accorde que pour la scène utilisée dans ces travaux, un canyon urbain de rapport  $H/W = 1$  ou de rapport  $H/W = 2$  nécessite  $10^7$  rayons, on peut alors supposer qu'il faudrait  $10^7 \times N_\lambda$  rayons pour obtenir les spectres incidents sur chacune des mailles de la scène, multipliant d'autant le temps de calcul. Le principal frein au déploiement et à l'étude des résultats de telles simulations reste le temps de calcul. S'il est relativement facile de s'affranchir de cette contrainte en radiosité, une simulation sur différentes bandes spectrales en lancer de rayons sous entend la possibilité d'adapter les propriétés de réflexion pour chaque bande spectrale. Il faut donc procéder à autant de simulations que de bandes spectrales considérées, pour ne générer qu'une carte d'irradiance.

La radiosité peut également s'appliquer à d'autres bandes spectrales que la bande

CLO telle que définie dans cette étude. En particulier, elle peut aussi s'appliquer à la bande GLO. Dans le cas des bandes spectrales situées dans le proche infra-rouge (NIR - *Near InfraRed*) et dans l'infrarouge (IR - *InfraRed*), l'échauffement généré par l'absorption des bandes spectrales aux longueurs d'ondes plus courtes doit être pris en compte. Une étude sur la modélisation des températures de surface a fait l'objet d'un stage encadré durant cette thèse.

Enfin, certaines stratégies permettent de s'assurer de la conservation de l'énergie au sein d'une scène. On peut notamment citer l'utilisation de mailles fictives transparentes fermant la scène [153].

## Chapitre 3

# Acquisition de propriétés radiatives fines et mesures de leur impact.

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction.</b>	<b>109</b>
<b>3.2</b>	<b>Variation des propriétés en fonction de la longueur d'onde : mesures spectrales.</b>	<b>109</b>
3.2.1	Appareils de mesure.	109
3.2.1.1	Spectromètre FieldSpec4.	110
3.2.1.2	Spectromètre UV-VIS-PIR Lambda 950	111
3.2.2	Choix des matériaux de mesure	112
3.2.3	Spectres de réflexion en incidence normale.	113
3.2.3.1	Mesures réalisées sur la plate forme INCAS.	116
<b>3.3</b>	<b>Mesures sous différents angles d'incidences.</b>	<b>116</b>
3.3.1	Nomenclature utilisée.	117
3.3.2	Etat de l'art de la reconstitution de réflexions optiques.	119
3.3.3	BRDF (Bidirectional Reflectance Density Function).	120
3.3.3.1	Définition.	120
3.3.3.2	Transposition au cas d'étude.	121
3.3.4	Mesures réalisées à l'ARTA.	122
3.3.4.1	Protocole de mesure.	122
3.3.4.2	Interprétation des mesures.	123
	Terme lambertien.	124
	Terme spéculaire.	124
	Analyse des mesures complètes.	125
3.3.5	Equations de Fresnel.	125
3.3.6	Détermination de l'indice de réfraction de l'échantillon.	127
3.3.7	Construction du modèle de BRDF.	127
3.3.7.1	Construction du terme diffus.	128

3.3.7.2	Construction du terme brillant. . . . .	128
3.3.7.3	Modèle complet et analyse des mesures de l'ARTA. . . . .	129
3.3.7.4	Calcul des coefficients de réflexion. . . . .	130
3.3.8	Approximation des données par le modèle. . . . .	130
3.3.8.1	Analyse des mesures sans corrections. . . . .	130
3.3.8.2	Correction de la mesure ARTA. . . . .	131
3.3.8.3	Prise en compte des incertitudes. . . . .	131
3.3.8.4	Validation des résultats. . . . .	131
3.3.8.5	Résultats par polarisation. . . . .	132
3.3.8.6	Obtention des coefficients finaux. . . . .	133
3.3.9	Résultats pour les différents matériaux qualifiés. . . . .	136
3.3.10	Validation de l'hypothèse de Fresnel. . . . .	136
3.3.10.1	Observations au microscope optique. . . . .	136
3.3.10.2	Mesures réalisées au granulométrimètre TraceIt®. . . . .	137
3.3.11	Conclusion sur la reconstitution des propriétés de réflexion. . . . .	138
<b>3.4</b>	<b>Mesures en conditions réelles : utilisation d'une maquette de référence. . . . .</b>	<b>139</b>
3.4.1	Construction de la maquette. . . . .	139
3.4.1.1	Structure. . . . .	139
3.4.1.2	Reconstruction des surfaces urbaines. . . . .	140
3.4.1.3	Prise en compte de l'environnement. . . . .	142
3.4.1.4	Choix des capteurs. . . . .	143
3.4.1.5	Positionnement des capteurs. . . . .	144
3.4.1.6	Etude de l'influence du spectre d'incidence sur la mesure. . . . .	146
3.4.1.7	Montage et validation de la chaîne d'acquisition. . . . .	149
	Paramétrage de la chaîne d'acquisition. . . . .	149
	Erreur sur la chaîne d'acquisition. . . . .	150
	Validation de la chaîne d'acquisition. . . . .	151
	Comparaison à l'ensoleillement du banc d'ensoleillement. . . . .	151
	Comparaison à l'ensoleillement réel. . . . .	152
3.4.2	Campagnes de mesure. . . . .	154
3.4.3	Mesures en configuration $H/W = 1$ . . . . .	154
3.4.3.1	Configuration n°3 : Crépis rouge sur les 2 façades. . . . .	155
3.4.3.2	Configuration n°4 : Bardage blanc sur les 2 façades. . . . .	155
3.4.3.3	Configuration n°5 : Évaluation de l'impact de réflexions spéculaires. . . . .	156
3.4.4	Analyse des résultats en configuration $H/W = 1$ : Différences observées. . . . .	157
3.4.4.1	Analyse des relevés en façade Est. . . . .	159
3.4.4.2	Analyse des relevés en façade ouest. . . . .	160
3.4.4.3	Analyse des relevés au sol. . . . .	161
3.4.5	Reconstitution des coefficients de réflexion. . . . .	162
3.4.6	Mesures en configuration $H/W = 2$ . . . . .	164
3.4.6.1	Configuration n°7 : réflexions sur bardage blanc. . . . .	164

3.4.7	Analyse des résultats en configuration $H/W = 2$ . . . . .	165
3.4.7.1	Analyse des relevés en façade est. . . . .	165
3.4.7.2	Analyse des relevés en façade ouest. . . . .	166
3.4.7.3	Analyse des relevés au sol. . . . .	167
3.4.8	Reconstitution des coefficients de réflexion. . . . .	168
3.4.9	Perspective sur l'acquisition des mesures. . . . .	169
<b>3.5</b>	<b>Conclusions sur les mesures. . . . .</b>	<b>169</b>
<b>3.6</b>	<b>Perspectives. . . . .</b>	<b>169</b>

---

### 3.1 Introduction.

L'influence des propriétés de réflexion étant démontrée, il s'agit à présent de connaître les propriétés de réflexion des matériaux à simuler. Ce chapitre se décompose alors en deux principales sections. Dans un premier temps, les propriétés de réflexion des matériaux sont étudiées au niveau de leur surface. L'objectif est de définir une méthode permettant de déterminer la distribution énergétique après réflexion. Une méthodologie, reposant sur un modèle de Phong [146], est proposée. Elle permet de décomposer la réflexion en un mode lambertien et en un mode spéculaire. Dans un second temps, une étude à conditions réelles est réalisée. Bien que l'on parle de conditions réelles, il s'agit en réalité de succession de campagnes de mesures d'irradiances au sein d'un "canyon urbain" reconstitué par une maquette à échelle réduite. Différents matériaux, dont certains qualifiés au préalable en laboratoire, sont alors installés sur la maquette.

### 3.2 Variation des propriétés en fonction de la longueur d'onde : mesures spectrales.

Différentes mesures ont été réalisées. Certaines ont pour objectif de qualifier les propriétés spectrales de réflexion des matériaux en incidence normale. Ces mesures permettent d'obtenir les coefficients de réflexion de référence pour chaque matériau. Elles permettent également de confronter et valider les mesures du second type. Les mesures du second type ont pour objectif de qualifier les propriétés spectrales de réflexion des matériaux sous différentes incidences. Les mesures ainsi réalisées sont injectées dans les modèles de reconstitution des propriétés optiques en réflexion et permettent alors de dissocier la distribution énergétique après réflexion en part lambertienne et en part spéculaire.

#### 3.2.1 Appareils de mesure.

En fonction de l'objectif visé par les mesures, différents appareils ont été utilisés. Parmi ces appareils, on retrouve :

- **FieldSpec4**, est un spectroradiomètre de la marque Malvern Panalytical [154] qui permet de réaliser des mesures en laboratoire comme en extérieur. Cet appareil est notamment utilisé pour identifier les raies d'absorption propres à certains éléments chimiques, permettant ainsi leur identification.
- Un **spectromètre UV-VIS Lambda 950**. Celui-ci est équipé d'un accessoire de sphère intégrante ou d'un accessoire ARTA (Automated Reflectance/Transmittance Analyzer) en fonction des mesures désirées. Ces accessoires permettent respectivement de réaliser des mesures de spectre de réflexion en intégrant le faisceau rétro-diffusé sur l'ensemble de l'espace, ou de réaliser des mesures angulaires à angle d'incidence et angle de mesure fixés.

### 3.2.1.1 Spectromètre FieldSpec4.

Cet appareil (figure 3.1) permet de réaliser des mesures en irradiance normale, en extérieur comme en laboratoire. On obtient donc un spectre de réflexion fonction de la longueur d'onde. Cet appareil permet de mesurer le spectre de réflexion sur la bande spectrale 350 – 2500nm, couvrant les gammes du visible (*VIS*), du proche infra-rouge (*Near InfraRed - NIR*) et de l'infra-rouge courtes longueurs d'ondes (*Short Wave InfraRed - SWIR*). Chacune de ces bandes est mesurée avec un capteur spécifique. Chaque capteur est associé à un ensemble de fibres optiques, ne pointant pas exactement sur la même zone. Cela génère donc de légers "sauts" entre ces bandes. Le spectromètre de la marque *ASD* permet d'évaluer la réflectance spectrale absolue d'un matériau donné. L'appareil comporte sa propre source lumineuse et les différents accessoires de mesure permettent d'isoler la surface étudiée des sources parasites (mesure par contact). Les spectres ont été obtenus par des mesures « contact » : le pistolet contenant la source lumineuse du spectromètre et le capteur d'acquisition est plaqué contre l'échantillon que l'on souhaite étudier. Chaque groupe de fibres optiques ne pointant pas exactement sur la même zone de l'échantillon.



FIGURE 3.1 – Spectromètre *FieldSpec4* utilisé lors de la campagne de mesure réalisée sur le site de *Bruyère-le-Châtel*. image extraite du site constructeur.

Des mesures à distance ont également été réalisées sur la plateforme *INCAS* de l'*INES*. Un blanc sert de référence et permet de calibrer avant chaque mesure l'appareil. L'appareil réalise alors une mesure en réflectance et en éclairage naturel. Cela est possible grâce à la portabilité de l'appareil.



(a) Mesure du spectre de réflexion de référence  
 (b) Mesure du spectre de réflexion de l'échantillon

FIGURE 3.2 – Photographie des différentes étapes de mesure permettant d'obtenir le spectre de réflexion de l'échantillon testé. Les deux photographies ne correspondent pas à la même mesure (graviers sur celle de gauche, enrobé sur celle de droite).

### 3.2.1.2 Spectromètre UV-VIS-PIR Lambda 950

Le spectrophotomètre UV-VIS-PIR Lambda 950 permet d'effectuer des mesures optiques dans les domaines des Ultra-Violets (UV), du visible (VIS) et du proche infra-rouge (NIR). Cela correspond à une gamme spectrale allant de 175nm à 3300nm, avec une précision allant jusqu'à 0.05nm dans le domaine des UV et de 0.2nm dans le domaine du proche infra-rouge. Cet appareil peut être monté avec différents accessoires. Lors des mesures réalisées au cours de cette thèse, il a été équipé d'un accessoire nommé ARTA (Automated Reflectance/Transmittance Analyzer - figure 3.3) ou d'une sphère intégrante.

L'accessoire *ARTA* permet d'effectuer des mesures sur l'ensemble (ou une portion) du spectre défini au paragraphe précédent. Ces mesures sont réalisables pour différents angles d'incidence et pour différents angles de réflexion. Son mode de fonctionnement est décrit par Van Nijnatten, De Wolf et Schoofs [155]. On parle alors d'appareil dit "goniospectrophotomètre".

La sphère intégrante, détaillé dans les notes fournies par *Perkinelmer*<sup>®</sup>, permet de mesurer des spectres de réflexion pour un échantillon donné. L'ensemble des rayons réfléchis sur l'échantillon sont diffusés dans la sphère. Les réflexions totales successives

sur les parois intérieures de la sphère garantissent statistiquement que chaque rayon finira par arriver sur le capteur. On obtient ainsi le spectre de réflexion issu de l'ensemble des réflexions diffuses de l'échantillon [156].



(a) Lambda 950



(b) ARTA

FIGURE 3.3 – Spectrophotomètre UV-VIS-PIR Lambda 950 [155] et l'accessoire ARTA associé permettant de réaliser des mesures angulaires.

### 3.2.2 Choix des matériaux de mesure

Les échantillons sont des échantillons caractéristiques des matériaux composant les façades des bâtiments en zone urbaine. Le choix des crépis extérieurs s'est porté sur huit crépis et un enduit (échantillon C), tous d'une même marque typique du marché. Différentes couleurs ont été testées. Les couleurs choisies sont à la fois très variables, afin de mesurer l'impact du choix des couleurs sur le coefficient de réflexion, mais aussi très similaires pour certains crépis afin de mesurer les différences en terme de propriétés optiques pour des matériaux. La rugosité a également été qualifiée. Ces données sont récapitulées dans le tableau 3.1. Pour permettre la réalisation de plusieurs mesures sur différents échantillons, 3 échantillons ont été produits pour chaque revêtement. Ces derniers ont été dimensionnés de 15cm par 15cm. Cela a permis de réaliser 2 mesures par échantillon et ainsi produire 6 mesures pour chaque produit. La répétabilité des mesures a alors pu être vérifiée dans une certaine mesure.

On présentera à présent les résultats obtenus pour un crépis, les résultats obtenus pour chacun de ces crépis étant similaires et étant analysés selon le même processus. L'ensemble des coefficients de réflexion moyens obtenus est résumé tableau 3.1.

L'étude des modèles optiques de réflexion présentée dans la suite se concentre sur des échantillons d'un revêtement extérieur blanc (*Bard. Blanc*), noir (*Bard. Noir*) ou rouge (*Bard. Rouge*) typiques d'une marque connue de matériaux de façade extérieurs.

### 3.2.3 Spectres de réflexion en incidence normale.

On ne s'intéressera ici qu'à l'échantillon *Ech1701000*, de couleur *Pierre*. Les 6 courbes présentées figure 3.4 représentent chaque mesure spectrale réalisée sur l'un des 3 échantillons produits à partir de ce revêtement. On note que si l'on observe des écarts dans les intensités de réflexions mesurées, les profils sont similaires pour les 6 mesures. Cette tendance est identique pour l'ensemble des autres échantillons, ce qui tend à valider la répétabilité des mesures. Par ailleurs, si l'on observe plus précisément les intensités de réflexion relevées, elles sont relativement importantes (entre 75% et 90% dans le domaine du visible), ce qui caractérise la couleur blanche de cet enduit. Dans le proche infrarouge, la réflectivité de cet enduit reste relativement élevée (supérieure à 60%) malgré une décroissance constante de cette dernière lorsque les longueurs d'ondes augmentent. On constate également plusieurs raies d'absorption, dont une importante à 1900nm. On visualise également nettement les "sauts" entre les bandes spectrales, à 700 et 1400nm. Sur le spectre corrigé (figure b), ces sauts sont corrigés en rectifiant les mesures sur la première et dernière bande par rapport à la bande centrale qui est prise comme mesure de référence. Le "saut" est alors considéré comme un biais et les mesures sont corrigées en supprimant le "saut" observé et en recalibrant les mesures des premières et troisièmes bandes spectrales. Le coefficient de réflexion moyen pour cet échantillon est de 83% si l'on considère les mesures non corrigées, et de 84% pour les mesures corrigées. On considérera les mesures non corrigées comme les mesures de référence.

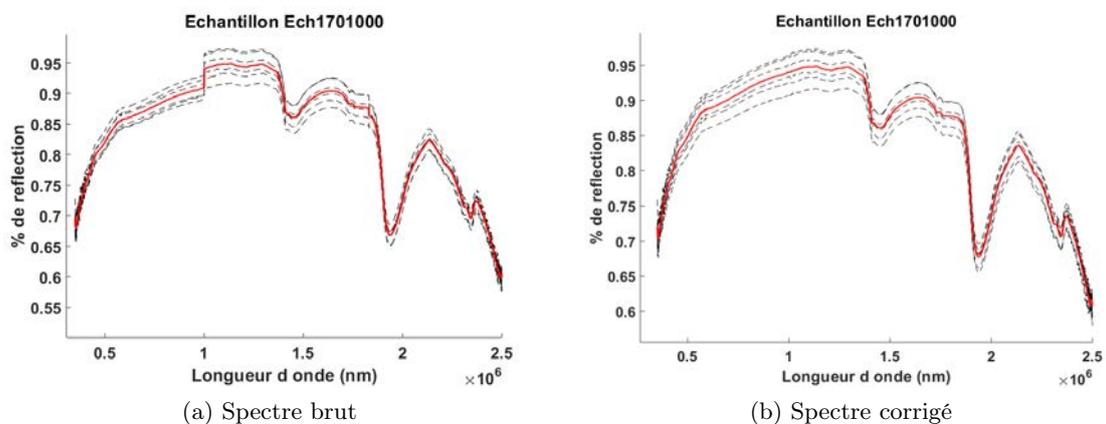


FIGURE 3.4 – Spectres de réflexion mesurés pour l'échantillon *Ech1701000*, brut et corrigé. Les courbes en pointillés noirs correspondent aux mesures, la courbe rouge à la mesure moyenne.

Sur l'ensemble des échantillons étudiés, on note que les échantillons de couleur claire ont un coefficient de réflexion principalement compris entre 70% et 80% (Tableau 3.1).

Les mesures dans cette partie ont été réalisées sur le site du CEA-DAM (Direction des Armements Militaires) situé à Bruyères le Châtel. Je remercie en particulier Rodolphe Marion qui m'a permis de réaliser ces mesures et pour son accueil.

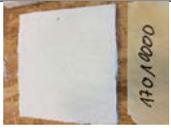
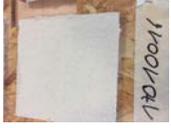
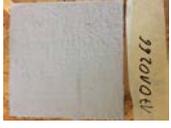
Echantillon	Couleur	Rugosité	Coefficient de réflexion moyen $\rho$	Photo
Ech1701000	Blanc	Fine	0.83	
Ech10810016	Beige	Fine	0.77	
Ech10810106	Rouge brique	Fine	0.63	
Ech10820318	Rouge anthracite	Fine	0.32	
Ech17010016	Beige	Aucune	0.77	
Ech17010083	Rose pâle	Importante	0.74	
Ech17010266	Gris	Fine	0.42	
Ech17010278	Vert cendre	Fine	0.82	
Ech13150330	Rouge brique	Fine	0.40	

TABLE 3.1 – Tableau illustratif des échantillons qualifiés spectralement lors de la campagne de mesures réalisées en juin 2018 à Bruyères le Châtel.

### 3.2.3.1 Mesures réalisées sur la plate forme INCAS.

La portabilité de l'appareil *FielSpec4* a également permis de réaliser des mesures en milieu extérieur, et en particulier sur la maquette et différentes surfaces de la plate-forme INCAS. Ces mesures sont réalisées à partir d'un protocole différent que celui utilisé en laboratoire. Ces mesures répondent au protocole suivant :

Deux mesures sont réalisées :

- Une première mesure de réflexion de référence, sur un blanc parfait, notée  $M_B$ .
- La mesure de l'échantillon étudié, notée  $M_E$ .

Les mesures sont réalisées en pointant, à l'aide de la fibre optique, la surface étudiée. On obtient alors le spectre de réflexion, noté  $S_R$ , à partir de la Formule 3.1. Cela correspond simplement à la normalisation du spectre de l'échantillon mesuré par la mesure du spectre de référence obtenu par réflexion sur l'élément blanc de référence.

$$S_R = \frac{M_E}{M_B} \quad (3.1)$$

### 3.3 Mesures sous différents angles d'incidences.

### 3.3.1 Nomenclature utilisée.

La nomenclature propre à cette partie est détaillée ci-dessous.

#### Angles

$\theta_o$	Angle de mesure	<i>rad</i>
$\theta_i$	Angle d'incidence	<i>rad</i>
$\theta_r$	Angle de réflexion théorique	<i>rad</i>
$\theta_t$	Angle de réfraction	<i>rad</i>
$\theta_{mes,ini}$	Premier angle de mesure (à angle d'incidence fixé)	<i>rad</i>
$\theta_{mes,fin}$	Dernier angle de mesure (à angle d'incidence fixé)	<i>rad</i>
$\theta_{step}$	Pas en angle pour les mesures réalisées à l'ARTA	<i>rad</i>
$\varphi_o$	Angle auquel se situe l'observateur (capteur) dans le plan de l'échantillon, par rapport à l'axe $\vec{y}$	<i>rad</i>
$\varphi_i$	Angle d'incidence dans le plan de l'échantillon, par rapport à l'axe $\vec{y}$	<i>rad</i>

#### Grandeurs physiques

$E_i$	Irradiance initialement incidente sur l'échantillon	$\text{Wm}^{-2}$
$E_{i,o}$	Irradiance réfléchi par l'échantillon	$\text{Wm}^{-2}$
$\Phi_i$	Flux initial émis par la source de l'appareil	W
$\Phi_o$	Flux réfléchi total	W
$\Phi_o^{s/d}$	Flux réfléchi issue des composantes spéculaires et diffuse	W
$L_i$	Luminance émise par la source	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
$L_o$	Luminance réfléchi	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
$L_o^{s/d}$	Luminance réfléchi issue des composantes spéculaires et lambertiennes	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
$I_o$	Intensité totale réfléchi	$\text{Wsr}^{-1}$
$I_o^{s/d}$	Intensité totale réfléchi issue des composantes spéculaires et lambertiennes	$\text{Wsr}^{-1}$

## Divers

$N$	Nombre de mesures réalisées (à angle d'incidence fixé)	-
$R_x$	Coefficients de réflexion issus des lois de Fresnel pour la polarisation $x$	-
$Z_0$	Impédance dans le vide	-
$Z_x$	Impédance du milieu $x$	-
$n_x$	Indice de réfraction du milieu $x$	-
$S_i$	Surface illuminée de l'échantillon	m <sup>2</sup>
$S$	Surface illuminée de l'échantillon	m <sup>2</sup>
$f_r(\theta_i, \theta_o, x)$	Fonction BRDF	sr <sup>-1</sup>
$\rho_x$	Indice de réflexion du modèle de BRDF, où $x$ correspond au mode de réflexion (spéculaire ou diffus)	-
$\alpha$	Coefficients de puissance du terme spéculaire de la fonction BRDF	-
$k_x$	Coefficients finaux obtenus après approximation de la fonction de BRDF, où $x$ représente l'indice du coefficient	-
$k_g$	Coefficient de réflexion global final	-
$r$	Mesure réalisée par l'ARTA	-

## Notations particulières

$$\cos_+(a) = \frac{\cos a + |\cos a|}{2} \text{ avec } a \in [0 : 2\pi]$$

### 3.3.2 Etat de l'art de la reconstitution de réflexions optiques.

L'objectif de ces mesures est d'identifier la distribution énergétique après réflexion. L'étude des modèles de réflexion amène à s'intéresser à un ensemble de propriétés. Parmi ces propriétés, on relève la réflexion, la transmission, l'opacité, la diffusion. Ces propriétés sont représentées au travers de fonctions, dont le nom apparaît souvent au format BxDF pour Fonction "X" Distribution Bidirectionnelle (Bidirectional "x" Distribution Function en anglais). Les fonctions de distribution BxDF sont principalement utilisées en infographie. Cette application est à rapprocher des études d'ensoleillement et d'éclairage en milieu urbain, notamment lorsque les propriétés de surface sont considérées. L'étude des fonctions utilisées dans la simulation de rendus visuels apparaît alors comme pertinente. Ces fonctions regroupent notamment les fonctions suivantes : BTDF (transmittance), BRDF (réflectance), BDF (BTDF et BRDF), BSSRDF (diffusion de surface en réflexion), BSSTDF (diffusion de surface en transmission) ou BSDF (BSSRDF et BSSTDF). Les propriétés de surface dépendent de l'espace, de la longueur d'onde, de la polarisation, ainsi que d'autres facteurs. Lorsque l'on considère la simulation de l'ensoleillement en milieu urbain, les fonctions rattachées à la famille des BRDF sont des fonctions couramment utilisées [157]. La lumière réfléchie sur les matériaux opaques composant la scène urbaine se divise généralement en deux composantes : la diffusion lambertienne et la réflexion spéculaire [158]. Ces fonctions de distribution sont également utilisées dans les calculs de rendement de technologie photovoltaïque bifaciale [159], avec pour objectif l'étude de l'impact de l'albédo sur la production. Les fonctions de transmission (BTDF) sont souvent utilisées pour évaluer les effets des vitrages sur l'éclairage intérieur [160, 161]. Pour les études d'ensoleillement en milieu urbain, les fonctions de réflexion (BRDF) ont l'avantage de considérer un seul et même point sur la surface pour l'énergie incidente et pour l'énergie réfléchie, tandis que différents points peuvent être envisagés en utilisant une fonction ayant un terme de transmission (BSSRDF) [162], comme le montre la figure (3.5). Dans le cadre de la thèse, seuls les modèles BRDF sont considérés.

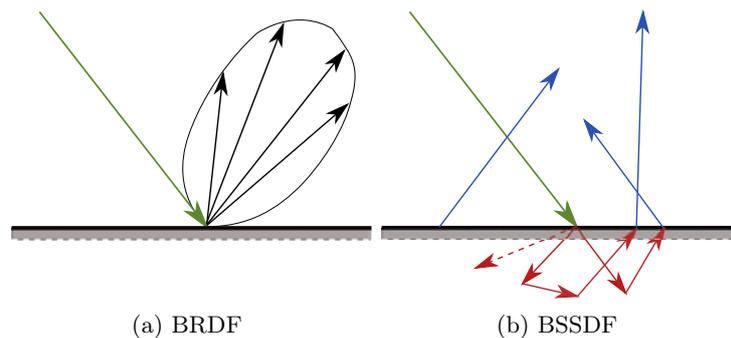


FIGURE 3.5 – Différenciation des fonctions *BRDF* et *BSSDF*.

Par ailleurs, dans leurs études, Collin et al. soulignent l'importance de considérer

les effets de la polarisation dans la modélisation des réflexions [163]. Cette précaution est particulièrement vraie si les apports lumineux sont pris en compte dans le processus de modélisation, et ce même si les propriétés de polarisation ne sont pas visuellement importantes. Notons que lorsque la polarisation est considérée dans les fonctions de distribution, on peut alors parler de BPDF (polarisées) [164]. Cependant, dans un contexte urbain, à l'image des études en transmission, les études portant sur les effets de la polarisation sont généralement liés aux études de transmission de la lumière [164].

Plusieurs modèles de BRDF existent [165]. Le modèle le plus célèbre et le plus historique est celui proposé par Phong [146]. Cependant, ce modèle n'est qu'une reconstitution de lumière incidente et n'est donc pas un BRDF. De même que le modèle de Lafortune [166]. Le modèle de Blinn-Phong [148] propose une formulation normalisée du modèle de Phong. Ce modèle correspond donc bien à une BRDF et assure ainsi la conservation de l'énergie. Cependant, le terme spéculaire peut devenir difficile à normaliser. Cela dépend notamment de la fonction du terme spéculaire choisi. D'autres modèles ont ainsi progressivement été développés afin de mieux prendre en compte la réflexion spéculaire. L'état de surface des matériaux, puis les problèmes de polarisation ont également été intégrés dans les modèles. Parmi les autres modèles, on peut noter celui de Cook-Torrance-Sparrow [150, 167]. Il s'agit du premier modèle de rendu physique. La surface est assimilée à un ensemble de surfaces miroirs respectant les lois de Fresnel [168]. Sous ces hypothèses, le modèle correspond à une distribution statistique de l'orientation de l'ensemble des surfaces. Basés sur une théorie des micro facettes, différents modèles existent [169].

Face à la diversité des modèles proposés dans la littérature, et tenant compte de la contrainte d'un modèle simple facilement intégrable dans les simulations d'ensoleillement en milieu urbain, cette section propose un nouveau modèle BRDF inspiré du modèle Blinn-Phong. Les coefficients de Fresnel y sont intégrés afin de prendre en compte les effets de la polarisation et des incidences rasantes.

### 3.3.3 BRDF (Bidirectional Reflectance Density Function).

#### 3.3.3.1 Définition.

Une fonction BRDF est définie comme un rapport entre la luminance réfléchie  $dL_o$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$  [170, 165, 171], qui correspond ici à la puissance par unité de surface de matériau réfléchissant par unité d'angle solide d'observateur) observé sur un angle solide infinitésimal  $d\Omega$  et l'irradiance incidente  $dE_i$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) sur ce matériau (équation 3.2) :

$$f_r = \frac{dL_o}{dE_i}. \quad (3.2)$$

Notons au passage que l'irradiance infinitésimale  $dE_i$  peut se réécrire de la façon suivante (équation 3.3) :

$$dE_i = dL_i \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.3)$$

Cette réécriture permet de modifier la définition fournie par l'équation 3.2, et d'obtenir l'équation 3.4.

$$f_r = \frac{dL_o}{dL_i \cos \theta_i d\omega_i}, \quad (3.4)$$

S'agissant ici de reconstruire une BRDF à partir de mesures réalisées avec un goniospectrophotomètre, l'irradiance incidente  $dE_{i_0}$  apportée par le pinceau lumineux de la source apparaît constante et ne doit alors pas être confondue avec  $dE_i$ . La relation entre ces deux grandeurs est illustrée par l'équation 3.5.

$$dE_{i_0} = dL_i d\omega_i = \frac{dE_i}{\cos \theta_i} \quad (3.5)$$

### 3.3.3.2 Transposition au cas d'étude.

Une fonction BRDF s'exprime en  $\text{sr}^{-1}$  et décrit la distribution angulaire issue de la réflexion d'une lumière réfléchi sur une surface. Comme détaillé ci-dessus, les propriétés radiatives dépendent de la position du point de réflexion et de la position angulaire de la source et de l'observateur. Seules les fonctions (BRDF) uniformes (dans l'espace) sont considérés ici et la dépendance est limitée à l'angle d'incidence zénithal,  $\theta_i$ , l'angle d'incidence azimutal  $\varphi_i$ , l'angle zénithal réfléchi  $\theta_o$  ainsi que l'angle azimutal réfléchi  $\varphi_o$ . La polarisation lumineuse  $x$  peut également être considérée :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o, x) = \frac{dL_o(\theta_o, \varphi_o, x)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, x)} \quad (3.6)$$

En utilisant un système de coordonnées sphériques basé sur le plan d'incidence (contenant à la fois la normale à l'échantillon et la direction de l'incident, voir figure 3.6), la dépendance à  $\varphi_i$  peut être omise et le BRDF s'écrit (en omettant la polarisation) :

$$f_r(\theta_i, \theta_o, \varphi_o) = \frac{dL_o(\theta_o, \varphi_o)}{dE_i(\theta_i)} \quad (3.7)$$

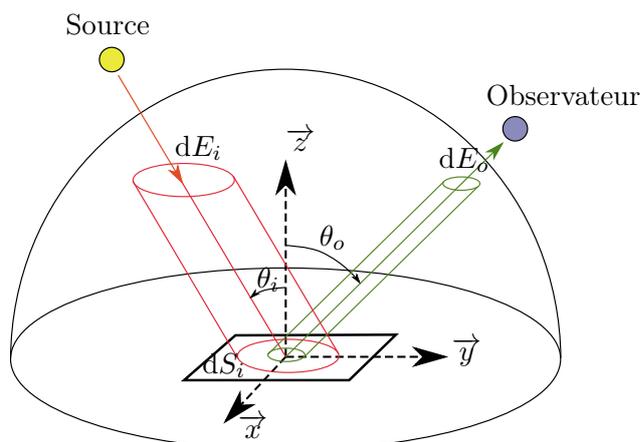


FIGURE 3.6 – Représentation schématique des axes et des angles lors de la mesure réalisée par l'ARTA (capteur).

Selon la définition, une fonction BRDF doit vérifier les deux propriétés suivantes :

- La réciprocité d'Helmoltz (équation 3.8) :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = f_r(\theta_o, \varphi_o, \theta_i, \varphi_i) \quad (3.8)$$

- La conservation de l'énergie (équation 3.9) :

$$\rho(\theta_i, \varphi_i) = \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) \cos \theta_o d\omega_o \leq 1, \quad \forall \theta_i, \varphi_i \quad (3.9)$$

### 3.3.4 Mesures réalisées à l'ARTA.

Comme évoqué plus haut, les mesures ont été réalisées à l'aide du spectrophotomètre 950 UV/VIS/PIR équipé d'un accessoire ARTA. Les matériaux sélectionnés ont été qualifiés à l'aide de cet appareil. Dans ce qui suit, l'échantillon testé, en particulier celui de bardage extérieur, sera simplement appelé "l'échantillon". Les mesures sont réalisées dans le plan d'incidence.

#### 3.3.4.1 Protocole de mesure.

Nous prédéfinissons 4 angles d'incidence différents : 20°, 30°, 45° et 55°. Le plus petit angle admissible pour l'accessoire ARTA si l'on souhaite effectuer une mesure de réflexion est 8°. L'angle d'incidence est noté  $\theta_{inc}$ . Pour chaque angle d'incidence, nous définissons différents angles de mesure en réflexion, échelonnés par pas de 3°. Le tableau 3.7 indique le nombre de mesures effectuées pour chaque configuration. La première colonne intitulée

$\theta_{inc}$  correspond à l'angle d'incidence de l'échantillon. Les colonnes  $\theta_{mes,ini}$  et  $\theta_{mes,fin}$  correspondent respectivement aux angles minimum et maximum pour lesquels une mesure en réflexion a été effectuée.  $\theta_{step}$  indique le pas de l'angle de mesure lors de la mesure. La dernière colonne,  $N$ , correspond alors au nombre d'angles de mesure à angle d'échantillon fixé.

$\theta_{inc}$	$\theta_{mes,ini}$	$\theta_{mes,fin}$	$\theta_{step}$	$N$
20	15	105	3	10
30	15	114	3	10
45	15	126	3	11
55	15	141	3	12

FIGURE 3.7 – Table récapitulative des angles de mesures.

### 3.3.4.2 Interprétation des mesures.

L'ARTA mesure la fraction  $r$  de l'énergie réfléchi par l'échantillon qui est interceptée par le capteur. On constate que cela, au moins dans le cas des échantillons de bardage, dépend de l'angle d'incidence  $\theta_i$ , de l'angle d'observation  $\theta_o$  et de la polarisation de la lumière  $x$ . Avec  $dE_i$  l'énergie incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) et  $dE_o$  l'énergie interceptée par le capteur qui a un angle d'ouverture  $d\Omega$  cela s'écrit (équation 3.10) :

$$r(\theta_i, \theta_o, x) = \frac{dE_o}{dE_i} = \frac{dL_o d\Omega}{dE_i} = f_r(\theta_i, \theta_o, x) d\omega_o. \quad (3.10)$$

Le détail des flux initial et réfléchi  $\Phi_i$  et  $\Phi_o$  au sein du dispositif ARTA permet d'exprimer la mesure selon le modèle proposé. Les puissances initiales et sortantes sont définies comme suit (équation 3.11) :

$$\begin{aligned} \Phi_i &= dE_i dS \\ \Phi_o &= dE_o dS \end{aligned} \quad (3.11)$$

Les mesures brutes obtenues avec l'accessoire ARTA sont présentées figure 3.8. Ces figures présentent les mesures réalisées pour l'ensemble des angles d'incidences. A angle d'incidence donné, on observe que pour chaque polarisation, la réflexion maximale mesurée correspond bien à l'angle de réflexion théorique des lois de Snell-Descartes. L'amplitude de cette réflexion présente différents comportements d'atténuation en fonction de la polarisation. Lorsque l'angle d'incidence est croissant, la radiance issue de la réflexion en polarisation P diminue tandis que celle de la radiance issue de la polarisation S augmente (figure 3.8). A cause de ces effets de polarisations, les résultats obtenus rappellent les lois de l'optique géométrique décrites par Fresnel.

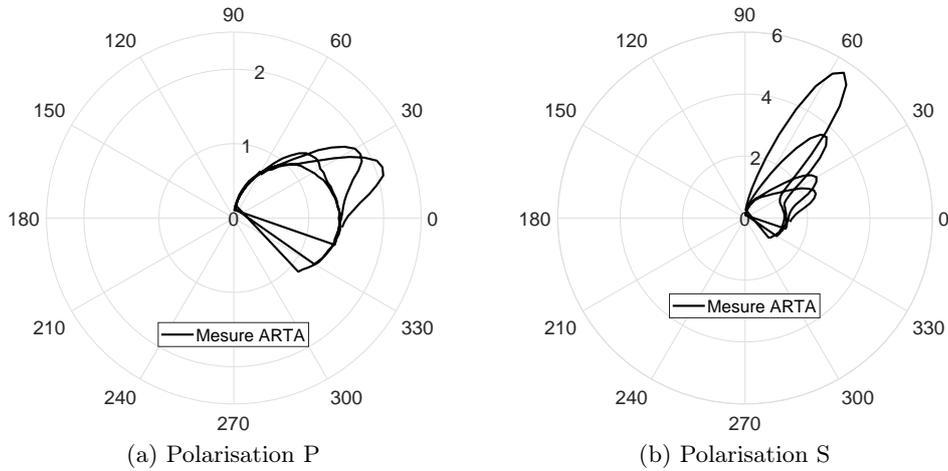


FIGURE 3.8 – Mesures brutes issues de l'ARTA.

L'analyse des mesures brutes de l'ARTA se distingue selon les termes diffus et spéculaires. La conversion des mesure vers le modèle de BRDF se fait selon les fonctions de passages détaillées ci-dessous.

**Terme lambertien.** En se référant au terme de réflexion diffuse du modèle, le flux sortant issue de la diffusion lambertienne  $\Phi_o^d$  (W) peut s'écrire comme présenté par l'équation 3.12 :

$$\Phi_o^d = \rho_d \frac{\Phi_i}{\pi} \cos(\theta_o) d\omega_o \quad (3.12)$$

La luminance réfléchié par une surface infinitésimale s'écrit alors (équation 3.13) :

$$dL_O^d = \rho_d \frac{\Phi_i}{\pi dS} \cos(\theta_o) \quad (3.13)$$

En utilisant la définition de BRDF, et notamment la conservation de l'énergie, nous obtenons le terme diffus détaillé équation 3.14 :

$$f_r^d(\theta_i, \theta_o, x) = \frac{dL_d}{dE_i} = \rho_d \frac{\Phi_i}{\pi dS} \cos(\theta_o) \frac{1}{dE_i} \quad (3.14)$$

**Terme spéculaire.** Le terme spéculaire peut se construire de manière similaire à ce qui a été précédemment réalisé pour le terme diffus (équation 3.15). La formulation en

en  $\cos^\alpha$  est une structure classique depuis son utilisation par Phong [147].

$$\begin{cases} M_o^s &= R_x \cos(\theta_s)^\alpha \frac{\rho_s \Phi_i}{2\pi} d\omega_o \\ dL_s &= R_x \cos(\theta_s)^\alpha \frac{\rho_s \Phi_i}{2\pi} dS \end{cases} \quad (3.15)$$

$R_x$  est ici le coefficient de Fresnel associé à la polarisation  $x$  (alternativement S ou P).

Le terme spéculaire est ainsi obtenu (équation 3.16) :

$$f_r^s(\theta_i, \theta_o, x) = \frac{dL_s}{dE_i} = R_x \cos(\theta_s)^\alpha \frac{\rho_s \Phi_i}{dE_i \frac{2\pi}{\alpha+1} dS} \quad (3.16)$$

**Analyse des mesures complètes.** A partir des calculs détaillés précédemment sur chacun des termes diffus et spéculaire, on obtient 3.17 :

$$\begin{aligned} \Phi_o^d + \Phi_o^s &= \left( f_r^d(\theta_i, \theta_o, x) + f_r^s(\theta_i, \theta_o, x) \right) dE_i dS d\omega_o \\ &= f_r(\theta_i, \theta_o, x) dE_i dS d\omega_o \end{aligned} \quad (3.17)$$

Dès lors la mesure réalisée peut s'écrire de la façon suivante (équation 3.18) :

$$r(\theta_i, \theta_o, x) = \frac{dE_o}{dE_i} = \frac{\Phi_o}{dE_i dS} = f_r(\theta_i, \theta_o, x) d\omega_o \quad (3.18)$$

### 3.3.5 Equations de Fresnel.

Les équations de Fresnel permettent de décrire la distribution d'énergie d'un rayonnement électromagnétique à l'interface de deux matériaux optiques. Ces équations détaillent la différence de comportement optique en fonction de la polarisation. La réflectance et la composante de transmittance sont détaillées pour les polarisations S et P. Ces équations sont vérifiées sous les hypothèses suivantes : l'interface entre les deux milieux est plane et les deux milieux sont homogènes et isotropes. Les coefficients de réflexion pour la lumière polarisée S et P s'écrivent tels que définis dans l'équation 3.20.

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right|^2 \quad (3.19)$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 \quad (3.20)$$

Rappelons que dans le cadre des équations de Fresnel, le coefficient de réflexion est calculé de la manière suivante pour la polarisation  $S$  (perpendiculaire) :

$$R_s = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right|^2 \quad (3.21)$$

Pour la polarisation  $P$  (parallèle), il est calculé comme suit :

$$R_p = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \right|^2 \quad (3.22)$$

Les deux milieux sont ici non magnétiques. Les impédances ne dépendent alors que des indices de réfraction des deux milieux :

$$Z_i = \frac{Z_0}{n_i} \text{ with } i = 1, 2 \quad (3.23)$$

Les équations de Snell-Descartes nous amènent aux relations suivantes (équations 3.24 et 3.25) :

$$R_s(n_1, n_2, \theta_i, \theta_o) = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right|^2 \quad (3.24)$$

$$R_p(n_1, n_2, \theta_i, \theta_o) = \left| \frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 \quad (3.25)$$

L'indice de réfraction dans le vide  $n_1$  étant égal à 1.00003,  $R_s$  et  $R_p$  sont indépendants de  $n_1$ .

### 3.3.6 Détermination de l'indice de réfraction de l'échantillon.

Les mesures étant effectuées dans l'air, l'indice de réfraction  $n_1$  est donc égal à 1.00003. La définition de l'indice de réfraction du milieu réfléchissant reste indéfinie dans la mesure où il s'agit d'un milieu opaque. Cependant, l'observation d'une forte dépendance en fonction de la polarisation sur les mesures réalisées à l'ARTA, les coefficients de réflexion donnés par les équations de Fresnel seront considérés. L'indice de réfraction de l'échantillon sera alors considéré comme un paramètre du modèle BRDF. Bien qu'il ne soit pas transparent, l'échantillon présente un angle d'extinction. A angle d'incidence donné, cet angle s'apparente à une extinction de la réflexion pour la polarisation P. Cet angle, noté  $\theta_B$ , est appelé angle de Brewster (équation 3.26) :

$$\theta_B = \text{atan} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.26)$$

Cependant, en l'absence de résolution de l'angle d'incidence autour de l'angle de Brewster, cette relation est peu pratique pour déterminer l'indice de réfraction  $n_2$  de l'échantillon. Pour palier ce soucis, l'indice  $n_2$  sera considéré comme un des paramètres du modèle à identifier lors de l'approximation des mesures.

### 3.3.7 Construction du modèle de BRDF.

En infographie, comme le souligne Kumar dans son article [172], il est habituel de considérer que la réflexion de la lumière sur une surface donnée se décompose selon trois modes (figure (3.9)). Ces trois termes correspondent à un terme spéculaire, un terme uniforme et un terme brillant. Si la surface de réflexion est elle-même une source de lumière, un quatrième terme est considéré. Il représente l'énergie émise par la surface elle-même. La composante uniforme décrit l'ensemble des réflexions non directionnelles, tandis que les composantes spéculaire et brillante décrivent l'ensemble des réflexions ayant une probabilité dépendante de la direction. Le terme spéculaire décrit la réflexion issue des lois de Snell-Descartes. Ce mode de réflexion s'apparente à une fonction de Dirac dans la direction théorique de réflexion. Le terme brillant ("glossy" en anglais) représente une modulation autour de cette direction théorique.

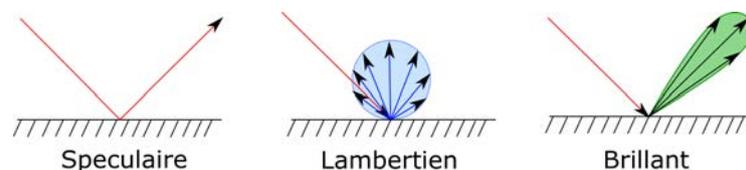


FIGURE 3.9 – Rappel des schémas des différents modes de réflexions, notamment utilisés dans le domaine de l'infographie.

Dans cette étude, le modèle BRDF pour l'échantillon ne comporte qu'un terme diffus, et un terme brillant. Cette hypothèse est similaire à celle du modèle de Blinn-Phong [148]. L'énergie absorbée par l'échantillon n'est pas considéré. Dès lors en considérant le flux incident sur le matériau échantillon  $\Phi_i = E_i S_i$ , le flux réfléchi de sortie peut se décomposer en une partie spéculaire et une partie diffuse (Équation 3.27) :

$$\Phi_o = \Phi_o^s + \Phi_o^d. \quad (3.27)$$

Nous allons à présent détailler la construction de chacun des termes du modèle de BRDF.

### 3.3.7.1 Construction du terme diffus.

Le terme diffus correspond à la lumière incidente diffusée dans toutes les directions. La direction de réflexion est équiprobable dans l'espace et reste indépendante de la polarisation. Cependant, l'intensité totale dépend de l'angle d'observation. Cela se traduit par la loi de cosinus de Lambert. On note  $\rho_d$  le coefficient de réflexion associé au terme diffus. L'intensité totale réfléchie  $I_o^d$  ( $\text{Wsr}^{-1}$ ) issue de la réflexion diffuse se traduit par l'équation suivante (équation 3.28) :

$$I_o^d = \rho_d \frac{1}{\pi} \cos(\theta_o) E_i S_i. \quad (3.28)$$

Le terme de réflexion diffuse dans le modèle de BRDF est alors identifié (équations 3.29) :

$$f_d(\theta_i, \theta_o) = \rho_d \frac{1}{\pi} \cos(\theta_o). \quad (3.29)$$

### 3.3.7.2 Construction du terme brillant.

La partie spéculaire est supposée suivre la loi de Fresnel. L'intensité totale associée aux réflexions spéculaires est alors donnée par la relation suivante (équation 3.30) :

$$I_o^s = k_s R_x \Phi_i. \quad (3.30)$$

où  $R_x$  correspond au coefficient de réflexion de Fresnel pour la polarisation  $x$ . De plus, l'intensité radiante ( $\text{W/sr}$ ) est supposée avoir une forme de "plumet" autour de la

direction spéculaire. En remplaçant  $k_s$ , cela se traduit par l'équation suivante (équation 3.31) :

$$\Phi_o^s = \rho_s R_x \frac{\alpha + 1}{2\pi} \left( \cos_+(\theta_s) \right)^\alpha E_i S_i. \quad (3.31)$$

avec  $\theta_s$  l'angle zénithal défini à partir de la direction spéculaire. Pour les valeurs de  $\theta_s$  supérieures à  $\pi/2$ , il n'y a pas de contribution de la réflexion spéculaire. Cela se traduit par la notation  $\cos_+$ . Comme dans le modèle de Lafortune, le terme spéculaire est piloté par deux coefficients  $\rho_s$  et  $\alpha$ . Le coefficient  $\rho_s$  correspond à l'amplitude du "plumet" décrit par la BRDF. Le coefficient  $\alpha$  correspond à l'effet diffus de cette réflexion, et traduit ainsi l'effet brillant. Il pondère la largeur du panache brillant. Enfin, le coefficient de Fresnel  $R_x$  est fonction de l'indice de réfraction de l'échantillon. On a donc ici un paramètre supplémentaire par rapport au modèle de Blinn-Phong. Ce modèle spéculaire est décrit par la fonction suivante (équation 3.32) :

$$f_s(\theta_i, \theta_o, x) = \rho_s R_x \frac{\alpha + 1}{2\pi} \left( \cos_+ \left( \theta_s(\theta_i, \theta_o) \right) \right)^\alpha. \quad (3.32)$$

### 3.3.7.3 Modèle complet et analyse des mesures de l'ARTA.

A partir des termes diffus et spéculaire, on obtient le modèle complet de la BRDF (équation 3.33) :

$$f_r(\theta_i, \theta_o, x) = \rho_d \frac{1}{\pi} \cos(\theta_o) + \rho_s R_x \frac{\alpha + 1}{2\pi} \left( \cos_+ \left( \theta_s(\theta_i, \theta_o) \right) \right)^\alpha. \quad (3.33)$$

Comme indiqué auparavant, le signal mesuré par l'ARTA correspond à un rapport d'énergie. En supposant un angle d'ouverture infinitésimal pour le capteur, noté  $d\omega_c$ , on peut obtenir le flux incident sur le capteur à partir de l'intensité totale réfléchie (équation 3.34) :

$$\Phi_o = L_o d\omega_c \text{ avec } I_o = I_o^s + I_o^d. \quad (3.34)$$

Les mesures réalisées à l'ARTA étant effectuées avec le récepteur situé dans le plan d'incidence, cela implique  $\theta_s = |\theta_o - \theta_i|$  lorsque  $\phi_o = \pi$ . En divisant par le flux initial, fourni en entré dans l'appareil, on peut alors retrouver la valeur mesurée par l'appareil ARTA (équation 3.35) :

$$r(\theta_i, \theta_o, \phi_o, x) = \left( \rho_d \frac{1}{\pi} \cos(\theta_o) + \rho_s R_x \frac{\alpha + 1}{2\pi} \left( \cos_+(\theta_o - \theta_i) \right)^\alpha \right) d\omega_c. \quad (3.35)$$

### 3.3.7.4 Calcul des coefficients de réflexion.

Pour les deux composants BRDF et pour chaque polarisation, les coefficients de réflexion sont obtenus en intégrant la BRDF sur le demi-espace supérieur de l'échantillon. Ils dépendent de la longueur d'onde. Leur dépendance en polarisation et en angle d'incidence est prise en compte à travers le coefficient de Fresnel (équation 3.36).

$$\begin{cases} k_d(x) = \int_{\theta_o=0}^{\pi/2} \int_{\varphi_i=0}^{2\pi} f_d(\theta_i, \theta_o, \phi_o, x) \sin \theta_o d\theta_o d\phi_o = \rho_d \\ k_s(\theta_i, x) = \int_{\theta_s=0}^{\pi/2} \int_{\varphi_i=0}^{2\pi} f_s(\theta_i, \theta_o, \phi_o, x) \sin \theta_o d\theta_o d\phi_o = \rho_s R_x(\theta_i) \end{cases} \quad (3.36)$$

Le coefficient de réflexion global est obtenu en additionnant les coefficients de réflexion diffuse et spéculaire (équation 3.37) :

$$k_g(x) = k_d(x) + k_s(x). \quad (3.37)$$

Afin de prendre en compte les deux polarisations dans le coefficient de réflexion global, la contribution de chaque polarisation est moyennée (équation 3.38) :

$$k_g(\theta_i) = \frac{k_g(\theta_i, S) + k_g(\theta_i, P)}{2}. \quad (3.38)$$

### 3.3.8 Approximation des données par le modèle.

#### 3.3.8.1 Analyse des mesures sans corrections.

Pour ajuster les paramètres du modèle de la BRDF, une méthode des moindres carrés est utilisée. Le modèle est ajusté sur l'ensemble des mesures, soit l'ensemble des angles de réflexion et des angles d'incidence, mais longueur d'onde par longueur d'onde. Concernant la polarisation, le modèle est approximé au choix sur les deux polarisations en même temps, ou sur chaque polarisation de manière indépendante. L'approximation du modèle est effectué en utilisant la fonction `lsqcurvefit` de Matlab.

### 3.3.8.2 Correction de la mesure ARTA.

Dans cette étude, le capteur utilisé par l'ARTA a une ouverture de  $26\text{mm}$  et la hauteur de cette ouverture était de  $18\text{mm}$ . Dans cette configuration, cela correspond à une ouverture angulaire de  $-13^\circ$  à  $+13^\circ$  par rapport à l'angle de mesure défini. Selon l'axe orthogonal au plan de mesure, l'angle d'ouverture est de  $-9^\circ$  à  $+9^\circ$  par rapport à l'angle de mesure fixe. Cela donne un angle d'ouverture du capteur solide  $d\omega_c = 0,0516 \text{ sr}^{-1}$ . En minimisant la différence entre les mesures théoriques et réelles, on peut ainsi affiner l'étalonnage des coefficients du modèle BRDF. La prise en compte de l'ouverture selon l'angle d'azimut uniquement, permet d'obtenir la relation suivante (équation 3.39) :

$$r(\theta_i, \theta_o, \phi_o, x) = \frac{d\omega_c}{2\Delta\theta} \int_{\theta_o-\Delta\theta}^{\theta_o+\Delta\theta} f_r(\theta_i, \theta, \phi_o, x) d\theta, \quad (3.39)$$

Cette nouvelle relation peut alors être utilisée pour corriger l'approximation des mesures par le modèle de BRDF.

### 3.3.8.3 Prise en compte des incertitudes.

En effectuant une régression non linéaire, il est possible d'évaluer les incertitudes des paramètres du modèle ajusté, soit  $\rho_s$ ,  $\rho_p$  et  $\alpha$ , ainsi qu'éventuellement  $n_2$ . L'utilisation de la fonction `nlparcy` proposée par Matlab<sup>®</sup> fournit les intervalles de confiance à 95% pour chaque coefficient. En injectant ces incertitudes dans les calculs des coefficients, nous pouvons évaluer les incertitudes pour les coefficients des réflexions lambertiennes et spéculaires finales. Cependant, la fonction `nlparcy` Matlab<sup>®</sup> nécessite la matrice de covariance ou la matrice jacobienne issues de l'approximation des données par la BRDF. Une utilisation de la fonction `nlinfit` (également issue de Matlab<sup>®</sup>) est alors préalablement nécessaire. Pour chaque longueur d'onde, les incertitudes obtenues sur les différents coefficients sont prises en compte dans le calcul des coefficients de réflexion finale.

### 3.3.8.4 Validation des résultats.

Afin de vérifier les résultats obtenus grâce au modèle de BRDF, les échantillons sont également testés à l'aide d'une sphère d'intégration montée dans un goniospectrophotomètre Lambda 950 Perkin Elmer<sup>®</sup>. Ce dispositif mesure le coefficient de réflexion global (diffusé plus spéculaire) en fonction de la longueur d'onde. La sphère d'intégration a une incertitude de 1%. Ces mesures sont ensuite comparées au coefficient de réflexion global obtenu à partir de la BRDF, tel que reconstitué à l'aide de l'accessoire ARTA, et ce pour différentes longueurs d'onde.

### 3.3.8.5 Résultats par polarisation.

La BRDF obtenue, après ajustement du modèle, est tracée pour chaque polarisation (figure (3.10)). Cependant, pour l'échantillon étudié, les différences entre les modèles corrigés et non corrigés, restent infimes et imperceptibles. L'étude montre également que pour la polarisation P, et pour un angle d'incidence de  $45^\circ$ , le modèle présente des difficultés pour ajuster correctement les mesures. La réflexion spéculaire mesurée semble être trop importante dans cette seule configuration pour correspondre au modèle.

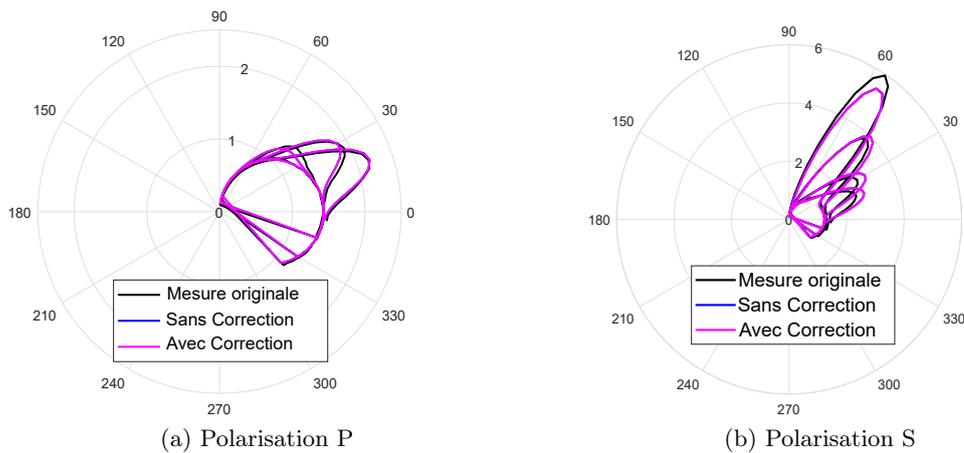


FIGURE 3.10 – Modèle adapté des mesures de l'ARTA

L'analyse des coefficients de réflexion (figure 3.11) reconstruits à partir des mesures et du modèle révèle un saut à la longueur d'onde de 860 nm. Cet écart coïncide à un changement de capteur et de source qui s'effectue à 860 nm. Une rencontre avec les ingénieurs de OMT solutions a permis de savoir que cet effet est connu et correspond en partie à une perte de signal de la source sur cette bande spectrale. Dans notre cas ce phénomène est amplifié par l'épaisseur de l'échantillon. Des mesures complémentaires en incidence "négative" permettraient d'améliorer le calcul du coefficient de réflexion issu de la BRDF. Dans la bande spectrale supérieure à 860 nm, qui correspond au proche infra-rouge (*NIR*), les coefficients de réflexion globaux obtenus correspondent à ceux obtenus avec la sphère d'intégration. On observe des fluctuations similaires en fonction de la longueur d'onde, avec un spectre de réflexion compris dans la plage d'incertitude des spectres reconstruits. Les fluctuations observées, qui coïncident avec celles du spectre de référence, sont essentiellement dues au coefficient diffus. Le coefficient spéculaire est constant sur la plage de longueurs d'onde étudiée.

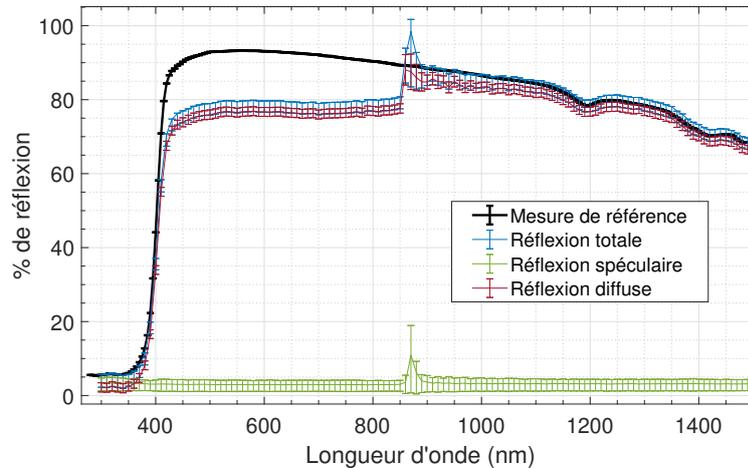


FIGURE 3.11 – Coefficients de réflexion globale pour les deux polarisations en fonction de la longueur d'onde obtenue avec le modèle BRDF, pour les paramètres non corrigés et corrigés, par rapport aux mesures de la sphère intégrante.

### 3.3.8.6 Obtention des coefficients finaux.

Pour chaque longueur d'onde, les coefficients du modèle sont approximés. Quelque soit la stratégie d'approximation choisie, le modèle permet d'obtenir les coefficients de réflexion en fonction de la longueur d'onde (figure 3.12). Le coefficient de réflexion est largement sous-estimé avant 860 nm, avec 10% de réflexion en moins par rapport à la mesure de référence réalisée à la sphère intégrante, en raison des phénomènes expliqués au paragraphe précédent. Après le changement de capteur situé à 860 nm, les intervalles de confiance de la mesure de référence et de la mesure BRDF reconstruite se recourent. De nouveau, le coefficient de réflexion spéculaire est relativement constant (environ 4%) sur toutes les longueurs d'onde, excepté à 870 nm et 880 nm, soit près du changement de capteur.

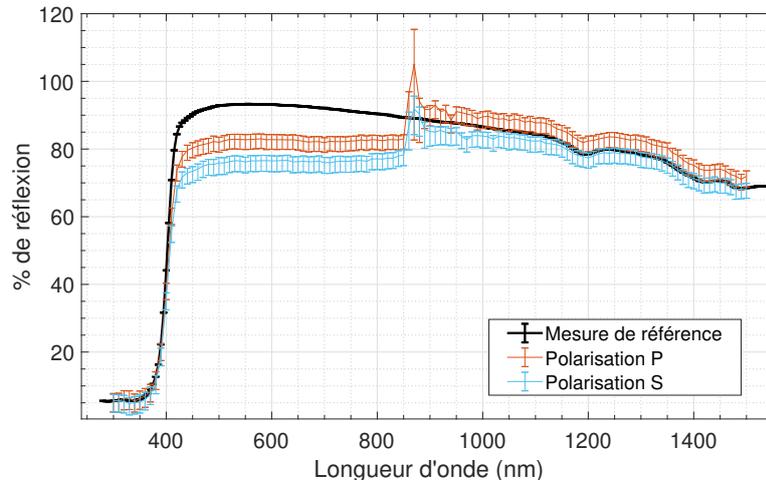


FIGURE 3.12 – Coefficients de réflexion globale, diffuse et spéculaire en fonction de la longueur d'onde et moyennés entre les polarisations avec le modèle BRDF, par rapport aux mesures de la sphère intégrante.

Si nous évaluons les coefficients obtenus à partir des mesures sans tenir compte des polarisations (figure 3.13), le profil des courbes reste similaire. Cependant, la sous-estimation avant 860 nm est réduite. Nous pouvons également noter que l'impact du changement de capteur est moins important sur le coefficient spéculaire. L'estimation du coefficient global après 860 nm est similaire.

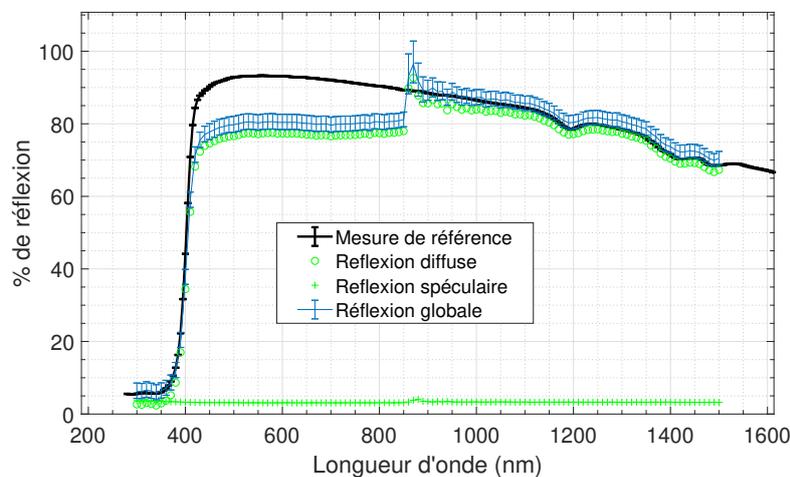


FIGURE 3.13 – Coefficients de réflexion globale, diffuse et spéculaire en fonction de la longueur d'onde obtenus avec le modèle BRDF, par rapport aux mesures de la sphère intégrante.

En ce qui concerne l'indice de réfraction du matériau de surface de l'échantillon

(figure 3.14), les tendances sont différentes entre les 2 polarisations. Si l'indice de réfraction est presque constant pour la polarisation S, il est décroissant pour la polarisation P. Des valeurs différentes de l'indice de réfraction selon la polarisation de la lumière correspondent à une propriété physique appelée biréfringence. Ici, les valeurs sont trop différentes pour être expliquées par la biréfringence d'un matériau physique.

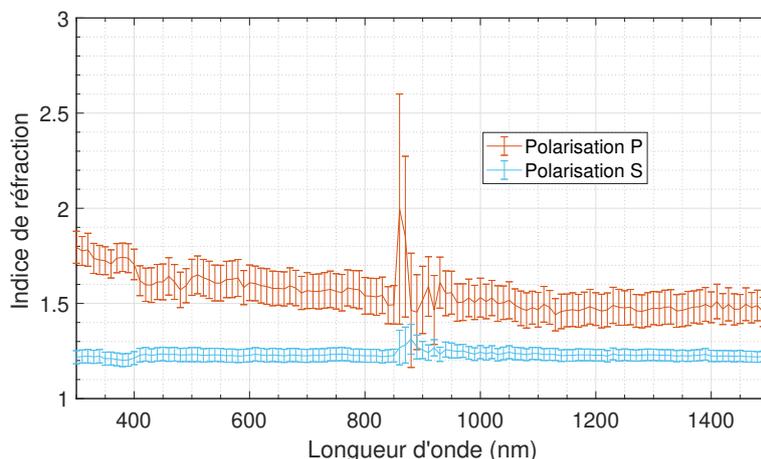


FIGURE 3.14 – indice de réfraction obtenu pour chaque polarisation.

Si l'on considère l'ajustement commun à toutes les données (figure 3.15), l'indice de réfraction obtenu est plus constant (1,24), semblable au coefficient de réfraction obtenu en polarisation S figure (3.14).

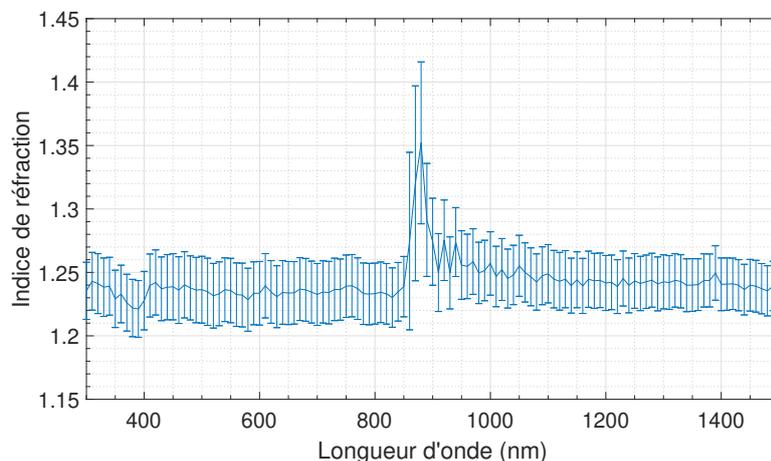


FIGURE 3.15 – Indice de réfraction obtenu pour une approximation simultanée sur l'ensemble des données sans distinguer la polarisation.

### 3.3.9 Résultats pour les différents matériaux qualifiés.

Des résultats supplémentaires sont fournis en Annexe B.

Le tableau suivant récapitule les valeurs des coefficients de réflexion obtenus, en pourcentage, pour chaque matériau et pour chaque nature de réflexion.

Matériau	$k_{tot}$	$k_s$	$k_d$
Bardage Blanc	74.0	3.2	70.8
Bardage Rouge	20.0	2.7	17.3
Bardage Noir	3.8	2.6	1.2
BK7	10.94	10.92	0.02

TABLE 3.2 – Coefficients de réflexion reconstruits à partir des mesures réalisées à l'ARTA.

### 3.3.10 Validation de l'hypothèse de Fresnel.

La forme de la surface des échantillons a été observée à l'aide d'un profilomètre de surface de la marque TraceIt et d'un microscope optique. L'objectif est ici d'apporter des éléments de réponse, par observation de l'état de surface des échantillons, justifiant l'hypothèse de la réflexion de Fresnel.

#### 3.3.10.1 Observations au microscope optique.

Les observations au microscope optique permettent de valider la présence d'un vernis à la surface. L'épaisseur mesurée du vernis est de 24,3  $\mu\text{m}$ . La surface extérieure du vernis semble être relativement lisse. Les reliefs sont peu marqués et réguliers. La photographie 3.16 montre une image prise au microscope optique avec un grossissement de x10. La distance  $\Delta_L$  entre 2 sommets est notée, ainsi que la différence d'altitude  $\Delta_H$  entre le point le plus bas et le point le plus haut notée sur cette image.

$\Delta_H$	15 $\mu\text{m}$
$\Delta_L$	918 $\mu\text{m}$

TABLE 3.3 – Valeurs enregistrées en post-traitement sur l'échantillon observé au microscope optique.

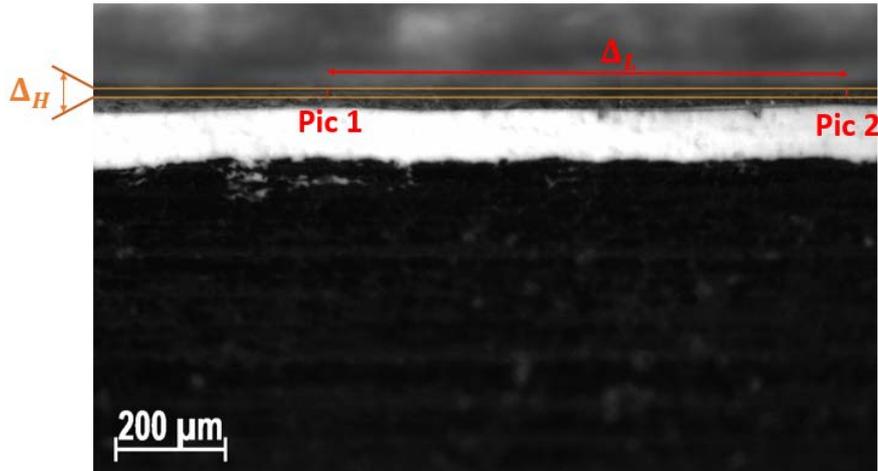


FIGURE 3.16 – Photographie de l'échantillon prise sous un microscope optique avec un grossissement de  $\times 10$ .

### 3.3.10.2 Mesures réalisées au granulométrimètre TraceIt®.

Les observations réalisées avec le granulométrimètre TraceIt® permettent d'évaluer la granulométrie sur une plus grande surface. Elles confirment les observations effectuées au microscope optique.

Les hypothèses de Fresnel sont ainsi validées pour cet échantillon, en particulier sur les zones d'observation planes. Elles apportent une explication à la composante spéculaire dans les réflexions. Une rugosité absolue  $R_a$  (équation (3.40)) est évaluée à  $R_a = 3.99$  dans la direction  $x$  et à 4.25 dans la direction  $y$ . Ces valeurs sont similaires aux valeurs rencontrées dans le cas d'une très bonne peinture au pistolet [173].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx. \quad (3.40)$$

Avec  $l$  est la longueur de l'échantillonnage et  $Z(x)$  la différence d'altitude relevée au point  $x$  le long de l'axe d'échantillonnage par rapport à l'altitude moyenne.

La figure 3.17 montre une vue de 5mm x 5mm de l'échantillon, où la topographie de la surface apparaît en couleur. La distance entre les 2 pics principaux est d'environ 1mm. Cette distance correspond aux observations faites au microscope optique. L'altitude moyenne enregistrée est de 25 $\mu\text{m}$ , le point le plus bas étant à une altitude de 0 $\mu\text{m}$ . L'altitude de l'échantillon fluctue entre +20 $\mu\text{m}$  et -20 $\mu\text{m}$ .

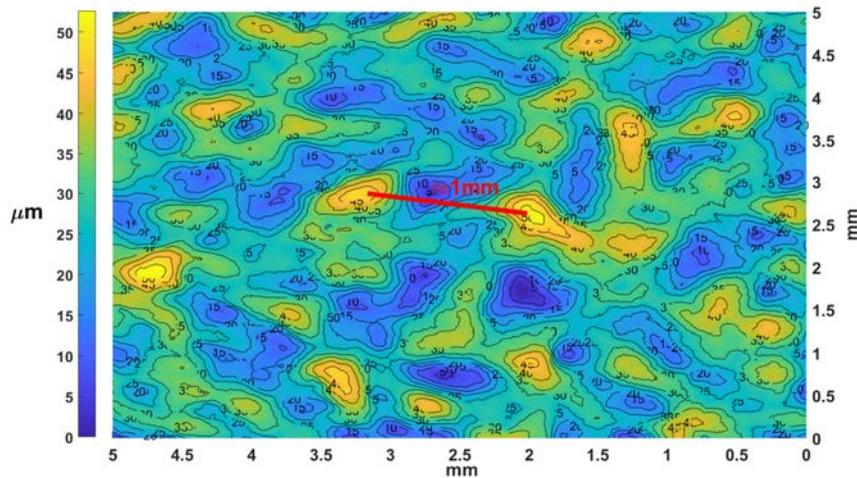


FIGURE 3.17 – Topographie de la surface de l'échantillon réalisée à l'aide du dispositif TraceIt<sup>®</sup> et reconstruite à l'aide de Matlab<sup>®</sup>

Là encore, cette topographie révèle une surface relativement plane. La présence avérée d'un vernis transparent pourrait expliquer l'effet de polarisation observé.

### 3.3.11 Conclusion sur la reconstitution des propriétés de réflexion.

Les résultats de cette étude révèlent l'impact généré par la prise en compte ou non de la polarisation lors de la modélisation physique des réflexions, en particulier concernant les modèles de distribution de l'énergie.

Une stratégie d'identification des proportions de réflexion spéculaire et lambertienne, intégrant la dépendance à la polarisation des coefficients de Fresnel, a été proposée et validée sur différents échantillons. Cependant, cette démarche ne semble être valable que pour les matériaux stratifiés où les hypothèses de Fresnel devraient être vérifiées. Cette méthode d'identification doit également être testée sur un plus grand nombre de matériaux pour être validée. Par ailleurs, l'acquisition de propriétés de polarisation dépendante suggère l'utilisation de modèles de modélisation des ensoleillements prenant en compte ces effets. L'impact de l'atmosphère doit alors être considéré sur les effets de polarisation qu'il peut générer [174].

Les travaux du Chapitre 4 présentent l'intégration des modèles de réflexion ainsi obtenus dans un algorithme de lancer de rayons. L'objectif est alors d'évaluer l'influence des propriétés des matériaux sur la distribution de l'énergie dans un quartier urbain. Cette étude devrait permettre d'apporter des éléments de réponse sur la robustesse des hypothèses de réflexions lambertiennes généralement effectuées dans les travaux de modélisation d'ensoleillement.

### 3.4 Mesures en conditions réelles : utilisation d'une maquette de référence.

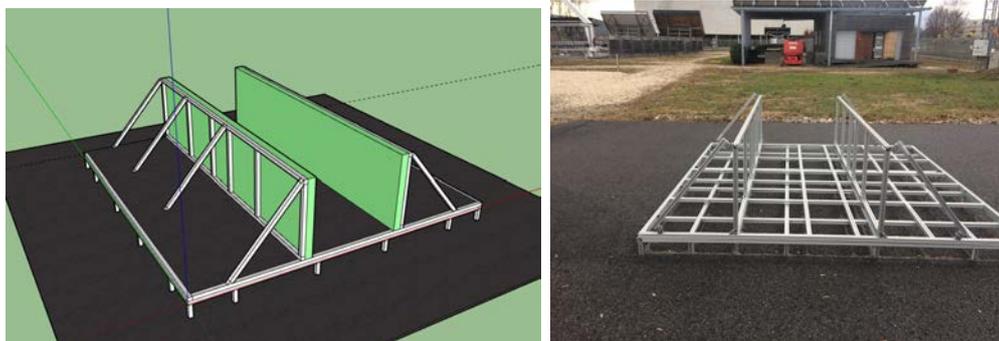
Il s'agit à présent de mesurer les effets des réflexions qualifiées en laboratoire sur une maquette réelle. Une maquette expérimentale reconstituant une rue dite "canyon", inspirée des travaux de Patriarche [10] est alors assemblée et instrumentée. Il s'agit d'une rue théorique, de longueur infinie  $L$ , et dont les bâtiments de chaque côté présentent la même hauteur  $H$ . La largeur de la rue  $l$  est constante sur l'ensemble de sa longueur.

La maquette est orientée sur l'axe nord-sud. Cette orientation permet de découper chaque journée en deux demi-journées, que l'on nommera "matin" et "après-midi". Pour chaque journée, l'heure de transition du matin vers l'après-midi est définie à partir de l'identification du point de culmination du soleil. L'orientation de la maquette permet également de maximiser l'impact des réflexions sur la distribution énergétique au sein du canyon. Les façades orientées Est reçoivent le rayonnement solaire direct le matin et celles orientées Ouest reçoivent le rayonnement solaire direct l'après midi. Pour chaque demi-journée où une des deux façades est masquée du rayonnement solaire direct, seuls les rayonnements diffus et issus des réflexions contribuent alors à alimenter en énergie la façade. Ainsi, et à partir des mesures réalisées, l'étude proposée cherche à évaluer l'apport énergétique issu des réflexions.

#### 3.4.1 Construction de la maquette.

##### 3.4.1.1 Structure.

La maquette a été pensée de sorte à pouvoir moduler la largeur du canyon. Elle a également été pensée pour pouvoir tester différents matériaux de façade, et donc permettre un changement aisé des façades du canyon. Son dimensionnement a été effectué à partir des éléments disponibles dans le commerce afin de limiter les opérations de découpe. Le canyon mesure donc 2m60 de long, pour 60cm de haut. La structure de base ("squelette") de la maquette est constituée d'un assemblage de rails (profilés aluminium de la marque Bosch<sup>®</sup>) composant 2 cadres assemblés en quinconce l'un sur l'autre. Les axes traversants continus sont croisés afin de rigidifier la structure. L'ensemble de la structure a été dessiné sur *Sketchup* afin de vérifier la faisabilité du montage et de connaître l'ensemble des longueurs de rails. Ces montants ont été prédécoupés à l'achat afin de limiter le temps de montage et les erreurs de manipulation.



(a) Réalisation numérique de la maquette

(b) Montage de la maquette

FIGURE 3.18 – Conception puis réalisation de la maquette modélisant un canyon urbain.

Les façades sont également fixés sur des cadres composés de profilés aluminiums, ces cadres étant fixés orthogonalement au cadre horizontal constituant la structure de la maquette.

L'ensemble de la structure est encre au sol au niveau des quatre angles à l'aide de chevilles à frapper, afin de limiter tout risque d'arrachement au vent.

#### 3.4.1.2 Reconstruction des surfaces urbaines.

Différents revêtements ont été mis en place. Ces revêtements présentent des propriétés optiques variées, en terme de couleur mais aussi en terme de réflexion (Section 3.2). L'objectif est alors d'étudier l'impact de ces propriétés sur la distribution énergétique au sein du canyon.

Parmi les surfaces testées, on relève différents matériaux. Ces derniers sont listés ci-dessous :

- Des matériaux crépis, présentant des propriétés de réflexions diffuses.
- Des matériaux enduits, présentant des propriétés de réflexions diffuses.
- Des matériaux de type bardage, présentant des propriétés de réflexions mêlant diffus et spéculaire.
- Des miroirs, présentant des propriétés de réflexions spéculaires.

La base des façades est constituée de panneaux de construction dits « prêts à carreler ». Ce choix est motivé par la sélection d'un matériau tolérant la pose de ces différents revêtements de surface, et en particulier de crépis. Sa porosité permet leur pose et leur maintien dans le temps. Une rigidité suffisante pour résister au vent et aux intempéries était également requise. Une réglette a été rajoutée sur le bord supérieur

afin de prévenir le gonflement de la mousse en cas de la pluie. Ces plaques présentent également l'avantage de permettre une pose aisée des capteurs, notamment par perçage.

Le sol au sein du canyon est réalisé avec un enrobé de toiture. Le comportement de ce matériau est optiquement semblable à un bitume de couleur noire. La figure 3.19 confronte le spectre de réflexion de ce matériau au spectre d'un enrobé d'un bitume, sélectionné comme référence. Ce bitume de référence correspond à l'enrobé situé sur les zones goudronnées de la plate forme INCAS.

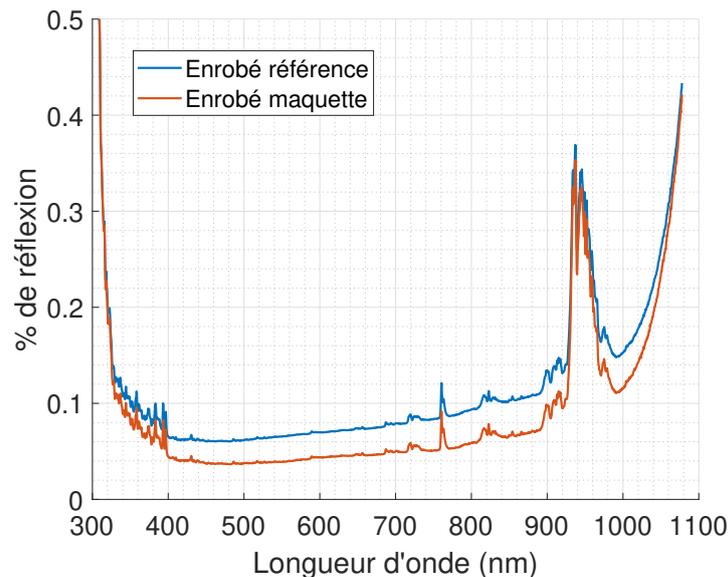


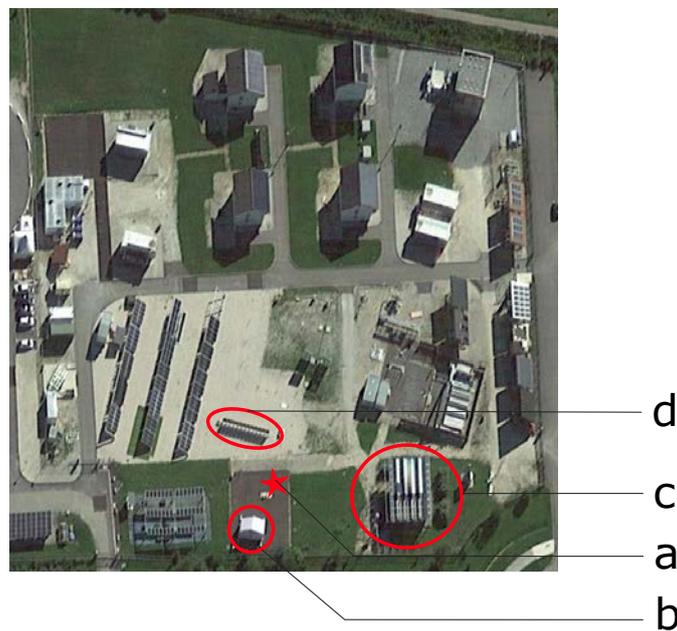
FIGURE 3.19 – Spectres de l'enrobé placé au centre du canyon et du spectre d'un enrobé de référence présent sur la plateforme INCAS.

Sur la figure 3.19, le coefficient de réflexion est similaire pour les 2 matériaux. Le coefficient de réflexion est très faible (presque uniquement inférieur à 10% entre 350nm et 810nm pour les deux enrobés), avec un coefficient de réflexion moyen respectivement de 19% et de 20% pour l'enrobé placé au sein du canyon et pour l'enrobé de référence, entre 300 et 1078nm. Bien que les profils des spectres de réflexion semblent différents, ces valeurs sont cohérentes avec des mesures d'agrégats utilisés pour la construction de routes que l'on peut retrouver dans la bibliographie [175]. Le décalage dans la pose récente de l'enrobé au sein de la maquette, lui conférant une couleur sombre encore peu affectée par le rayonnement solaire, pourrait expliquer le décalage observé entre les deux matériaux. La comparaison des profils des spectres de réflexion mesurés entre l'enrobé de la maquette et l'enrobé de référence de la plateforme INCAS (route) permet de valider la correspondance des comportements optiques.

### 3.4.1.3 Prise en compte de l'environnement.

La maquette a été placée sur la plate-forme d'essais extérieur INCAS du site du CEA-INES. Son emplacement a été défini de sorte à s'affranchir au mieux des masques proches environnants. Il a également été défini en fonction des emplacements autorisés et disponibles. Il est repéré sur la photo de la plateforme INCAS (figure 3.20).

FIGURE 3.20 – Photo de la plateforme INCAS précisant l'emplacement de la maquette et les éventuels masques proches (Image extraite de GoogleMap).



Les masques lointains doivent également être pris en compte. Le site du Bourget du Lac est situé dans une vallée d'axe nord-sud, avec des montagnes à l'est et à l'ouest. Le logiciel *HelioMask* permet de donner une estimation des masques lointains (figure 3.21).

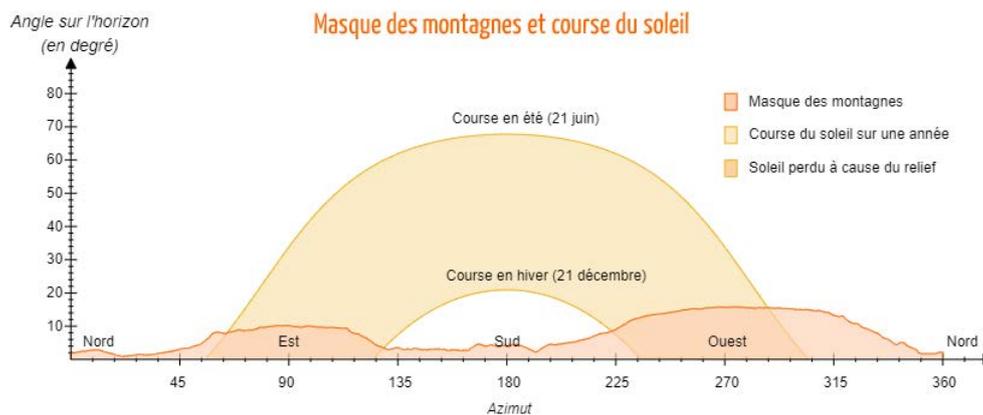


FIGURE 3.21 – Masques lointains pouvant générer des ombrages sur la maquette (Image extraite du site HelioMask).

Enfin, une station météo est située à proximité sur la plate-forme INCAS. Elle permet d'assurer des mesures de rayonnement direct et diffus, servant à alimenter les entrées du modèle et à vérifier la cohérence des relevés effectués sur la maquette.

#### 3.4.1.4 Choix des capteurs.

Les mesures d'irradiance (en  $[W/m^2]$ ) réalisées sur la maquette sont effectuées via l'utilisation de mini-pyranomètres LICOR LI-200R. Plusieurs capteurs ont été considérés pour être installés dans la maquette. La sélection de ces capteurs s'est basée sur deux principales contraintes qu'il était nécessaire de respecter :

- La mesure réalisée par les capteurs doit s'effectuer sur une bande spectrale cohérente avec la bande utilisée par les technologies photo-voltaïques, à savoir entre 400nm et 1100nm.
- Les capteurs doivent être non intrusifs et ne pas perturber la distribution énergétique au sein du canyon, notamment en évitant la concentration de réflexions spéculaires sur un capteur situé sur la façade opposée. Ainsi, la taille réduite des capteurs est requise. Par ailleurs, les capteurs plans sont à privilégier afin de préserver l'aspect plan des façades, et ainsi d'éviter masques et concentrations de réflexions.

En respect de ces contraintes, les capteurs LICOR LI-200R permettent de réaliser une mesure sur la bande 400nm-1100nm, bande qui correspond à la bande d'absorption du silicium. La taille réduite des capteurs permet de limiter leur impact sur les réflexions au sein du canyon. Par ailleurs, leur cellule sensible est dite "corrigée en cosinus" permettant de garantir une réponse correcte pour des angles d'incidences allant jusqu'à  $80^\circ$  [176]. Cette "correction en cosinus" correspond à une correction qui permet de compenser

l'augmentation de la réflexion par la surface supérieure de la cellule sensible.



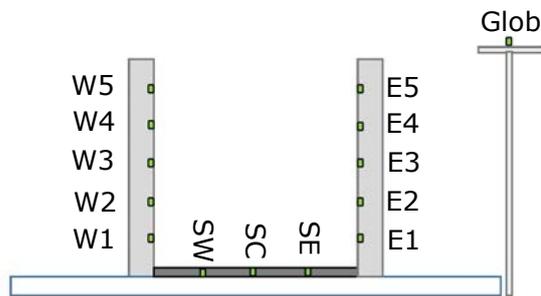
FIGURE 3.22 – Capteur LICOR-200R utilisé dans la maquette pour mesurer les irradiances ( $[W/m^2]$ ) (Image extraite du site LICOR).

D'un point de vue instrumentation, les capteurs LICOR présentent l'avantage d'être cylindrique, de taille réduite, et avec une sortie câblée sur l'arrière du capteur (figure 3.22). Cela permet de le placer au travers de la plaque représentant la façade. En perçant ces plaques du diamètre du capteur, ces derniers s'emboîtent parfaitement, permettant leur maintien.

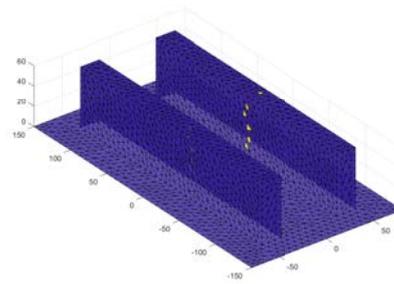
#### 3.4.1.5 Positionnement des capteurs.

Les capteurs sont placés à mi-longueur du canyon. 5 capteurs sont placés sur chaque façade, à différentes altitudes. Les façades de la maquette faisant 60cm de haut, les capteurs sont placés à 10, 20, 30, 40 et 50cm de haut. 3 capteurs sont placés au centre du canyon au niveau du sol, au milieu du canyon pour le premier capteur et à équidistance entre les façades et le milieu pour les deux autres capteurs. Les capteurs sont placés en décalage de sorte à ne pas être en vis à vis direct avec le capteur directement situé en face. Ils sont, sur la maquette numérique, identifiés par les mailles contenant leur position. Les capteurs sont repérés par leur position au sein du canyon. Ainsi les capteurs situés sur la façade exposée vers l'est sont référencés avec un *E*, ceux de la façade ouest avec un *W*. Les numéros indiquent quand à eux la position verticale des capteurs, 1 indiquant un capteur situé en bas, 5 en haut. Les capteurs au sol sont référencés par les numéros *SW* pour celui côté façade ouest, *SC* pour celui au centre et *SE* pour celui côté façade est (figure 3.23).

Un capteur est également situé sur le côté nord de la maquette afin d'assurer une mesure du rayonnement global. Cela permet de contrôler le rayonnement incident sur le canyon, mais également de vérifier la cohérence des mesures avec ce qui est relevé par la station météo de la plate forme INCAS.



(a) Emplacements sur la maquette réelle



(b) Mailles associées

FIGURE 3.23 – Identification en jaune des mailles représentatives des capteurs.

Afin d'évaluer l'apport des réflexions sur chaque capteur, les facteurs de formes associés à chaque capteur sont calculés. La matrice des facteurs de forme obtenue par l'utilisation du modèle par radiativité est utilisée. Le facteur de forme associé à chaque capteur correspond au facteur de forme entre la maille qui lui est associé et la façade en face. Les facteurs de formes avec les différentes surfaces de la scène sont détaillés Tableau 3.4. Les décalages entre capteurs de positions similaires sur les deux façades sont dus à l'approximation possible de la position du capteur par la maille la plus proche. Ces facteurs de forme peuvent être associés à l'analyse des erreurs de mesures liées à la déformation du spectre solaire après réflexion (analyse présentée Tableau 3.5).

<b>Capteurs Est</b>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>	<i>E5</i>
<i>FF façade H/W = 1</i>	0.39	0.41	0.43	0.41	0.39
<i>FF façade H/W = 2</i>	0.60	0.68	0.70	0.69	0.56
<i>FF sol H/W = 1</i>	0.41	0.35	0.27	0.21	0.18
<i>FF sol H/W = 2</i>	0.32	0.21	0.14	0.12	0.07
<i>FF ciel H/W = 1</i>	0.20	0.24	0.30	0.37	0.43
<i>FF ciel H/W = 2</i>	0.08	0.11	0.17	0.19	0.37
<b>Capteurs Ouest</b>	<i>W1</i>	<i>W2</i>	<i>W3</i>	<i>W4</i>	<i>W5</i>
<i>FF façade H/W = 1</i>	0.39	0.41	0.43	0.41	0.39
<i>FF façade H/W = 2</i>	0.59	0.64	0.70	0.65	0.60
<i>FF sol H/W = 1</i>	0.41	0.35	0.27	0.21	0.18
<i>FF sol H/W = 2</i>	0.33	0.27	0.13	0.09	0.07
<i>FF ciel H/W = 1</i>	0.20	0.24	0.30	0.37	0.43
<i>FF ciel H/W = 2</i>	0.08	0.09	0.17	0.26	0.33
<b>Capteurs Sol</b>	<i>SE</i>	<i>SC</i>	<i>SW</i>		
<i>FF façade H/W = 1</i>	0.57	0.54	0.57		
<i>FF façade H/W = 2</i>	0.75	0.75	0.75		
<i>FF sol H/W = 1</i>	0	0	0		
<i>FF sol H/W = 2</i>	0	0	0		
<i>FF ciel H/W = 1</i>	0.43	0.46	0.43		
<i>FF ciel H/W = 2</i>	0.25	0.25	0.25		

TABLE 3.4 – Facteurs de forme calculés au niveau de chaque capteur LICOR avec les différentes surfaces composant la scène urbaine.

### 3.4.1.6 Etude de l'influence du spectre d'incidence sur la mesure.

Cette section a pour objectif d'évaluer l'impact du spectre incident sur la mesure effectuée par le capteur LI-200R. L'étalonnage du capteur est simulé par une mesure de l'ensoleillement en milieu extérieur, sous ensoleillement réel, et par comparaison à une mesure de référence établissant la densité énergétique incidente. Notons que pour cette raison, la calibration des capteurs n'est possible que de fin Mars à début Septembre, par soucis d'ensoleillement suffisant. Cela permet d'obtenir le coefficient de correction appliqué au capteur. Afin d'évaluer l'impact du spectre d'absorption du capteur sur les mesures réalisées, on choisi le spectre ASTM G173 comme référence, dans l'analyse qui suit, présenté figure 3.24 avec le spectre relatif d'absorption du capteur LI-200R.

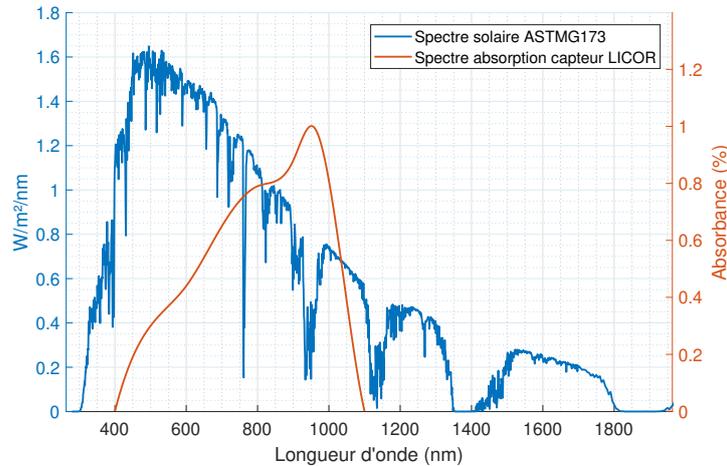


FIGURE 3.24 – Spectre solaire astmg173 et spectre relatif d'absorption du capteur LICOR-200R.

La densité énergétique délivrée par le spectre astmg173 est de  $1000.4\text{W}/\text{m}^2$ . Une mesure brute réalisée à l'aide du capteur LI-200R par produit de convolution des spectres est de  $395.5\text{W}/\text{m}^2$ . Ainsi, le coefficient de correction, obtenu par ratio des densités énergétiques théoriques et mesurées, associé au capteur LI-200R est 2.5267. Autrement dit, toute mesure brute réalisée par le capteur LI-200R doit être multipliée par le coefficient  $F_{corr}$  afin d'obtenir la densité énergétique incidente réelle.

On suppose à présent que le spectre mesuré n'est pas le spectre solaire, mais qu'il s'agit d'un spectre issu de la réflexion du spectre solaire sur un autre matériau. On fera varier le matériau sur lequel a lieu la réflexion, en étudiant l'impact du spectre de réflexion sur la justesse de la mesure réalisée. Les matériaux pour lesquels l'influence sera testée sur différents matériaux typiques de revêtements extérieurs, notamment plusieurs coloris de crépis. La figure 3.25 montre le spectre solaire Astmg173 et le spectre de réflexion relatif pour un échantillon de bardage blanc. On remarque que le spectre de cet échantillon impacte fortement le spectre solaire, notamment en dessous de 400nm, ce qui génère une surévaluation du rayonnement réfléchi par la mesure du capteur LICOR. Dans le cas de cet échantillon, la surévaluation est de 11.4% (Tableau 3.5).

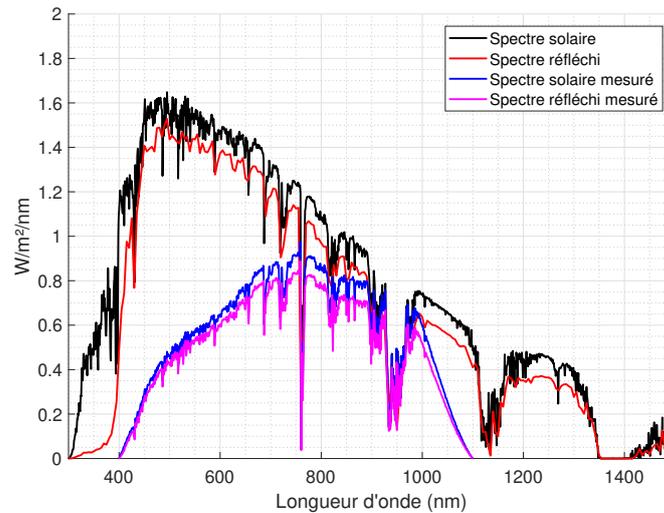


FIGURE 3.25 – Illustration du spectre solaire *astmg173*, du spectre réfléchi et des spectres théoriquement mesurés dans le cas d'un bardage blanc.

Le spectre réfléchi est évalué comme le produit, longueur d'onde à longueur d'onde, du spectre solaire initial  $S_{i0}$  et du spectre de réflexion du matériau test  $S_{test}$ . Le spectre mesuré par le capteur reste la convolution du spectre résultant avec le spectre relatif d'absorption du capteur. Le tableau 3.5 récapitule les erreurs relatives de mesures dans le cas d'une mesure d'un spectre de réflexion issu d'un échantillon de crépis et réalisée à l'aide d'un capteur LI-200R. Cette erreur relative est calculée comme le ratio de la mesure réalisée par l'évaluation de la densité énergétique mesurée par le capteur sur la densité énergétique théorique. Des erreurs importantes peuvent être générées par la déformation du spectre solaire après réflexion, comme dans le cas du bardage rouge qui peut présenter une erreur allant jusqu'à 24% (Tableau 3.5).

Echantillon	Erreur relative sur la mesure	Mesure capteur	Mesure théorique
Ech1701000	3.7%	877Wm <sup>-2</sup>	846Wm <sup>-2</sup>
Ech10810016	6.6%	817Wm <sup>-2</sup>	767Wm <sup>-2</sup>
Ech10810106	9.6%	603Wm <sup>-2</sup>	550Wm <sup>-2</sup>
Ech10820318	6.7%	384Wm <sup>-2</sup>	360Wm <sup>-2</sup>
Ech17010016	6.5%	796Wm <sup>-2</sup>	749Wm <sup>-2</sup>
Ech17010083	7.8%	732Wm <sup>-2</sup>	679Wm <sup>-2</sup>
Ech17010266	6.5%	490Wm <sup>-2</sup>	460Wm <sup>-2</sup>
Ech17010278	3.8%	798Wm <sup>-2</sup>	769Wm <sup>-2</sup>
Ech13150330	15.1%	391Wm <sup>-2</sup>	340Wm <sup>-2</sup>
Bard. Blanc	11.4%	905Wm <sup>-2</sup>	813Wm <sup>-2</sup>
Bard. Rouge	24.3%	329Wm <sup>-2</sup>	265Wm <sup>-2</sup>
Bard. Noir	0.9%	45Wm <sup>-2</sup>	44Wm <sup>-2</sup>

TABLE 3.5 – Pourcentage d’erreur relative mesurée par le capteur LI-200R dans le cas d’une mesure d’irradiance issue de la réflexion d’un échantillon exposé au rayonnement d’un spectre solaire *astmg173* et après étalonnage du capteur avec un spectre *astm173*.

En moyenne, l’erreur correspond donc à une surévaluation de la densité énergétique incidente de 8.6%. On note également la tendance du capteur LICOR à sur-évaluer l’irradiance reçue pour l’ensemble des mesures issues des spectres de réflexion. Il faut toutefois relativiser cette erreur, qui correspond à l’erreur réalisée uniquement sur la fraction du rayonnement réfléchi. En croisant les tableaux 3.4 et 3.5 on peut alors estimer la part d’erreur de mesure liée à la déformation du spectre solaire après réflexion dans chacune des configurations de la maquette. Ces corrections sont appliquées sur l’ensemble des campagnes de mesures réalisées.

### 3.4.1.7 Montage et validation de la chaîne d’acquisition.

**Paramétrage de la chaîne d’acquisition.** La chaîne d’acquisition (schématisée figure 3.26) est composée d’un capteur, d’un amplificateur (de la marque *LICOR*) et d’une centrale d’acquisition. L’amplificateur permet de convertir le signal en  $\mu A$  généré par les capteurs LI-200R en volt  $V$ . Le signal peut alors être remonté jusqu’à la centrale d’acquisition *LOGGER GL840* de la marque *Graphtech*. Plus de précisions sont fournies en annexe A.

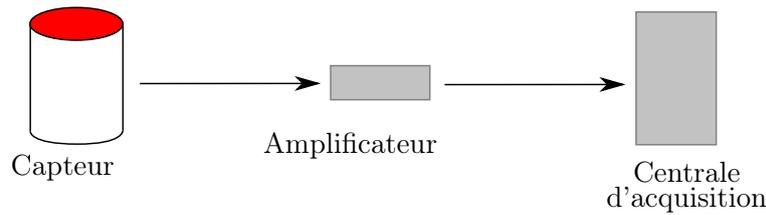


FIGURE 3.26 – Schématisation de la chaîne d’acquisition utilisée sur la maquette expérimentale.

**Erreur sur la chaîne d’acquisition.** Plusieurs méthodes d’évaluation des incertitudes générées par une chaînes d’acquisition existent [177]. L’incertitude finale est essentiellement composée d’incertitudes de type B, autrement dit aux incertitudes fournies par les constructeurs des différents appareils. Une incertitude de type A, qui consiste en une analyse statistique de l’instabilité des mesures notée  $e$  (propre à chaque association capteur-amplificateur) pour les pyranomètres LI200R, est rajoutée. Cette erreur est propre à chaque capteur et la chaîne d’acquisition qui lui est associée. Elle correspond à une estimation de l’écart type de la moyenne. En l’absence d’information, on choisira par défaut que la loi suivie est une loi carrée. Les erreurs relevées sont indiquées tableau 3.6.

Capteur	Erreur	Loi
Capteur Pyr. LI200R	3%	Loi rectangulaire
Instabilité Pyr. LI200R	$e$	Loi rectangulaire
Amplificateur 240	0.1%	Loi rectangulaire
Centrale GRAPHTECH	0.1%	Loi rectangulaire
Instabilité Pyr. de réf.	0.5%	Loi rectangulaire
Incerti. Etalo. Pyr. de Réf.	2.41%	Loi normale

TABLE 3.6 – Incertitudes de type B fournies par les constructeurs.

L’erreur de stabilité associée aux différents capteurs est de l’ordre de 0.2%. On note  $E_c$  l’erreur générée par l’ensemble de la chaîne d’acquisition. Soit  $u_i$  l’erreur du  $i^{\text{ème}}$  élément de la chaîne d’acquisition tel que  $u_i = k_i \times v_i$ .  $v_i$  correspond au pourcentage d’erreur de l’élément  $i$  et  $k_i$  au facteur d’élargissement lié à la loi suivie par l’erreur. L’erreur sur l’ensemble de la chaîne d’acquisition se calcule à partir de la formule (Equation 3.41).  $k_{tot}$  correspond au facteur d’élargissement lié à la loi suivie par l’erreur de la chaîne complète, généralement une loi rectangle dès que l’un des éléments suit une loi rectangle. Cela permet théoriquement d’obtenir un intervalle de confiance à 95% pour la mesure réalisée.

$$E_c = k_{tot} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{N_c} u_i^2}. \quad (3.41)$$

**Validation de la chaîne d'acquisition.** Avant livraison, chacun de ces pyranomètres a été calibré par rapport au spectre solaire. En interne et avant leur installation sur la maquette, les capteurs et la chaîne d'acquisition ont pu être testés dans leur globalité sous différentes conditions. Dans un premier temps, le banc d'ensoleillement disponible à l'INES a permis de tester les pyranomètres LI-200R dans différentes configurations, en faisant varier les puissances d'éclairements et les angles d'incidence. Les mesures obtenues ont ensuite été comparées à celles réalisées avec un pyranomètre de référence étalonné. Cela a également permis de vérifier le bon réglage en gain des amplificateurs et ainsi le bon fonctionnement de la chaîne d'acquisition.

**Comparaison à l'ensoleillement du banc d'ensoleillement.** Les détails des acquisitions réalisées sous le banc d'ensoleillement sont détaillés en annexe A. On présentera ici seulement les résultats dans les configurations d'une puissance de 97% avec une inclinaison de 0°, et de 78% avec une inclinaison de 30° (figure 3.27). Ces résultats permettent de comparer les irradiances mesurées par le pyranomètre de référence, et celles mesurées par les capteurs LICOR. Les mesures réalisées à l'aide d'une cellule photovoltaïque de référence sont également apparentes. Les incertitudes de mesure propres au pyranomètre de référence sont prises en compte. De même, celles des pyranomètres LICOR et à la chaîne d'acquisition à laquelle ils sont associés sont prises en compte. On remarque figure 3.27 que les incertitudes des mesures effectuées ne se recoupent pas. Le biais entre les mesures réalisées au pyranomètre de références et celles réalisées grâce aux pyranomètres LICOR est constant, d'environ 76W/m<sup>2</sup>, soit une erreur positive d'environ 7%. En supposant que l'erreur théorique du capteur LICOR sous le banc d'ensoleillement est surestimée et qu'elle diminue lorsque la puissance du banc diminue, cela pourrait fournir une explication à ce biais. Notons également que les variations mesurées par la cellule de référence sont relativement respectées par le pyranomètre de référence comme par les pyranomètres LICOR.

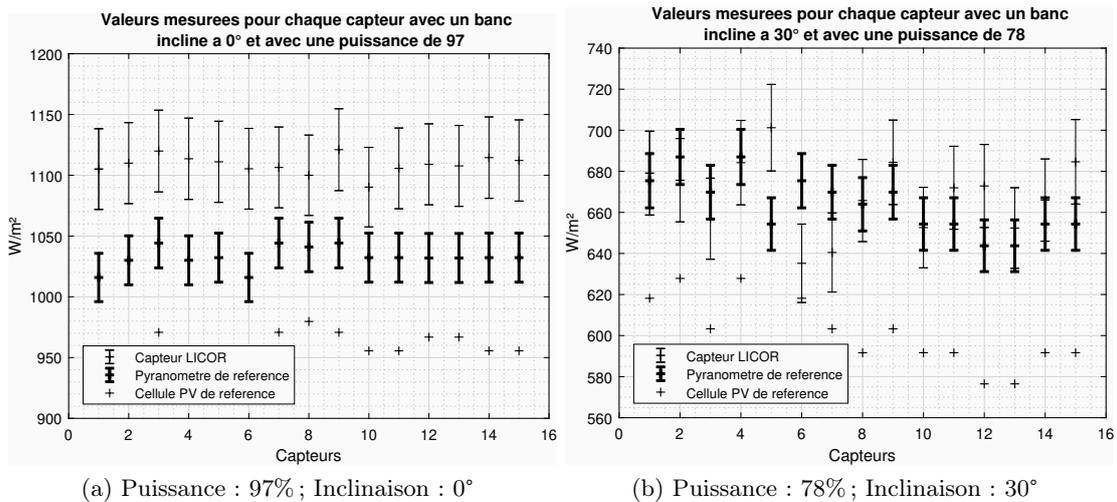


FIGURE 3.27 – Comparaison des mesures réalisées au pyranomètre de référence, à la cellule photovoltaïque de référence et aux pyranomètres LICOR testés, dans les configurations d’une puissance de 97% avec une inclinaison de 0°, et de 78% avec une inclinaison de 30°.

Ce test effectué sous le banc d’ensoleillement montre un comportement cohérent des capteurs mais interroge sur la justesse des mesures effectuées par les pyranomètres LICOR. Ces pyranomètres étant étalonnés à partir de mesures en ensoleillement réel, une nouvelle campagne de test est menée en extérieur.

**Comparaison à l’ensoleillement réel.** L’ensemble des capteurs a également été confronté entre eux dans des conditions similaires. La mesure du rayonnement global incident sur une surface horizontale a permis de valider le fonctionnement des capteurs et leur synchronisation. L’écart relevé entre les capteurs au zénith est de  $51\text{W/m}^2$ , ce qui est cohérent avec les incertitudes de la chaîne d’acquisition.

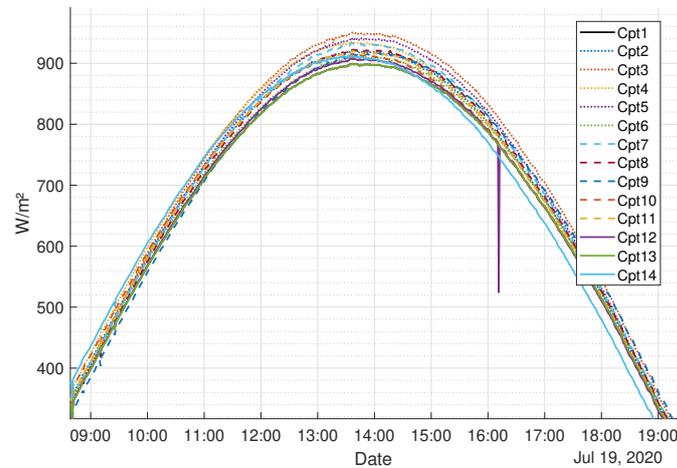


FIGURE 3.28 – Comparaison des capteurs LICOR dans une configuration de mesure d’enseillement global sur une surface horizontale.

Par ailleurs, lors de l’installation sur la maquette, un capteur a été placé de façon isolée. Il permet de mesurer l’enseillement global incident sur une surface horizontale isolée de tous masques. Les mesures réalisées pour deux journées types, l’une courte (15 Nov. 2019) et l’une longue (17 Juin 2019), relativement bien enseillements, sont présentées figure 3.29. On observe une forte similitude entre l’irradiance mesurée par le pyranomètre installé sur la station météorologique et le pyranomètre LICOR LI200R. Les perturbations d’enseillement, liées à la nébulosité, sont bien relevées de manière similaire par les capteurs. Seules quelques unes de ces perturbations ne sont pas relevées par le pyranomètre de la station sur la journée du 17 Juin. Ces perturbations peuvent notamment être liées à la présence d’oiseaux, attirés par la couleur blanche de la cellule sensible. Les "ruptures" sur la courbe de l’irradiance, relevées en début et fin de journée, sont liées aux masques lointains, et en particulier aux montagnes bordant la vallée. Un léger décalage s’amplifiant avec l’irradiance entre les 2 capteurs est relevée pour la journée du 15 Juin. Une partie de ce décalage semble s’expliquer par une désynchronisation de 2 minutes entre les appareils. L’écart relevé entre les 2 courbes reste alors inférieur à 5% pour l’ensemble des irradiances significatives (supérieures à  $100\text{W}/\text{m}^2$ ). Comme dans le cas du banc d’enseillement, ce décalage peut s’expliquer par des différences spectrales entre le jour de mesure et le jour d’étalonnage du capteur. Toutefois, ces mesures confirment le bon fonctionnement des capteurs LICOR.

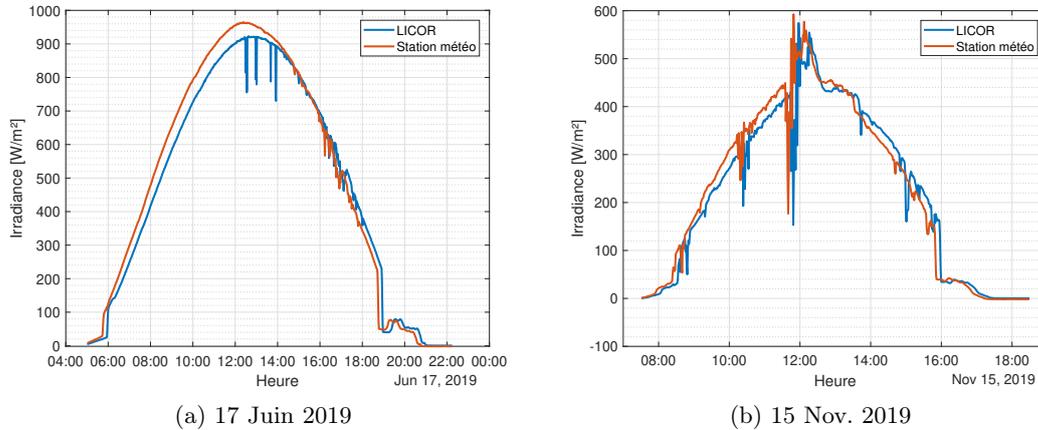


FIGURE 3.29 – Comparaison des mesures d’ensoleillement global réalisées grâce à un pyranomètre LICOR 200R et grâce au pyranomètre de référence de la station météorologique de la plateformés INCAS.

Cette campagne de tests réalisée en extérieur permet finalement de valider la chaîne d’acquisition et les capteurs LICOR. Elle semble également confirmer l’impact du spectre généré par le banc d’ensoleillement sur les capteurs LI-200R.

### 3.4.2 Campagnes de mesure.

Différents scénarios ont été simulés avec la maquette. On les répertorie dans le tableau 3.7.

N°	Date déb.	Date fin	Matériau Ouest	$\rho_O$	Matériau Est	$\rho_E$	$H/W$
1	17/05/19	04/06/19	Crépis Blanc	0.74	Crépis Blanc	0.74	1
2	17/05/19	02/07/19	Drap Occul. Noir	0	Crépis Blanc	0.74	1
3	03/07/19	26/07/19	Enduis Rouge	0.37	Enduis Rouge	0.37	1
4	27/07/19	08/08/19	Bardage Blanc	0.89	Bardage Blanc	0.89	1
5	08/08/19	21/08/19	Miroir	1	Bardage Blanc	0.89	1
6	27/05/2020	29/05/2020	Crépis	0.74	Crépis	0.74	2
7	25/05/2020	27/05/2020	Bardage Blanc	0.89	Bardage Blanc	0.89	2
8	29/05/2020	02/06/2020	Bardage Blanc	0.89	Bardage Noir	0.04	2
9	04/07/2020	06/07/2020	Bardage Noir	0.04	Bardage Noir	0.04	2

TABLE 3.7 – Tableau récapitulatif des différentes configurations testées de la maquette.

### 3.4.3 Mesures en configuration $H/W = 1$ .

Dans un premier temps, les résultats obtenus en configuration  $H/W = 1$  sont détaillés. L’ensemble des résultats sont présentés en Annexe tandis que seules les acqui-

sitions n°3, 4 et 5 sont détaillées ici.

### 3.4.3.1 Configuration n°3 : Crépis rouge sur les 2 façades.

Cette configuration a pour objectif de tester l'impact d'une couleur rouge, associée à un matériau non lisse et ne présentant à priori pas de réflexion spéculaire, sur la distribution énergétique au sein du canyon. Les résultats sont à opposer à ceux obtenus dans les configurations n°4 et n°5.

Les résultats des mesures sont détaillés figure 3.30. Dans le positionnement des capteurs, la symétrie des acquisitions couplée à la superposition des mesures montre un bon positionnement des capteurs. Sur le plan énergétique, on observe que les apports sur les capteurs situés au centre du canyon (*SE*, *SC* et *SW*) restent inférieurs au rayonnement global mesuré par le capteur *Glob*. Les mesures réalisées en réflexion restent très faibles (128,6 W/m<sup>2</sup> pour *W5* à 10h31, soit 21% de l'irradiance globale à la même heure).

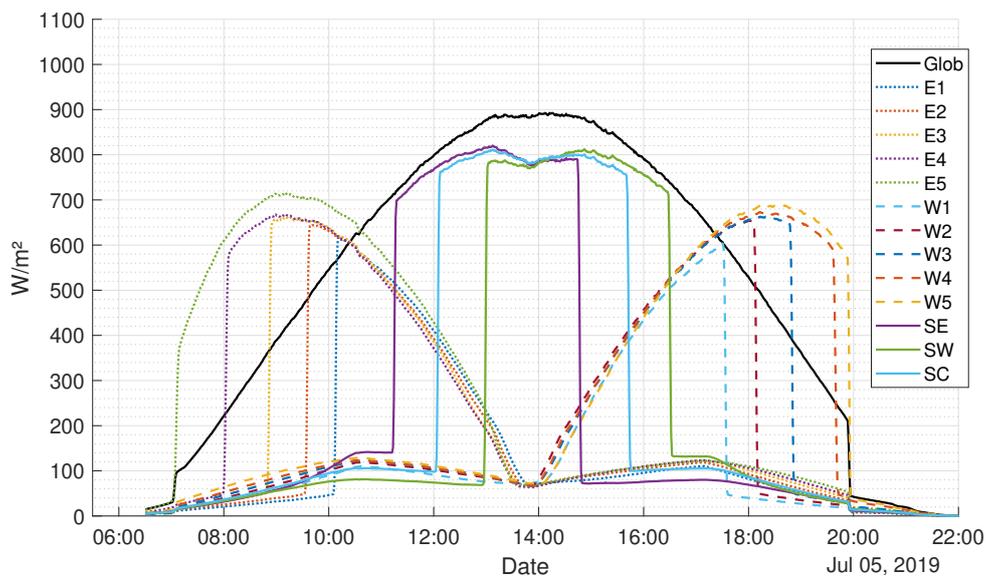


FIGURE 3.30 – Irradiances [W/m<sup>2</sup>] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 4 août 2019. Les 2 façades sont en enduit rouge (Ech13150330).

### 3.4.3.2 Configuration n°4 : Bardage blanc sur les 2 façades.

En opposition à la campagne précédente, cette campagne permet d'évaluer l'impact d'un matériau très clair possédant un comportement en partie spéculaire (Section 3.3.7). La comparaison des résultats présentés figure 3.31 avec les résultats précédents (figure 3.30) révèle des apports solaires nettement plus importants, que ce soit sur la façade

opposée ou au sol. Cela se traduit par des irradiances plus importantes que le rayonnement global au niveau du sol avec  $990,8 \text{ W/m}^2$  relevés par *SE* à 12h46, soit 121% de l'irradiance globale à la même heure. Les mesures effectuées en réflexion sont également bien plus importantes :  $304,9 \text{ W/m}^2$  relevés par *E3* à 17h02, soit 48% de l'irradiance globale à la même heure. L'énergie issue des réflexions apparaît également sur les capteurs situés au sol avec des pics d'irradiance relevés à 10h55 pour *SE* et 17h02 pour *SW*.

La courbe du capteur *W5* montre une incohérence, avec une irradiance relevée trop faible entre 14h00 et 18h00, incohérente avec les irradiances relevées par les autres capteurs sur cette même façade et sur ce même laps de temps, et également incohérente avec les relevés réalisés sur les autres configurations. Du fait que cette irradiance croît rapidement à partir de 16h00, de manière synchrone avec la position descendante du soleil, et ce jusqu'à retrouver une valeur cohérente, il est fort probable que cette erreur provienne d'une mauvaise fixation du capteur dont l'orientation a bougé.

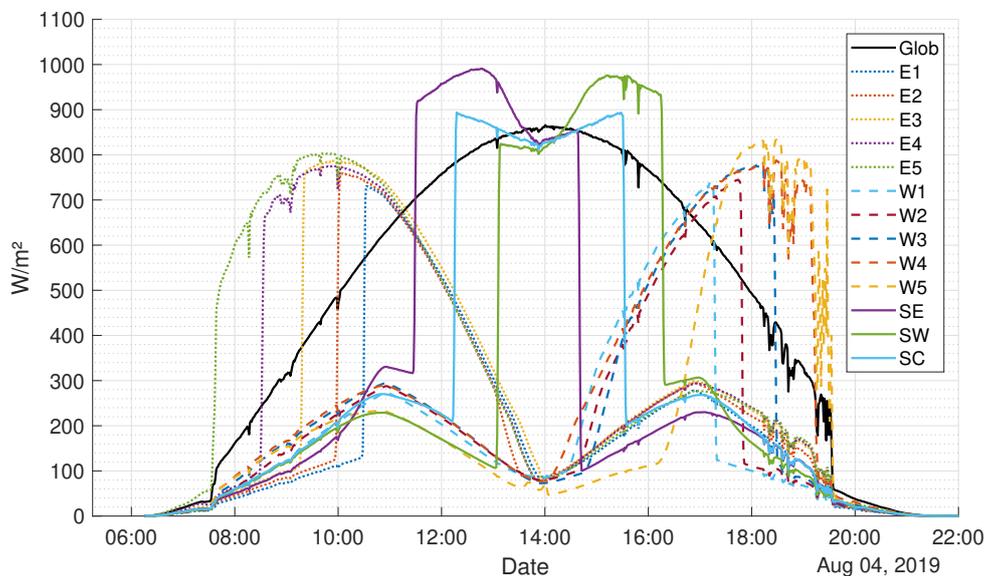


FIGURE 3.31 – Irradiances [ $\text{W/m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 4 août 2019. Les 2 façades sont en bardage blanc (Echantillon Bard. Blanc). On relève une incohérence dans la courbe du capteur *W5*.

### 3.4.3.3 Configuration n°5 : Évaluation de l'impact de réflexions spéculaires.

De même que pour la configuration n°2, les capteurs présents sur la façade orientée est sont masqués par le miroir et retirés de la figure 3.32. Une découpe du miroir pour les capteurs orientés Est a été évoqué mais est apparue comme trop complexe. On suppose le miroir parfait, ayant un coefficient de réflexion de 1, et ne générant donc pas d'erreur sur la mesure des capteurs après réflexion.

On remarque que les capteurs exposés aux réflexions du miroir reçoivent un signal bruité, attribué à l'irrégularité du miroir. On note toutefois que les réflexions observées peuvent générer des irradiances importantes sur la façade d'en face (orientée ouest), notamment sur les capteurs situés à mi hauteur (jusqu'à 1200W relevés sur *W2*, *W3* et *W4*). Les capteurs situés au sol reçoivent également une irradiance plus importante que dans les autres configurations, en particulier pour le capteur *SE* le plus exposé aux réflexions sur le miroir lorsque le soleil approche sa position zénithale. Notons que ce capteur semble saturer entre 11h56 et 12h35. La position zénithale apparaît à 13h46, soit environ 30 minutes après la suppression quasi totale de la contribution des réflexions sur le capteur *SE* (13h11). Ce décalage de 30 minutes s'explique par des rayons issus du rayonnement direct pratiquement tangents à la façade : le capteur *SE* de retrouve alors en dehors du champ de réflexions géométriques. Une fois cette position zénithale passée, on retrouve des profils d'irradiance plus standards et similaires à ceux des acquisitions précédentes. On peut toutefois noter un phénomène intéressant entre 14h58 et 15h18 : on observe sur cette période une irradiance globale anormalement importante, de pratiquement 100W/m<sup>2</sup> (910W/m<sup>2</sup> mesuré à 15h07 contre 801W/m<sup>2</sup> à 15h19).

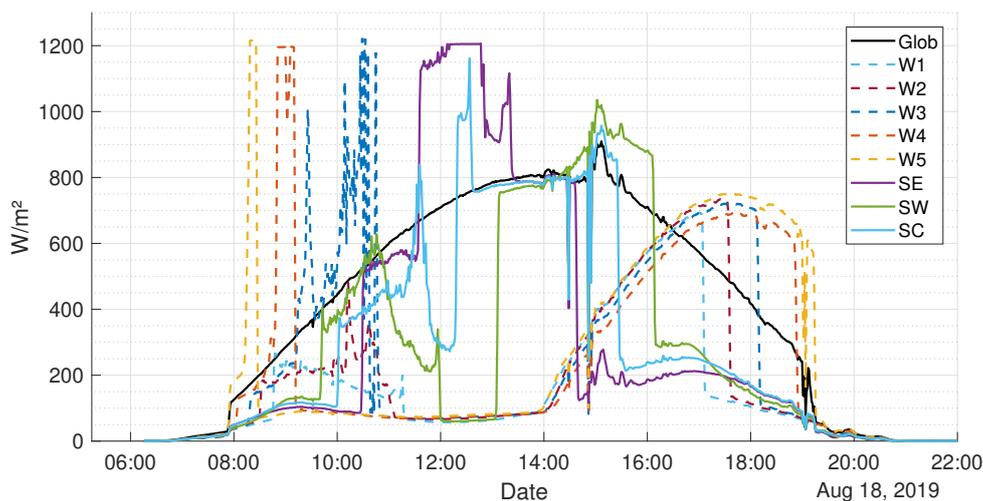


FIGURE 3.32 – Irradiances [W/m<sup>2</sup>] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 18 août 2019. La façade orientée vers l'est est équipée d'un miroir tandis que la surface orientée vers l'ouest est en bardage blanc (Echantillon Bard. Blanc).

#### 3.4.4 Analyse des résultats en configuration $H/W = 1$ : Différences observées.

L'ensemble des journées sélectionnées sont des journées avec un nombre réduit de masques. Il s'agit de prendre les journées les plus similaires possibles afin de les rendre comparables. On proposera toutefois un indicateur permettant, dans une certaine mesure, de s'affranchir de la quantité d'irradiance globale incidente (Equation 3.42). Cet indicateur consiste simplement à normaliser l'énergie accumulée sur une surface donnée par l'énergie accumulée sur une surface horizontale isolée sur la même période notée  $T$ .

L'énergie accumulée par une surface de référence de  $1m^2$  correspond à l'intégrale de la puissance, autrement dit l'irradiance, sur la durée  $T$ .

$$\tau_i = \frac{\int_T Irr_i(t)dt}{\int_T Irr_{ref}(t)dt} \quad (3.42)$$

Les journées sont scindées en 2 demi-journées, le matin et l'après-midi. Le matin est défini comme la demi-journée où l'ensoleillement est croissant, l'après-midi comme la demi-journée où l'ensoleillement est décroissant. Elles sont donc séparées par le midi solaire, l'heure à laquelle le soleil passe au zenith. Les midis solaires ont été définis à partir des mesures réalisées.

<b>Configuration</b>	Config n°1				
<b>Levé Sol.</b>	5h30	5h30	5h30	5h30	5h30
<b>Couché Sol.</b>	22h00	22h00	22h00	22h00	22h00
<b>Midi SOL.</b>	13h34m50s	13h42m23s	13h40m27s	13h47m33s	13h43m43s

TABLE 3.8 – Heures relevées permettant de définir les périodes "matin" et "après-midi" dans le cadre de la première campagne de mesure réalisée ( $H/W = 1$ ).

Le rayonnement global sur une surface horizontale mesuré lors de la configuration 1 étant incomplet, les mesures réalisées dans cette configuration ont été normalisées par le rayonnement global relevé par le capteur de la station météorologique de la plateforme INCAS. Ce choix est motivé par la correspondance des courbes de rayonnement global mesuré par le pyranomètre LICOR et par le pyranomètre de la station météorologique. Les mesures relevées par le capteur de la station météorologique présentant un léger biais d'environ  $-1.86W$ , les valeurs négatives mesurées par le pyranomètre de références ont été corrigées pour être nulles. Le choix de translater l'ensemble des valeurs à partir de la plus faible valeur mesurée n'a pas été fait pour ne pas amplifier le léger biais observé entre les deux capteurs, notamment durant la matinée.

Les erreurs issues de la chaîne d'acquisition associées à l'instabilité des capteurs relevée sous le banc d'ensoleillement sont de l'ordre de 3% pour l'ensemble des configurations. On utilisera cette valeur gonflée arbitrairement de 1% (non coplanarité des capteurs) pour les incertitudes de mesures réalisées sur la maquette expérimentale, soit une erreur relative de 4%.

Enfin, les irradiances diffuses reçues sur une surface horizontale isolée sont comparées pour les différentes journées retenues. Cela permet notamment de se rendre compte des différentes contributions du rayonnement diffus lors des demi-journées où les capteurs sont isolés du rayonnement direct. Les rayonnements diffus mesurés sont présentés figure 3.33. On remarque que les contributions du rayonnement diffus sont comparables pour les configurations 1, 3, 4 et 5. On note au maximum 8% d'écart, entre configurations 1

et 5, pour durant l'après-midi. Le rayonnement est plus important lors de la journée de la configuration n°2 (+19% et +20% respectivement le matin et l'après-midi par rapport à la configuration n°1).

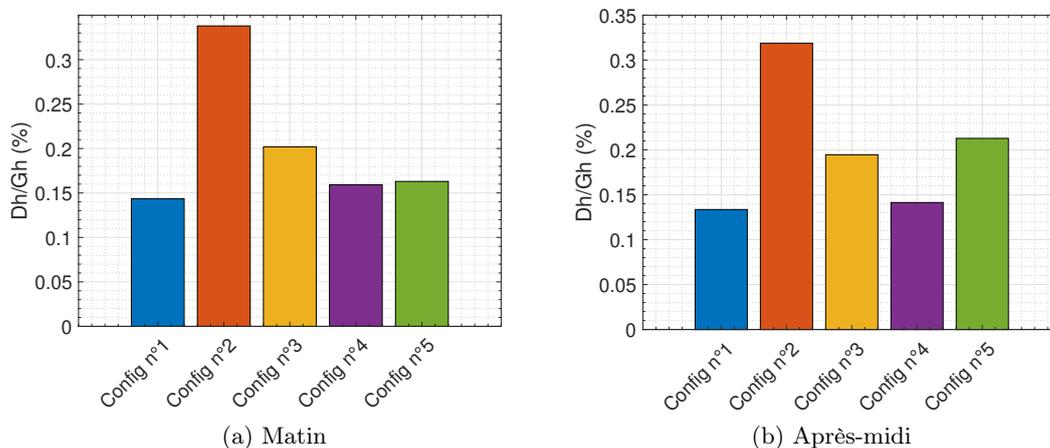


FIGURE 3.33 – Pourcentage de diffus par rapport au rayonnement global pour chaque demi-journée retenue.

#### 3.4.4.1 Analyse des relevés en façade Est.

On s'intéresse ici aux irradiances incidentes sur la façade Est. Dans les configurations n°2 et n°4, les capteurs de la façade orientée Est ont été masqués (respectivement par un drap noir et un miroir). Ils n'apparaissent donc pas dans les analyses suivantes. Le matin correspond à la période durant laquelle le rayonnement direct est incident sur ces capteurs. En raison de l'orientation de la façade, il n'est donc pas étonnant que l'irradiance reçue au niveau du capteur  $E5$  soit comparable avec celle reçue par une surface horizontale isolée ( $\tau = 0.91, 0.89$  et  $1.02$  respectivement pour les configurations 1,3 et 4). Le paramètre  $\tau$  semble décroître linéairement avec l'altitude sur la façade, ce qui semble cohérent avec les temps d'exposition à l'ensoleillement direct. On constate toutefois une différence en fonction du revêtement des façades. On relève ainsi 18% d'écart entre les configuration 3 et 4 sur le capteur  $E3$  ( $\tau = 0.76$  pour la configuration 4 et  $\tau = 0.58$  pour la configuration 3). Dans l'hypothèse où les rayonnements diffus sont relativement similaires sur les 3 journées, ces différences s'expliquent alors par le piégeage radiatif lié aux réflexions au sein du canyon urbain.

Sur la seconde demi-journée, seuls le rayonnement et les réflexions contribuent à l'irradiance relevée sur cette façade. On note rapidement que les indicateurs  $\tau$  relevés sur cette demi-journée sont bien plus bas, indiquant un niveau d'énergie apporté bien plus faible (au mieux 32% de l'énergie reçue sur une surface horizontale isolée sur la même

période de temps). On note ensuite des différences notables en fonction des configurations, qui s’expliquent en grande partie par les réflexions sur la façade orientée ouest recevant alors le rayonnement direct. On note que les irradiances relevées sont équivalentes pour les différents capteurs, indépendamment de leur altitude sur la façade du bâtiment. Pour une configuration donnée, le capteur  $E1$  présente un indicateur  $\tau$  plus faible. Cette observation pourrait être liée au facteur de forme avec la façade orientée ouest moins important. Toutefois, les marges d’incertitudes relevées nous empêchent de conclure à ce sujet.

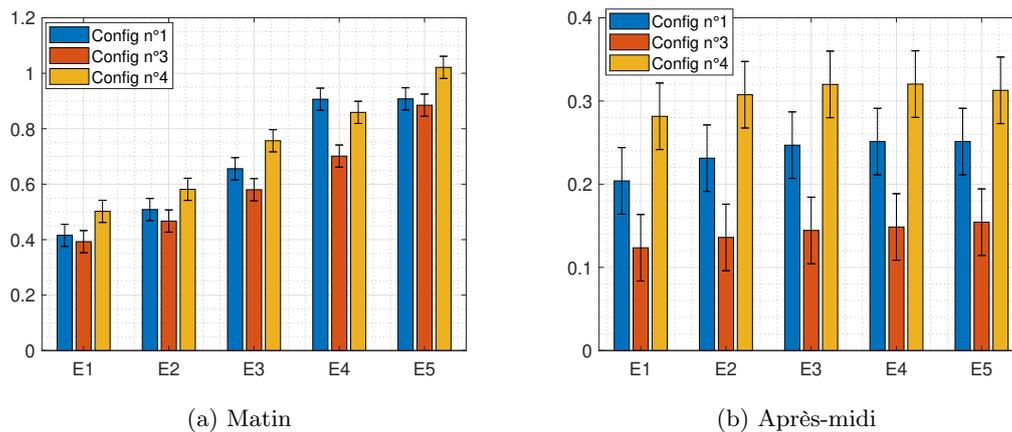


FIGURE 3.34 – Indicateur  $\tau$  pour les capteurs situés en façade orientée est.

#### 3.4.4.2 Analyse des relevés en façade ouest.

La façade orientée ouest ne perçoit que les rayonnements diffus et réfléchis lors de la première partie de la journée (matin). On note très clairement que sur cette partie de la journée, l’irradiance incidente est corrélée à la configuration expérimentée. Ainsi, les configurations 2 et 3 présentent des coefficients  $\tau$  relativement similaires, légèrement croissants avec l’altitude à laquelle est situé le capteur. On peut supposer que cela est notamment lié à une meilleure exposition au rayonnement diffus. Les configurations 4 et 5 présentent des coefficients  $\tau$  nettement plus importants. On s’attendrait à un rayonnement incident plus faible avec la configuration n°2, du fait de la présence du drapeau occultant. Or, en proportion, le rayonnement diffus était plus important de 14% lors de la journée du 26 juin par rapport à la journée du 3 juillet. Cela pourrait correspondre à une compensation du déficit d’irradiances apportées en réflexion. Les écarts relevés sont en particulier plus marqués au niveau des capteurs  $W2$ ,  $W3$  et  $W4$ , qui sont situés à mi hauteur sur la façade ouest. Ce sont notamment ces capteurs qui ont des facteurs de forme plus importants avec la façade opposée (Tableau 3.4).

Lors de la seconde partie de la journée, les capteurs sont directement exposés

au rayonnement direct. Cela se traduit, pour un capteur donné, par des coefficients  $\tau$  relativement identiques sur l'ensemble des configurations. Notons que sur le capteur  $W5$ , l'erreur de mesure lors de la configuration n°4 est traduite par un coefficient  $\tau$  environ 20% plus faible que ce qui aurait dû être relevé. On note toutefois que les coefficients  $\tau$  calculés sont légèrement plus importants pour la configuration n°4 (+5% sur  $W1$  et sur  $W3$  par rapport à la configuration n°2) et surtout n°5 (+9% sur  $W1$ , +12% sur  $W2$  et +10% sur  $W3$  par rapport à la configuration n°2). Comme les irradiances issues du rayonnement diffus sont semblables pour les configurations 1, 3, 4 et 5, et qu'il est même supérieur pour la configuration n°2, justifier ces écarts par un apport en rayonnement diffus plus important est impossible. Cela semble donc alors s'expliquer par une double réflexion, et correspond donc uniquement à un apport supplémentaire issu du coefficient de réflexion des 2 façades.

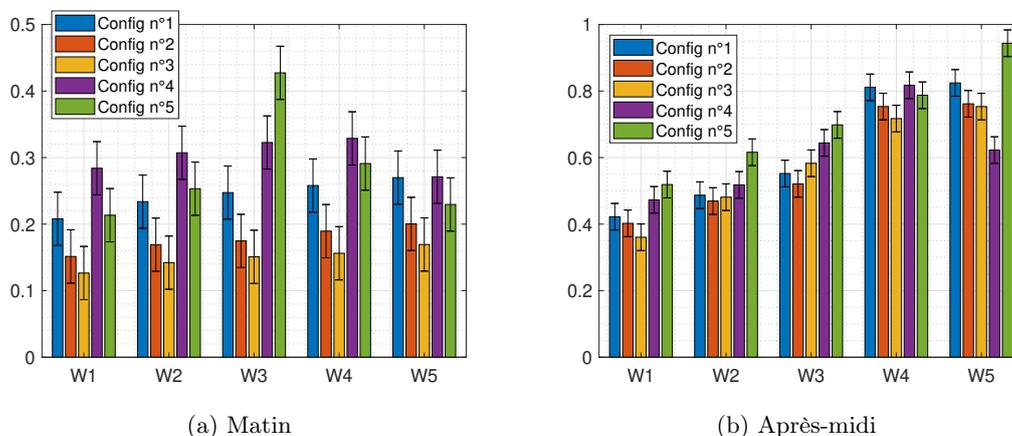


FIGURE 3.35 – Comparaison des mesures d'ensoleillement global réalisées grâce à un pyranomètre LICOR 200R et grâce au pyranomètre de référence de la station météorologique de la plateformes INCAS.

### 3.4.4.3 Analyse des relevés au sol.

Comme pour les analyses des irradiances en façade, on observe des disparités en fonction des heures de la journée et notamment des façades exposées à l'ensoleillement direct. Les capteurs situés en pied de façade exposée au rayonnement direct relève en effet une irradiance plus importante que les capteurs situés au centre du canyon, ou en pied de façade opposée. Ainsi, dans le cadre de la configuration n°4, un coefficient  $\tau$  de 0.83 est relevé au niveau du capteur  $SE$ , alors que ce coefficient n'est que de 0.43 et 0.64 au niveau des capteurs  $SW$  et  $SC$  respectivement. De nouveau, ces disparités s'expliquent avec le coefficient de réflexion  $\rho$  qui est plus important lors des configurations 4 et 5. Dans le cas de façades similaires sur les orientations est et ouest, on relève des coefficients  $\tau$

similaires pour le capteur *SC*. Les coefficients  $\tau$  obtenus pour la demi journée du matin via le capteur *SE* sont également similaires à ceux obtenus l'après-midi via le capteur *SW*.

Comme lors de l'analyse des capteurs situés en façade ouest, on note que la configuration n°2 présente des relevés supérieurs à ce qui est attendu. De nouveau, il semble cohérent que l'apport d'irradiance supplémentaire soit lié au rayonnement diffus plus important ce jour là. La configuration n°3 présente bien le déficit attendu avec un coefficient  $\tau$  plus faible. On note également que les coefficient  $\tau$  relevés pour les après-midi sont pratiquement identiques pour les configurations 4 et 5, qui présentent la même installation en façade ouest, à savoir un bardage blanc. De même, la configuration n°2 se démarque moins ( $-5\%$  l'après-midi par rapport à la configuration 4 contre  $-10\%$  le matin au niveau du capteur *SC*). Du crépis blanc est alors installé en façade ouest, présentant un coefficient de réflexion proche de celui du bardage blanc.

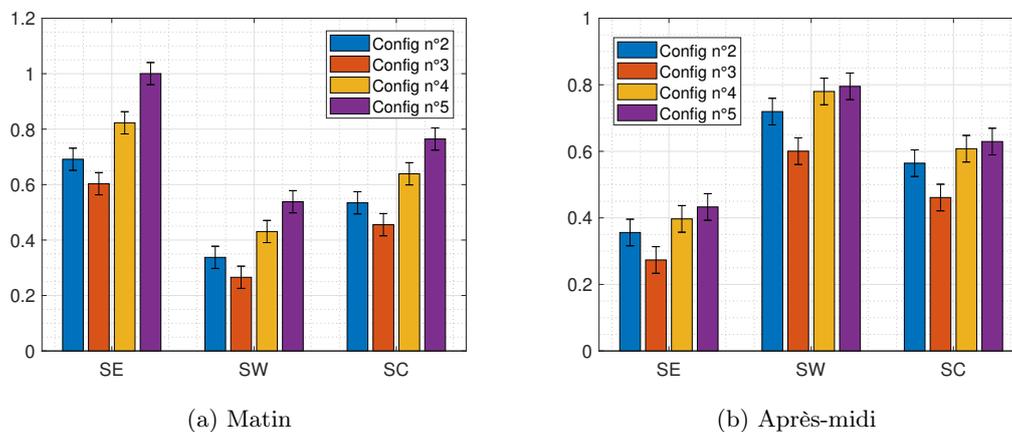


FIGURE 3.36 – Comparaison des mesures d'ensoleillement global réalisées grâce à un pyranomètre LICOR 200R et grâce au pyranomètre de référence de la station météorologique de la plateformes INCAS.

### 3.4.5 Reconstitution des coefficients de réflexion.

A partir des analyses précédentes, on peut essayer de vérifier que énergies relevées en façade masquée au rayonnement direct correspondent aux énergies théoriquement obtenues à partir de la connaissance des coefficients de réflexion et des facteurs de forme. Pour chaque demi-journée, on compare alors le ratio obtenu à partir des coefficients  $\tau$  obtenus. L'irradiance globale incidente sur une façade pour une demi-journée donnée est obtenue en calculant la moyenne des irradiances reçues par l'ensemble des capteurs. Par linéarité, le coefficient  $\tau$  représentatif d'une façade donnée, noté  $\tau_f$  ( $f$  représentant l'orientation de la façade, est ou ouest) sur une demi-journée est calculé comme la moyenne des 5 coefficients  $\tau$  de cette façade sur la même période de temps (Equation 3.43). On note

$\tau_{f,i}$  le coefficient  $\tau$  correspondant au  $i^{\text{ème}}$  capteur sur la façade  $f$  (est ou ouest).

$$\tau_f = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \tau_{f,i}. \quad (3.43)$$

On évalue le coefficient d'apport d'énergie  $\gamma$  pour chaque capteur et dans chaque configuration ou cela est possible, soit les configurations 1, 2 et 3 pour lesquels les irradiances sur les deux façades sont connues. Similaire aux notations précédentes, on note  $\gamma_{f,i}$  le ratio d'énergie incident sur le capteur  $i$  situé sur la façade orientée  $f$ . Pour chaque capteur et chaque façade, le calcul de  $\gamma_{f,i}$  est détaillé Equation 3.44.

$$\begin{cases} \gamma_{est,i} = \tau_{est,i} / \tau_{ouest} \\ \gamma_{ouest,i} = \tau_{ouest,i} / \tau_{est} \end{cases} \quad (3.44)$$

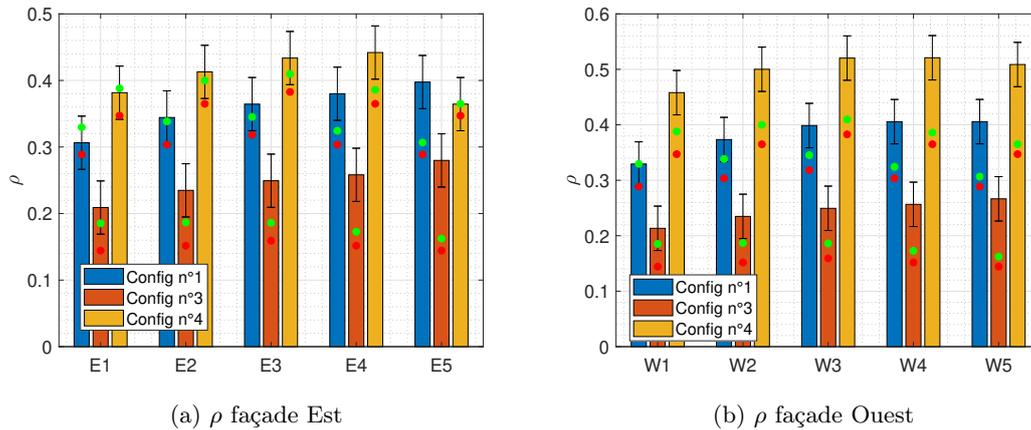


FIGURE 3.37 – Rapport d'énergie entre les façades Est et Ouest dans le cas  $H/W = 1$ . Les points rouges représentent la part théorique d'énergie théoriquement réfléchiée par la façade opposée. Les points verts représentent la somme de l'énergie théoriquement réfléchiée par la façade opposée et de l'énergie théoriquement réfléchiée par le sol.

On observe figure 3.37 que les ratios d'énergie mesurés sont principalement supérieurs aux ratios d'énergies théoriques attendus. Ce phénomène est particulièrement vérifié pour les capteurs situés en hauteur sur les façades. Cela s'explique notamment par le rayonnement diffus, non pris en compte dans la part théorique issue des réflexions. Ce rayonnement diffus est plus important sur les capteurs ayant une faible influence des masques liées à la façade opposée. Cette observation est donc cohérente. L'effet de "cloche" observé par les points rouges et verts, maximum pour les capteurs  $E3$  et  $W3$

est également une observation logique car ce sont pour ces capteurs que les facteurs de forme avec la façade opposée sont les plus importants.

On note toutefois que les ratios d'énergie théoriques sont supérieurs aux ratios d'énergies issues des mesures. Plusieurs éléments peuvent expliquer cette observation. Premièrement, la méthode de calcul des facteurs de forme utilisée n'est qu'une approximation du facteur de forme réel du capteur. Par ailleurs, la méthode de calcul des facteurs de forme a tendance à sur-estimer les facteurs de forme pour les mailles situées à proximité des masques. En l'occurrence cela correspond à celles ayant un côté commun avec les mailles situées au sol.

### 3.4.6 Mesures en configuration $H/W = 2$ .

On s'intéresse à présent aux configuration  $H/W = 2$ . Seule la configuration n°7 est détaillée ici. L'ensemble des acquisitions réalisées sont disponibles en annexe.

#### 3.4.6.1 Configuration n°7 : réflexions sur bardage blanc.

Dans cette configuration, les deux façades sont montées avec des bardages blancs identiques à ceux de la configuration n°4 présentée précédemment. On observe de nouveau que les irradiances relevées en façades est et ouest sont bien symétriques. On note que les capteurs  $E2$  et  $E3$  mesurent des irradiances légèrement trop faibles, probablement liées à une mauvaise orientation des capteurs car le même phénomène n'est pas observé avec les capteurs de la façade orientée ouest.

On note un fort piégeage radiatif, notamment relevé par les capteurs situés au sol avec  $1200\text{W}/\text{m}^2$  de relevés par les capteurs  $SW$  et  $SE$ , respectivement à 12h28 et 14h50. Cela représente 290 et  $300\text{W}/\text{m}^2$  de plus que le rayonnement global mesuré par le capteur  $Glob$  aux mêmes instants, soit 132% et 133% de l'irradiance globale aux mêmes heures. De même l'impact des réflexions apparaît de manière évidente avec des "pics" de réflexion à 11h55 et 15h35 pour le capteur  $SC$ . Comme évoqué Section 1.3.1, cette acquisition semble confirmer qu'une configuration  $H/W = 2$  permet d'augmenter le piégeage radiatif par rapport à une configuration  $H/W = 1$  [42].

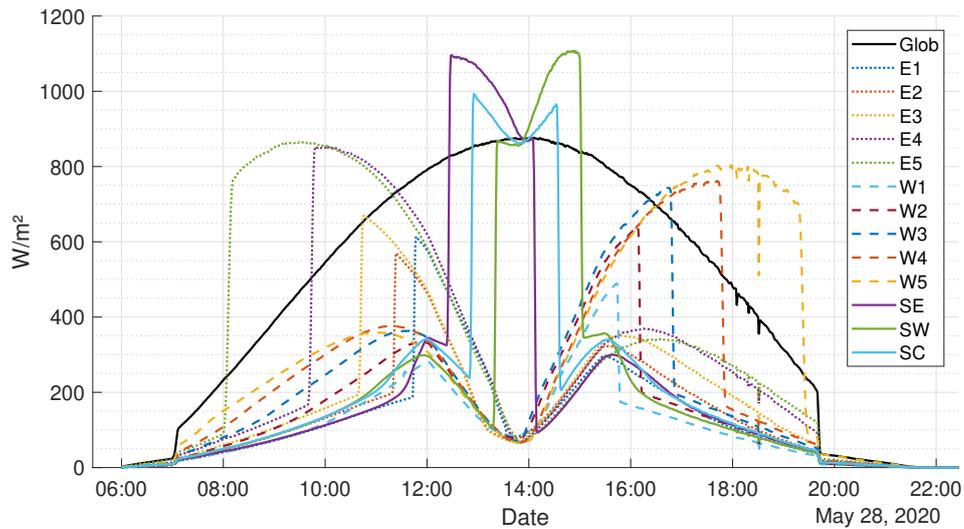


FIGURE 3.38 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 27 mai 2020. Les deux façades sont équipées de bardages blancs (Bardage Blanc).

### 3.4.7 Analyse des résultats en configuration $H/W = 2$ .

Comme dans le cas de la configuration précédente, on utilise le coefficient  $\tau$  pour comparer les apports d'énergie issus des irradiances sur les différentes surface de la maquette d'étude.

Les journées définies sont les suivantes :

Configuration	Config n°6	Config n°7	Config n°8	Config n°9
Levé Sol.	5h30	5h30	5h30	5h30
Couché Sol.	22h00	22h00	22h00	22h00
Midi SOL.	13h43m00s	13h43m00s	13h43m00s	14h00m00s

TABLE 3.9 – Heures relevées permettant de définir les périodes "matin" et "après-midi" dans le cadre de la première campagne de mesure réalisée ( $H/W = 2$ ).

#### 3.4.7.1 Analyse des relevés en façade est.

En premier lieu, l'observation des coefficients  $\tau$  pour l'ensemble des configurations 6, 7, 8 et 9 est représentative des coefficients de réflexion des matériaux installés dans la maquette.

Par ailleurs, cette analyse révèle l'impact marqué du bardage noir par rapport au bardage blanc entre les configurations n°7 et n°8, puis entre les configurations n°8 et n°9.

En effet, on observe un coefficient  $\tau$  supérieur de 0.2 (capteur  $E1$ ) à 0.3 (capteur  $E4$ ). Cela pourrait correspondre à un gain potentiel de 30% d'énergie en façade, lors d'une demi-journée claire, en fonction de la couleur du matériau installé sur la façade opposée. Cette observation est vérifiée avec la configuration n°9, qui présente des coefficients  $\tau$  comparables avec la configuration n°8 sur la demi-journée du matin. On observe également sur la demi-journée de l'après midi

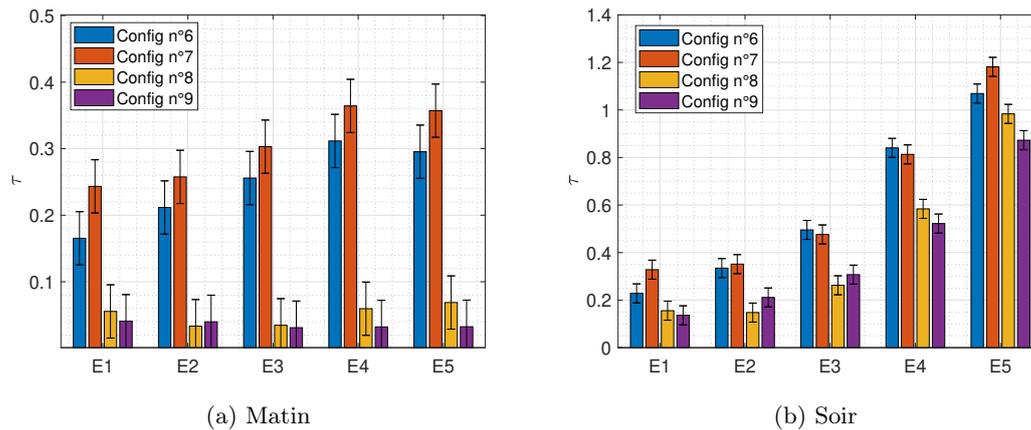


FIGURE 3.39 – Indicateur  $\tau$  pour les capteurs situés en façade orientée est. Rapport  $H/W = 2$ .

### 3.4.7.2 Analyse des relevés en façade ouest.

Les relevés en façade ouest sont de nouveau cohérents avec les observations attendues, par rapport aux coefficients de réflexion des matériaux utilisés. Comme sur la façade est, l'impact du bardage noir apparaît nettement lors de la période du "matin". En effet, les coefficients  $\tau$  relevés dans le cas de la configuration n°9 sont de 0.03 au maximum (capteur  $W5$ ) contre 0.36 dans le cas de la configuration n°8 (capteur  $W5$ ). Lors de la période de "l'après-midi", les coefficients  $\tau$  sont similaires entre ces deux configurations. Cela semble indiquer une faible contribution de l'énergie issue des réflexions multiples, ce qui est cohérent dans le cas d'un matériau ayant un faible coefficient de réflexion en façade opposée.

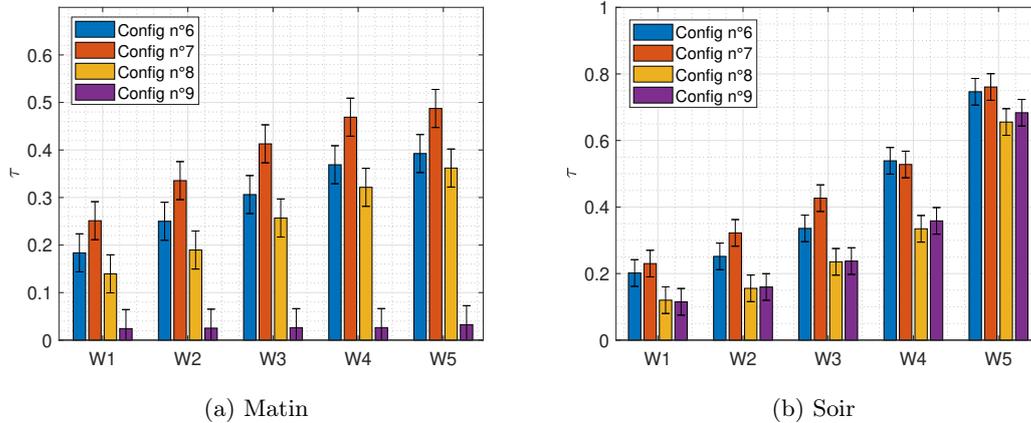


FIGURE 3.40 – Indicateur  $\tau$  pour les capteurs situés en façade orientée ouest. Rapport  $H/W = 2$ .

### 3.4.7.3 Analyse des relevés au sol.

L'analyse des coefficients  $\tau$  ne révèle que peu de différences entre les configurations n°8 et n°9. Seul le capteur SW lors de la période du "matin" semble indiquer une différence notable entre ces deux configurations. Cela est certainement lié au matériau installé sur la façade orientée vers l'est, blanc dans la configuration n°8, qui augmente la part réfléchi sur le capteur central. L'absence de différence notable sur les capteurs SE et SW pourrait être liée aux masques importants générés par les façades proches. De nouveau les configurations n°6 et n°7 présentent des coefficients  $\tau$  plus importants, 0.42 en moyenne dans le cas de la configuration n°7.

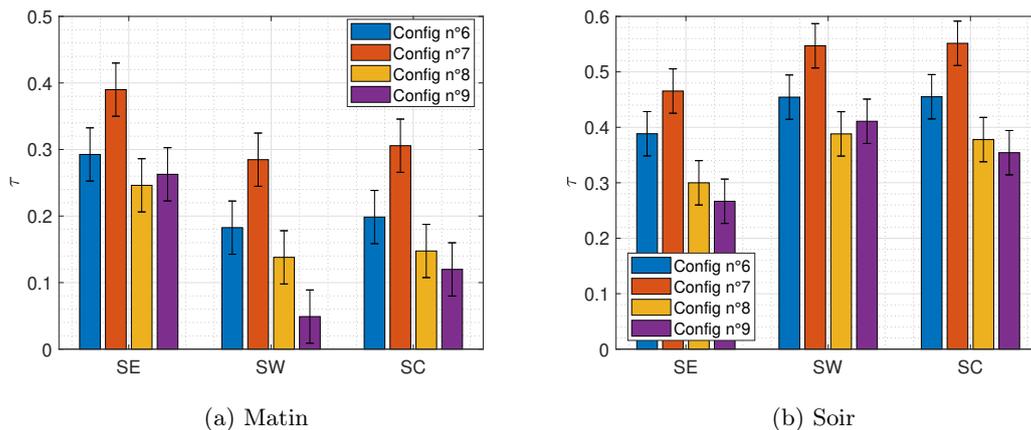


FIGURE 3.41 – Indicateur  $\tau$  pour les capteurs situés au sol. Rapport  $H/W = 2$ .

Globalement, sur l'ensemble des configurations testées, les coefficients  $\tau$  sont plus importants pour les périodes des "après-midi". Cela s'explique par le masque généré par la montagne de la dent du chat qui minimise la période durant laquelle l'irradiance globale relevée est supérieure à celle relevée par les capteurs situés sur la façade orientée vers l'ouest.

### 3.4.8 Reconstitution des coefficients de réflexion.

Comme dans le cas des premières acquisitions en configuration  $H/W = 1$ , on cherche à évaluer la correspondance entre les mesures effectuées et les coefficients de réflexion des matériaux installés dans la maquette.

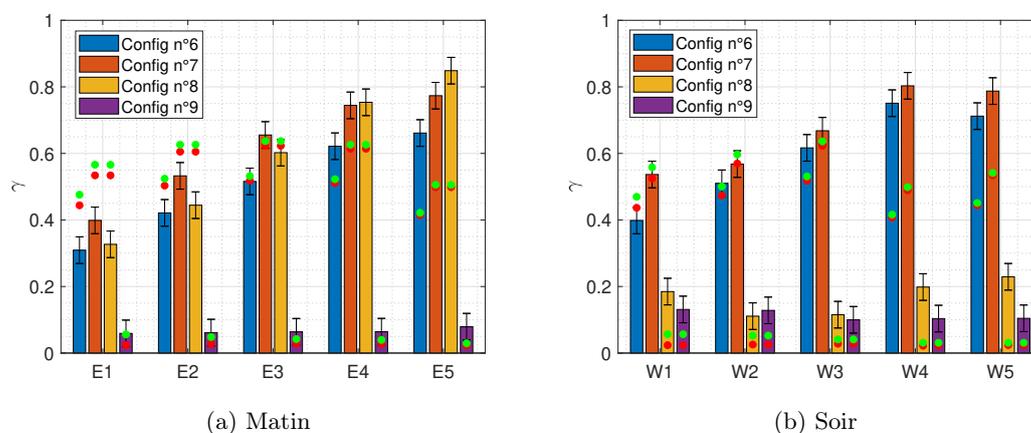


FIGURE 3.42 – Rapport d'énergie entre les façades Est et Ouest dans le cas  $H/W = 2$ . Les points rouges représentent la part théorique d'énergie théoriquement réfléchié par la façade opposée. Comme précédemment, les points verts représentent la somme de l'énergie théoriquement réfléchié par la façade opposée et de l'énergie théoriquement réfléchié par le sol.

On observe figure 3.42 des effets similaires à ceux observés figure 3.37. Globalement, les ratios d'énergie théoriques attendus semblent correspondre à ceux obtenus après mesure, en particulier pour les capteurs  $E3$  et  $W3$ , où, rappelons le, les facteurs de forme avec la façade opposée sont maximaux. De nouveaux, les ratios d'énergie théorique sont plus faibles que ceux mesurés pour les capteurs  $E4$ ,  $E5$ ,  $W4$  et  $W5$ , ce qui est en cohérence avec les observations figure 3.37 et s'explique de nouveau par un rayonnement diffus important sur ces capteurs et non pris en compte dans les ratios d'énergie théorique.

On note cependant un décalage important entre les ratios d'énergie théorique et les ratios d'énergie mesurée pour les configurations n°6 à n°8 sur les capteurs  $E1$  et  $E2$ . Comme précédemment, cela peut s'expliquer par une sur-évaluation des facteurs de forme pour ces capteurs. Toutefois, on note que les ratios d'énergie relevés sur les capteurs

$E1$  et  $E2$  sont plus faibles que ceux relevés sur les capteurs  $W1$  et  $W2$  tandis que les relevés sont similaires sur les autres capteurs à altitude équivalente. Cette observation pourrait être révélatrice d'une mauvaise installation des capteurs. Cependant, l'étude des acquisitions ne permet pas de mettre en évidence une mauvaise installation commune à l'ensemble des configurations.

### 3.4.9 Perspective sur l'acquisition des mesures.

La méthode de remplacement des façades s'est avérée longue et chronophage, bien que particulièrement adapté pour modifier le rapport  $H/W$  du canyon ainsi que les revêtements des façades. Cela a été un frein au test d'un plus grand nombre de configurations. La principale source d'erreur reste la méthode de fixation des capteurs. Après retour d'expérience, l'utilisation d'un autre système de fixation aurait été plus efficace et aurait certainement permis d'éviter certains décalages difficilement explicables autrement que par un décalage dans l'orientation des capteurs entre les mesures d'une même façade.

Il aurait également fallu pouvoir multiplier les journées de référence avec une même configuration du canyon urbain. Ainsi cela aurait permis d'effectuer des analyses statistiques sur une même configuration.

Enfin, l'installation de plusieurs maquettes permettrait de comparer des journées de références identiques pour différentes configurations et s'affranchir des incertitudes d'interprétations liées aux conditions météorologiques.

## 3.5 Conclusions sur les mesures.

Des différences notables ont été observées entre les différentes configurations testées avec la maquette. Néanmoins, il semble que les observations réalisées soient plus liées à l'impact des coefficients de réflexion que des propriétés optiques des matériaux, excepté dans le cas de la configuration  $n^{\circ}5$ . Toutefois, les mesures optiques et les modèles de BRDF ont montré que certains matériaux peuvent présenter une part non nulle de réflexions spéculaires. Afin de valider les modèles développés au chapitre 2, et de vérifier lequel semble le plus pertinent, les modèles sont comparés aux résultats issus des campagnes expérimentales. Les modèles de réflexion sont également intégrés au modèle de lancer de rayons.

## 3.6 Perspectives.

Les mesures réalisées dans ce chapitre ouvrent la voie à la caractérisation et l'évaluation d'un plus grand nombre de matériaux. Ces méthodes peuvent également s'appliquer à l'évaluation des propriétés optiques de réflexion d'un module photovoltaïque, avec une qualification de la distribution énergétique générée après réflexion, mais aussi de son impact lorsqu'il couvre une part non négligeable des façades du canyon urbain.

La maquette ouvre également la voie à des mesures thermiques, notamment au

niveau des températures de surface. Une version 2 de la maquette, avec des ambiances monitorées en face arrière des façades, permettrait la réalisation de telles mesures.

## Chapitre 4

# Intégration des propriétés des matériaux mesurées dans les simulations.

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction.</b>	<b>172</b>
<b>4.2</b>	<b>Intégration de propriétés optiques mixtes.</b>	<b>172</b>
4.2.1	Intégration dans le modèle par lancer de rayons	172
4.2.2	Prise en compte des propriétés de réflexion dans Grasshopper.	173
<b>4.3</b>	<b>Comparaison des résultats simulés et des mesures expérimentales.</b>	<b>175</b>
4.3.1	Construction des modèles.	176
4.3.1.1	Comparaison des ensoleillements simulés et mesurés.	176
4.3.1.2	Prise en compte du diffus dans le cas du lancer de rayons.	178
4.3.1.3	Paramètres des modèles.	180
4.3.2	Comparaison des résultats sous hypothèse lambertienne : étude de la configuration n°6 / cas du crépis.	180
	Comparaisons sur le capteur <i>SE</i> .	181
	Comparaisons sur le capteur <i>E3</i> .	182
	Comparaisons sur le capteur <i>W3</i> .	182
4.3.3	Comparaison des résultats sous hypothèses spéculaires : étude de cas de la configuration n°7 / cas du bardage blanc.	183
4.3.3.1	Résultats d'ensoleillement (Radiosité).	184
4.3.3.2	Résultats d'ensoleillement (Lancer de rayons).	186
	Apports des réflexions lambertiennes (Lancer de rayons).	189
	Apports des réflexions spéculaires (Lancer de rayons).	191
<b>4.4</b>	<b>Conclusion sur les comparaisons.</b>	<b>193</b>

---

## 4.1 Introduction.

Comme évoqué précédemment, l'objectif de ce chapitre est d'injecter dans les modèles développés au chapitre 2 les modèles de réflexions construits au chapitre 3. Le chapitre 3 identifie des modes de réflexion diffus et brillant. Or la prise en compte du terme brillant dans un modèle par lancer de rayons amène une complexité supplémentaire dans sa convergence statistique. Afin de s'en affranchir, on ne retiendra que des modèles de réflexion qualifiés "d'hybrides" constitués d'une pondération de modèles lambertien et spéculaire. L'astuce résidera alors dans le choix des coefficients de pondération, extraits des mesures réalisées au chapitre précédent (chapitre 3).

## 4.2 Intégration de propriétés optiques mixtes.

On définit comme "réflexion mixte" une réflexion mêlant les modes de réflexion lambertien et spéculaire.

### 4.2.1 Intégration dans le modèle par lancer de rayons

L'objectif est donc à présent d'intégrer les mesures optiques réalisées dans le modèle de lancer de rayon. Comme vu précédemment (chapitre 2), seule la méthode par lancer de rayons permet ici de prendre en compte des réflexions de natures autres que celle lambertienne. Or, une construction statistique reposant sur un échantillonnage par importance, telle que réalisée pour le modèle lambertien au chapitre 2, imposerait de spécialiser cet échantillonnage pour chaque BRDF mesurée. En l'absence de formulation mathématique simple permettant de réaliser cet échantillonnage par importance, on considère que l'intégralité de l'énergie réfléchi par le terme brillant est réfléchi de manière purement spéculaire.

Les modèles de réflexion proposés section 3.2 permettent déjà de générer des réflexions soit spéculaires soit lambertiennes. En reprenant la démarche proposée dans la reconstitution des modèles de réflexion (section 3.3), on fera alors l'hypothèse simplificatrice que la réflexion d'un rayon sur une surface donnée se fait soit de manière spéculaire, soit de manière lambertienne. Chaque composante de cette réflexion est associée aux termes lambertien et spéculaire des modèles de Phong (section 3.3). La réflexion spéculaire reste toutefois associée à une réflexion purement géométrique, sans tenir compte de l'aspect brillant du terme spéculaire utilisé dans la construction du modèle de BRDF dans la section précédente (Section 3.3.7).

Les résultats obtenus au chapitre 3 ont permis d'identifier les coefficients de réflexion associés aux modes de réflexion lambertien et spéculaire. Afin de simuler le mode de réflexion hybride, il faudrait à chaque réflexion générer deux rayons, l'un selon un mode de réflexion spéculaire, l'un selon un mode de réflexion lambertien. La structure du code ne permettant pas de générer deux rayons à chaque réflexion, un choix du mode de réflexion doit être effectué à chaque réflexion. On s'appuie pour cela sur un nouvel

échantillonnage par importante, permettant de générer dans les proportions adéquates chaque mode de réflexion. Pour réaliser cet échantillonnage par importance, on s'appuie sur la construction du modèle de BRDF obtenu au chapitre 3, rappelé dans l'équation 4.1.

$$f_r(\theta_i, \theta_o, x) = \rho_d \frac{1}{\pi} \cos(\theta_o) + \rho_s R_x \frac{\alpha + 1}{2\pi} \left( \cos_+ \left( \theta_s(\theta_i, \theta_o) \right) \right)^\alpha. \quad (4.1)$$

On réécrit la fonction de BRDF de la façon suivante, de sorte à prendre en compte l'approximation du mode de réflexion brillant par un mode de réflexion purement géométrique. On rappelle qu'ici  $k_d$  et  $k_s$  sont les coefficients de réflexion associés aux modes de réflexion lambertien et spéculaire.

$$f_r(\theta_i, \theta_o, x) = k_d \frac{1}{\pi} \cos(\theta_o) + k_s \delta(\theta - \theta_s). \quad (4.2)$$

Soit  $m$  une variable aléatoire générée selon une loi uniforme entre 0 et 1. La figure 4.1 permet alors d'identifier le mode de réflexion obtenu à partir de  $m$ . Les coefficients  $k_d$  et  $k_s$  s'apparentent alors aux probabilités de générer chaque mode de réflexion.

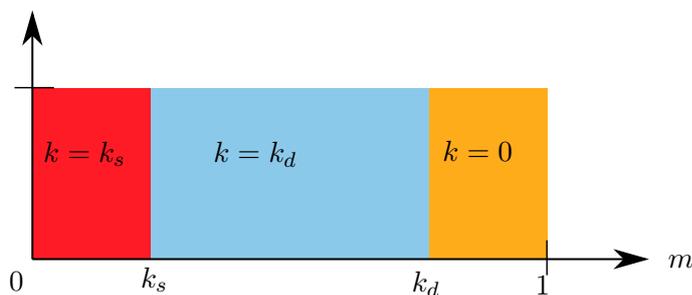


FIGURE 4.1 – Représentation schématique de l'identification du mode de réflexion généré à partir d'une variable aléatoire  $m$  générée entre 0 et 1.

La construction numérique du modèle se fait de façon analogue. Le mode de réflexion est identifié grâce à une variable aléatoire générée selon une loi uniforme entre 0 et 1. L'énergie transportée par le rayon n'est alors plus multipliée par le coefficient de réflexion, c'est l'effet statistique du modèle qui permet d'obtenir en proportion la bonne distribution des énergies réfléchies.

#### 4.2.2 Prise en compte des propriétés de réflexion dans Grasshopper.

Le logiciel *Rhinoceros - Grasshopper*<sup>®</sup> offre la possibilité de créer des matériaux aux propriétés de réflexion variables. Ainsi, à l'instar de ce que l'on propose dans notre modèle, les BRDFs peuvent être prises en compte de manière simplifiée. La méthodologie

utilisée pour intégrer ces modèles de réflexion dans le logiciel est similaire à celle utilisée dans notre modèle. Elle repose sur l'utilisation de trois paramètres : le coefficient de réflectance total (*Reflectance*), le coefficient de spécularité (*specularity*) et le coefficient de rugosité (*Roughness*). Notons que le coefficient de spécularité n'influence pas le modèle de réflexion de la même façon dans le cas d'un métal. Le coefficient de spécularité agit de façon analogue au coefficient de spécularité utilisé dans le modèle proposé dans cette thèse. Ce terme permet de moduler les proportions d'énergie réfléchie de manière uniforme et spéculaire, tout en assurant la conservation de l'énergie. L'influence de ce terme est différente dans le cas d'un métal, où la réflexion diffuse, simulée de manière uniforme, est modifiée en étant privilégiée dans la direction de la normale à la surface du matériau. Enfin, un coefficient de rugosité, non présent dans le modèle proposé dans cette thèse, permet également de modifier les réflexions générées par le matériau. Ce coefficient génère une perturbation des réflexions centrées sur la direction de réflexions spéculaires. La figure 4.2 permet de visualiser l'influence des différents paramètres sur la répartition énergétique lors de la réflexion. On note bien que les modèles de réflexion proposés se décomposent en réflexion spéculaire et en réflexion uniforme.

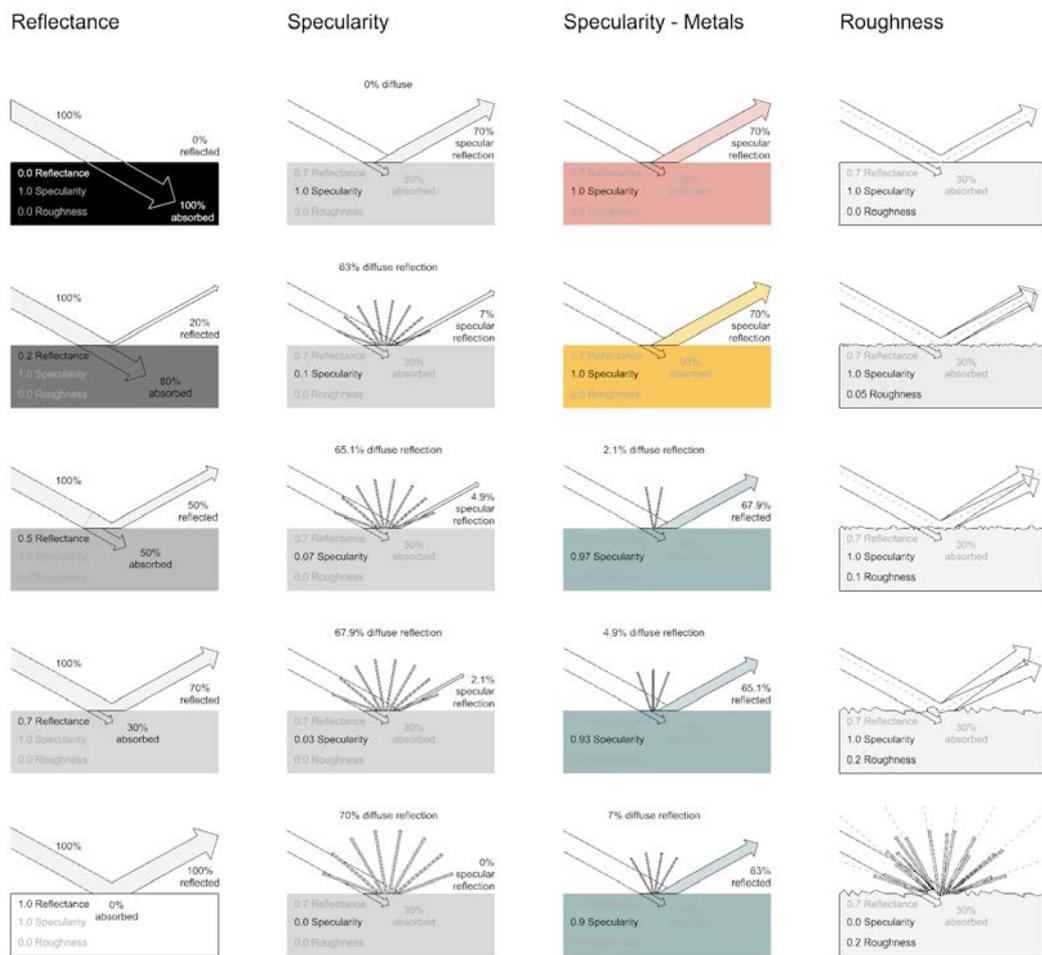


FIGURE 4.2 – Nature des différentes réflexions en fonction de la surface [102].

Les résultats non satisfaisant obtenus avec *Rhinoceros - Grasshopper*<sup>®</sup> et les différents plug-in associés (*Ladybug*, *Honeybee* et *Diva*) ne nous ont pas permis d'évaluer les distributions énergétiques obtenues à partir de ces modèles, et de les confronter aux modèles développés au cours de cette thèse.

### 4.3 Comparaison des résultats simulés et des mesures expérimentales.

L'objectif est à présent de proposer une comparaison des résultats numériques obtenus avec les résultats expérimentaux relevés sur la maquette extérieur. La connaissance des matériaux utilisés dans les différentes configurations de la maquette permet de modéliser au mieux, avec le modèle proposé, leurs propriétés de réflexion.

### 4.3.1 Construction des modèles.

Dans cette partie, les entrées du modèle numérique sont les ensoleillements direct et diffus mesurés par la station météorologique de la plateforme INCAS. On considère que l'on se place constamment dans le cas d'une journée claire définie comme "clear sky" dans les conditions de ciel CIE (*ISO 15469 :2004(E)* et *CIE S 011/E :2003*) [178]. La position du soleil reste simulée. Pour vérifier la cohérence entre la position du soleil réel et la position du soleil simulée, on compare les ensoleillements globaux sur une surface horizontale obtenus dans chaque cas.

#### 4.3.1.1 Comparaison des ensoleillements simulés et mesurés.

Les mesures d'irradiances effectuées par la station météorologique de la station INCAS sont utilisées comme données d'entrée du modèle. La position du soleil est cependant simulée. La station météorologique fournit les rayonnements :

- Le rayonnement direct normal  $B_n$  (mesuré).
- Le rayonnement diffus sur une surface horizontale  $D_h$  (déduit).
- Le rayonnement global sur une surface horizontale  $G_h$  (mesuré).

Les instruments de mesure de la station météorologique ne permettant pas de mesurer le rayonnement diffus horizontal ( $B_h$ ), ce dernier est reconstruit. Pour vérifier la cohérence du rayonnement diffus reconstruit, et de la position du soleil simulée, on reconstruit le rayonnement direct normal  $B_n$  (équation 4.3) que l'on compare à celui mesuré. La comparaison de ces valeurs est présentée figure 4.3.

On note  $B_{n,r}$  le rayonnement direct normal reconstruit. Soit  $G_h$  le rayonnement global horizontal mesuré, et  $D_{h,d}$  le rayonnement diffus horizontal déduit fournit par la station météorologique INCAS. Soit  $\zeta$  l'angle zenithal.  $B_{n,r}$  est alors calculé de la façon suivante (équation 4.3) :

$$B_{n,r} = \frac{G_h - D_{h,d}}{\zeta} \quad (4.3)$$

On observe figure 4.3 qu'un léger biais d'environ  $10 \text{ W/m}^2$  est relevé l'après midi, mais cela reste très correct. Il est toutefois impossible d'associer ce biais à une approximation issue du calcul de la position du soleil ou une approximation issue de la reconstitution du rayonnement diffus horizontal. Les perturbations et les fluctuations importantes (en particulier générées par les masques associés aux montagnes bordant la vallée, à 6h58 et 19h32) correspondent dans les deux cas.

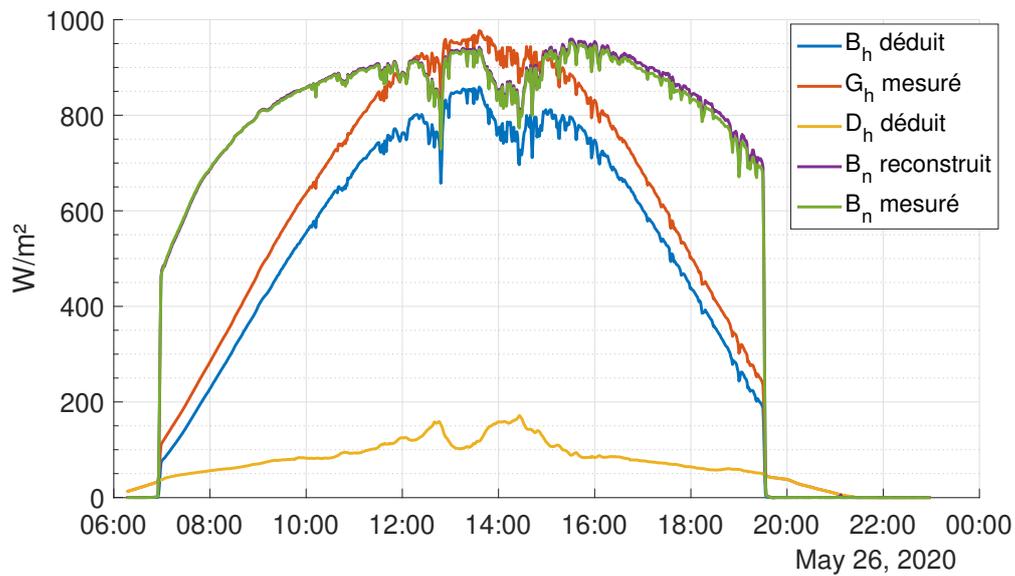


FIGURE 4.3 – Evolution des différents rayonnements au cours de la journée du 26 mai 2020, et comparaison des rayonnements directs normal mesuré et normal reconstruit.

La figure 4.4 permet de comparer les mesures du rayonnement global horizontal avec les rayonnements globaux horizontaux obtenus par simulation par radiativité et lancer de rayon. Encore une fois, on relève de légères approximations dans le cas des simulations en lancer de rayons, liées à l’approche statistique du modèle, tandis que le modèle par radiativité permet d’obtenir exactement l’ensoleillement global horizontal mesuré.

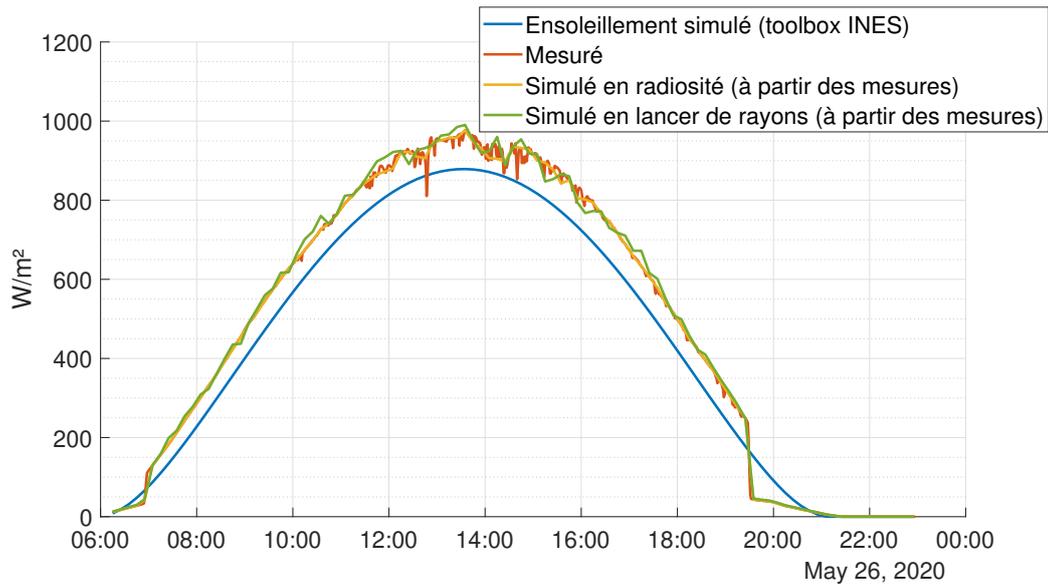


FIGURE 4.4 – Comparaison des ensoleillements globaux sur une surface horizontale mesurés et simulés. La courbe bleue représente l'ensoleillement global théorique simulé, la courbe rouge l'ensoleillement global mesuré, la courbe jaune, l'ensoleillement global simulé en radiosité (reçu par une maille située en toiture) et la courbe verte l'ensoleillement global simulé par une méthode de lancer de rayons (relevé sur une maille située en toiture).

#### 4.3.1.2 Prise en compte du diffus dans le cas du lancer de rayons.

Dans le cas du lancer de rayons, le rayonnement diffus est calculé à partir de la méthode des radiosités. Afin de limiter le temps de calcul et l'espace mémoire nécessaire au stockage des facteurs de forme, on utilise l'inclusion des maillages développée pour le lancer de rayon. Cela permet de considérer le rayonnement diffus total incident, en prenant en compte les réflexions, sur l'ensemble des mailles composant la scène urbaine. La figure 4.5 permet de visualiser l'irradiance obtenue par radiosité et en ne considérant uniquement le rayonnement diffus comme source. Le résultat projeté apparaît sur la figure 4.6. Ce résultat est bien évidemment uniquement fonction du maillage utilisé pour calculer le rayonnement diffus.

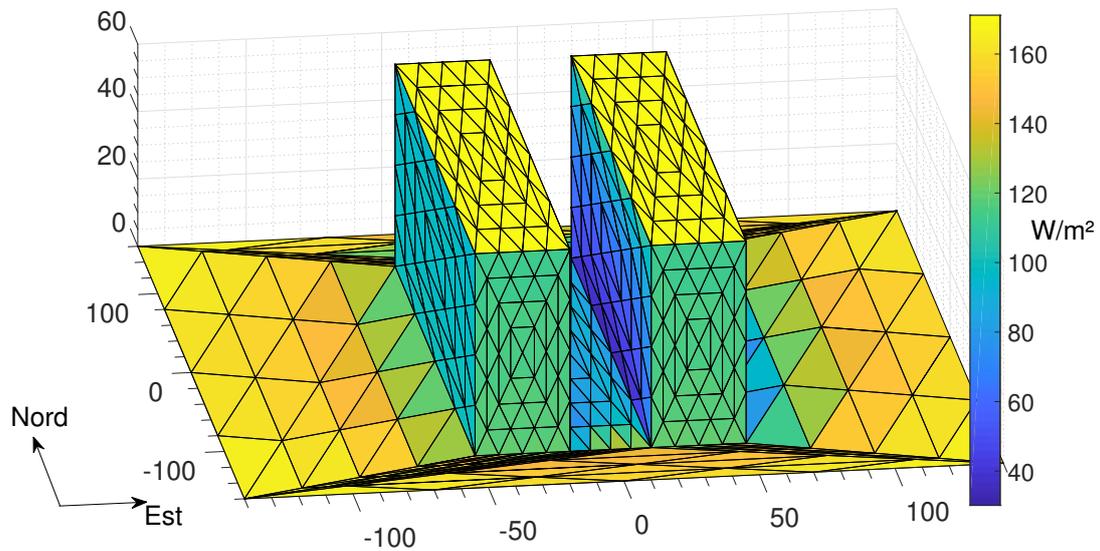


FIGURE 4.5 – Illustration des résultats de rayonnement diffus simulés à partir des données météorologiques mesurées calculé sur le maillage intermédiaire, avant projection, dans le cas du lancer de rayons pour la journée du 26 mai 2020 à 12h45 (loc.) sur une scène de rapport  $H/W = 2$  montée en bardage blanc sur chaque face.

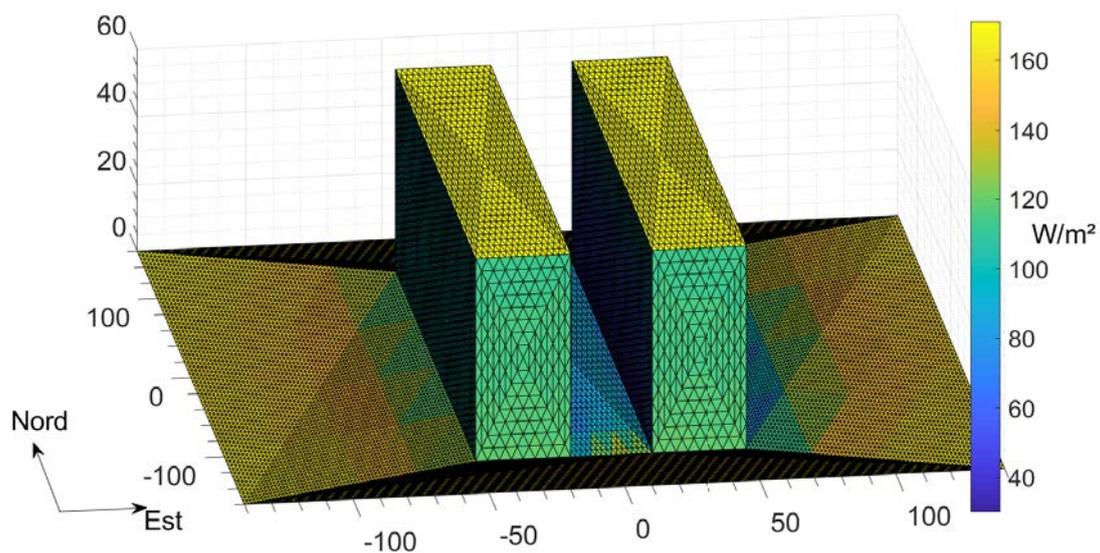


FIGURE 4.6 – Illustration du résultat de rayonnement diffus projeté sur le maillage d'étude dans le cas du lancer de rayons pour la journée du 26 mai 2020 à 12h45 (loc.) sur une scène de rapport  $H/W = 2$  montée en bardage blanc sur chaque face.

### 4.3.1.3 Paramètres des modèles.

La scène d'étude est adaptée pour correspondre à la maquette. La rue fait alors 120 m de long, pour des façades de 60 m de haut. La largeur varie alors entre 30 m et 60 m en fonction de la configuration que l'on souhaite tester, pour garantir des rapports d'aspects respectivement de  $H/W = 2$  et de  $H/W = 1$ .

Le nombre de mailles du maillage final varie entre les modèles par radiosité et par lancer de rayons. Il est de 8000 dans le cas du lancer de rayons et de 9000 dans le cas de la radiosité. Afin de réduire les temps de calcul en lancer de rayons,  $5 \times 10^6$  rayons sont générés à chaque pas de temps. Le nombre de réflexions est limité à 5.

Les pas de temps sont de 1 minute en radiosité et de 10 minutes en lancer de rayons. Les heures de début et de fin sont déterminées en fonction de la configuration afin de correspondre aux périodes d'ensoleillement mesurées.

### 4.3.2 Comparaison des résultats sous hypothèse lambertienne : étude de la configuration n°6 / cas du crépis.

L'objectif de cette comparaison est de valider le comportement similaire des méthodes par radiosité et par lancer de rayons, sous hypothèse de réflexions lambertiennes, observé au chapitre 2. On utilise donc une configuration sans composante de réflexion spéculaire.

Il est rappelé que dans cette configuration, l'ensemble des façades sont montées avec un crépis de couleur blanc. Les coefficients de réflexion sont rappelés dans le tableau suivant (tableau 4.1) :

Surface	Coef. de réfl. lambertien	Coef. de réfl. spéculaire
Sol	0.1	0
Murs (crépis)	0.74	0
Toits	0.7	0

TABLE 4.1 – Coefficients de réflexion utilisés dans le cas de la simulation de la configuration n°6.

A noter que pour s'affranchir des écarts de diffus entre chaque modèle et se focaliser sur les différences calculées sur l'ensoleillement direct, on ajoutera dans chaque simulation l'irradiance diffuse calculée par le modèle par radiosité à l'emplacement du capteur.

On notera également par abus de langage *Irrad. dir.* l'irradiance incidente après réflexions issue du rayonnement direct uniquement.

**Comparaisons sur le capteur *SE*.** La figure 4.7 permet de comparer les ensoleillements mesurés à ceux simulés sur le capteur *SE*. On remarque rapidement que dans chaque cas, le capteur *SE* n'est pas identifié comme au soleil à la même heure. Deux phénomènes peuvent générer cette heure. Dans un premier temps on a vu (chapitre 2) que l'initialisation des ensoleillements directs dans le cas du modèle par radiosité peut générer des erreurs d'ombrages. Nous verrons par la suite que cela peut générer des erreurs relativement importantes sur certaines heures. Dans un second temps, les maillages d'étude étant différents, des erreurs peuvent aussi provenir de l'approximation de la position des capteurs. Ainsi, la méthode par lancer de rayons indique une exposition au rayonnement direct pour le capteur *SE* de 12h15 à 13h55, contre une période d'exposition allant de 12h25 à 13h45 dans le cas de la radiosité. La période d'exposition au rayonnement direct mesurée est elle de 12h27 :48 à 14 :10 :48. En dehors de ces dates de transition, les modèles par radiosité et lancer de rayons montrent une bonne cohérence, ce qui est logique au regard des résultats du chapitre 2. Les valeurs simulées en réflexions, avant 12h15 et après 14 :11, correspondent aux mesures. C'est également le cas sur la période allant de 12h28 à 13h45, même si les modèles présentent une légère sur évaluation de l'irradiance, d'environ  $3 \text{ W/m}^2$  au maximum.

On note également un effet de "créneaux" dans le cas de la radiosité, cet effet étant dû aux approximations successives de la position du soleil au cours de la journée.

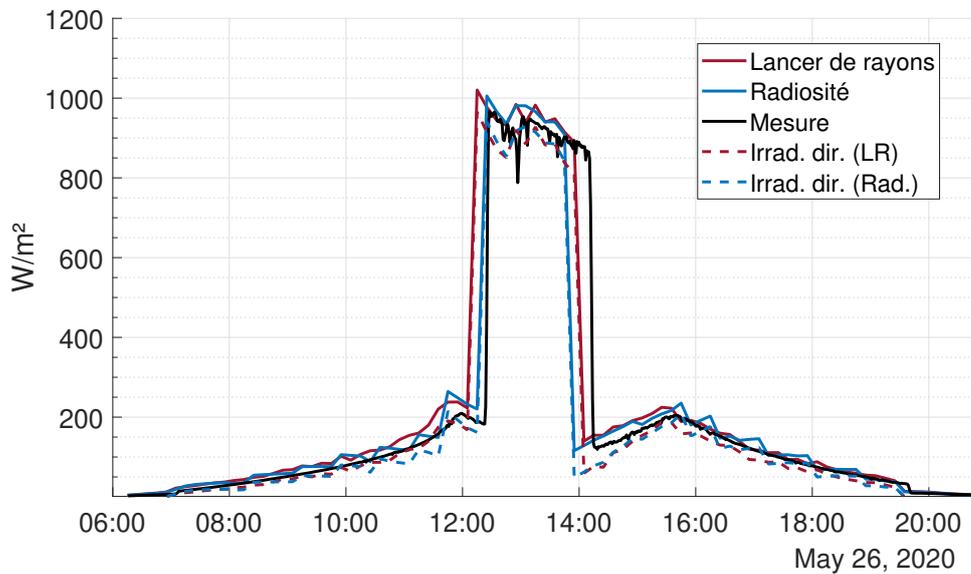


FIGURE 4.7 – Comparaison des irradiances simulées et mesurées sur le capteur *SE* dans le cas de la configuration 6. Les heures sont renseignées en heures locales.

**Comparaisons sur le capteur E3.** La figure 4.7 permet de comparer les irradiances mesurées à celles simulées sur le capteur *SE* dans la configuration n°6. On remarque de suite que la radiosité simule un pic d'irradiance non réaliste entre 9h55 et 10h15. Il s'agit en réalité de trois points sur lesquels l'approximation de la position du soleil, permettant de calculer les ombrages, génère un ensoleillement sur la maille associée au capteur. Pour corriger cela, il serait alors nécessaire d'affiner le maillage de la voûte céleste. En dehors de ce phénomène, on remarque de nouveau une très bonne cohérence entre les irradiances simulées par radiosité et celles simulées en lancer de rayons. La cohérence avec les mesures réalisées est également extrêmement bonne, même si les modèles semblent sur-évaluer l'irradiance entre 13h35 et 15h10, avec un excès d'environ  $30\text{W/m}^2$ . Les apports du rayonnement diffus semblent limités pour les capteurs situés dans le canyon urbain.

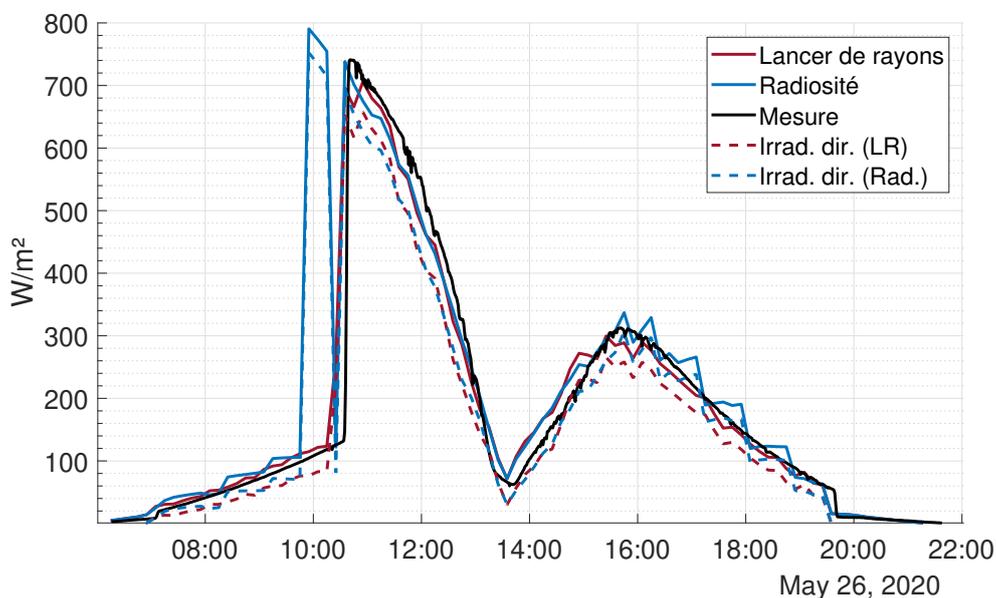


FIGURE 4.8 – Comparaison des irradiances simulées et mesurées sur le capteur E3 dans le cas de la configuration 6. Les heures sont renseignées en heures locales.

**Comparaisons sur le capteur W3.** La figure 4.9 permet de comparer les irradiances mesurées à celles simulées sur le capteur *W3*. On observe une bonne cohérence entre les irradiances mesurées et celles simulées, notamment sur les irradiances issues des réflexions (avant 13h34). On relève cependant un écart de  $110\text{W/m}^2$  entre les irradiances simulées entre 13h32 et 16h35. Cette écart, conséquent, est probablement lié à une position du capteur approximative. En effet, on observe figure A.11, figure située dans l'annexe A.4.2.1, que les irradiances relevées par ce capteur sont plus faibles que celles mesurées par les autres capteurs sur cette période de temps, d'environ  $60\text{W/m}^2$  par rapport au capteur *W5*. On peut alors tout à fait imaginer que la somme de cette erreur avec une

erreur liée à l'approximation de la position du capteur dans le cadre des simulations, aboutisse à une erreur conséquente sur l'irradiance relevée. Cependant, la nature des réflexions diffuses masque les effets de ces erreurs sur les irradiances issues des réflexions.

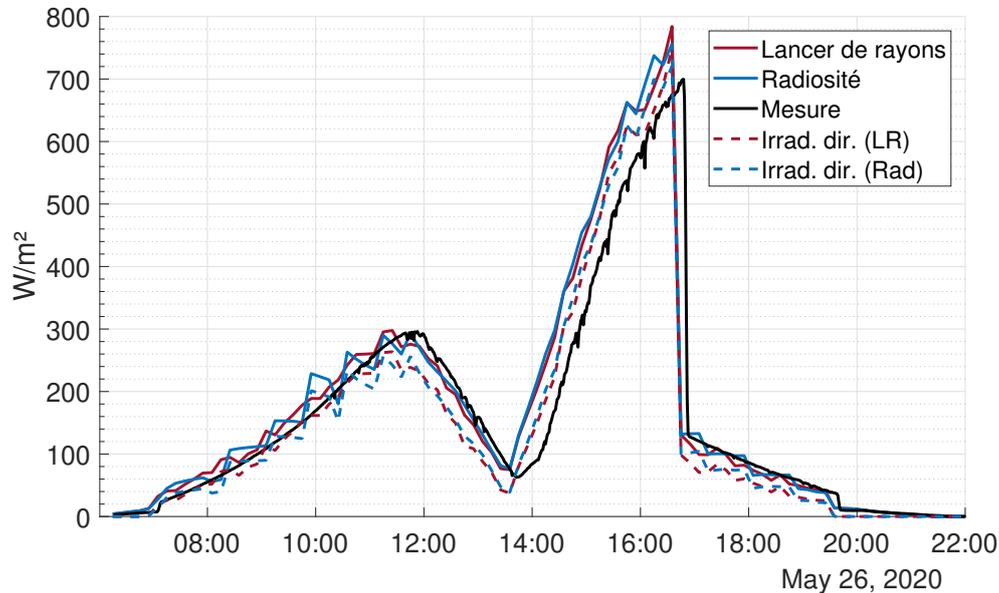


FIGURE 4.9 – Comparaison des irradiances simulées et mesurées sur le capteur W3 dans le cas de la configuration 6. Les heures sont renseignées en heures locales.

#### 4.3.3 Comparaison des résultats sous hypothèses spéculaires : étude de cas de la configuration n°7 / cas du bardage blanc.

L'objectif est à présent d'évaluer l'impact de la prise en compte des réflexions spéculaires dans le cas du modèle en lancer de rayons. On utilise pour cela la configuration n°7 qui correspond à un montage avec du bardage blanc sur chaque façade. On utilise également la configuration  $H/W = 2$  pour maximiser les réflexions.

Comme précédemment, les coefficients de réflexion mesurés pour les matériaux installés sur la maquette dans la configuration n°7 sont rappelés dans le tableau suivant (tableau 4.2). Les coefficients utilisés pour la simulation en radiosité correspondent à la somme des coefficients de réflexion lambertien et spéculaire.

Surface	Coef. de réfl. lambertien	Coef. de réfl. spéculaire
Sol	0.1	0
Murs (Bard. Blc.)	0.85	0.04
Toits	0.7	0

TABLE 4.2 – Coefficients de réflexion utilisés dans le cas de la simulation de la configuration n°7.

#### 4.3.3.1 Résultats d'ensoleillement (Radiosité).

On compare dans un premier temps les résultats obtenus par simulation via le modèle de radiosité avec les mesures relevées par les capteurs  $E1$ ,  $W3$  et  $SW$  dans la configuration n°7. Une partie des réflexions étant spéculaires, on s'attend à observer un écart entre la mesure et les valeurs simulées.

Comme dans le cas de la configuration n°6, la radiosité apparaît comme une stratégie de modélisation pertinente des ensoleillements. Les figures 4.10, 4.11 et 4.12 mettent cependant en évidence une bonne concordance entre les valeurs simulées et valeurs mesurées respectivement pour les capteurs  $E1$ ,  $W3$  et  $SW$ . Cette bonne approximation des mesures par une stratégie ne prenant pas en compte la distribution spéculaire d'une partie des réflexions provient probablement de la faible proportion de ces mêmes réflexions spéculaires. On observe de nouveau un effet de "créneaux" associé à l'approximation successive de la position du soleil en radiosité, bien que les heures de passage ombre-soleil (ou inversement) sont cohérentes sur la plupart des simulations. Seul un écart d'environ 10 minutes est relevé à 11h00 dans le cas de la simulation portant sur le capteur  $E1$  (figure 4.10).

Notons que les réflexions qualifiées ici de spéculaires correspondent en réalité à un mode de réflexion brillant, comportant donc un effet de réflexion diffuse. Cet effet de diffus associé au mode de réflexion brillant n'est pas pris en compte par le modèle de réflexion spéculaire telle qu'il est implémenté dans le modèle de lancer de rayons. Il est cependant possible que cet effet diffus soit modélisé en partie par la méthode par radiosité, réduisant l'erreur entre le modèle et la mesure.

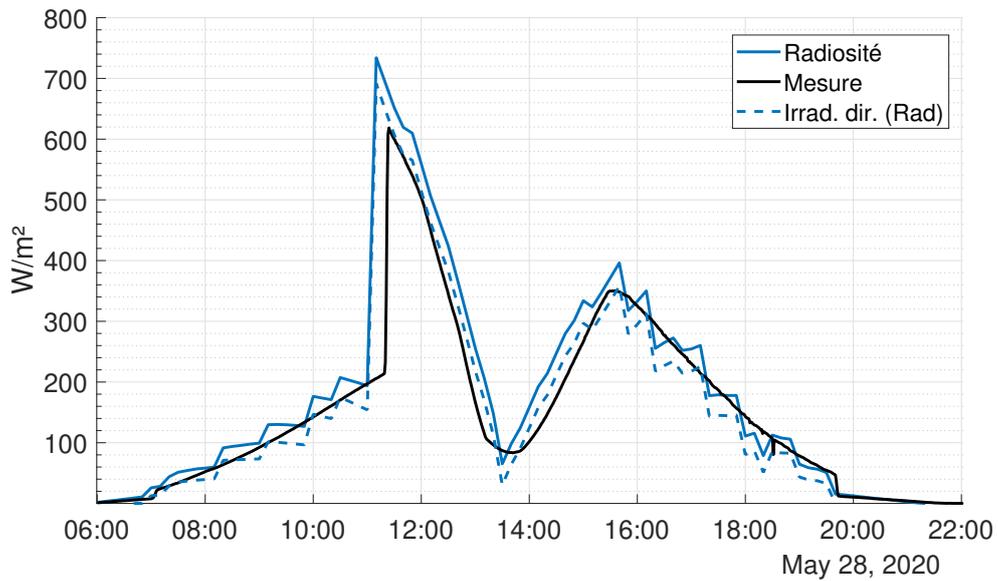


FIGURE 4.10 – Comparaison des irradiances simulées en radiosité et mesurées sur le capteur E1 dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

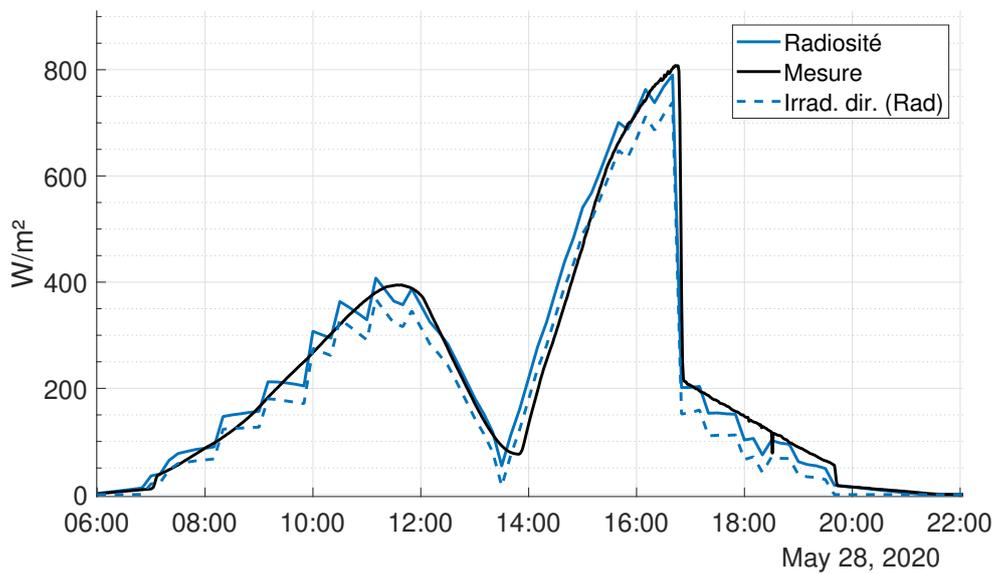


FIGURE 4.11 – Comparaison des irradiances simulées en radiosité et mesurées sur le capteur W3 dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

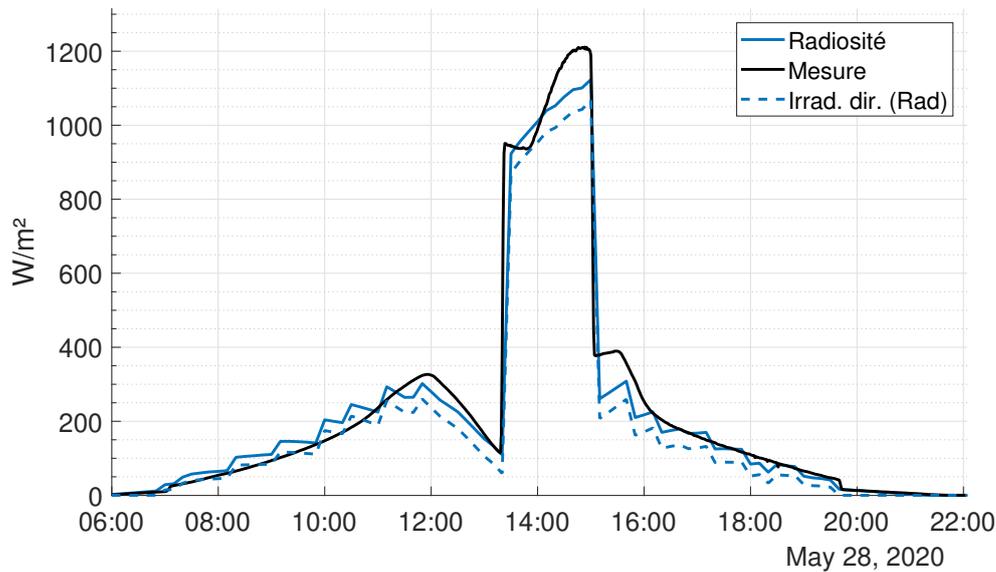


FIGURE 4.12 – Comparaison des irradiances simulées en radiosité et mesurées sur le capteur SW dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

#### 4.3.3.2 Résultats d'ensoleillement (Lancer de rayons).

On s'intéresse à présent à la modélisation des ensoleillements dans le cas de la configuration n°7 par méthode par lancer de rayons. Par simplification de la procédure de calcul, les résultats présentés ici sont obtenus comme la somme de trois différentes simulations. Deux simulations sont effectuées en lancer de rayons, pour calculer les apports issus des réflexions lambertiennes et spéculaires. Une troisième simulation est réalisée en radiosité pour calculer les apports du rayonnement diffus issu de la voûte céleste. Trois zones d'étude sont ici considérées : on s'intéresse aux points associés aux capteurs  $E1$ ,  $W3$  et  $SC$  (respectivement présentés aux figures 4.13, 4.14 et 4.15).

On observe sur ces points que les résultats obtenus présentent une bonne cohérence par rapport aux mesures, avec l'irradiance simulée qui varie autour de l'irradiance mesurée pour chaque point d'étude, avec environ  $30\text{W/m}^2$  d'approximation. Une faible sous estimation des ensoleillements est relevée ponctuellement, à maximum de  $80\text{W/m}^2$  aux alentours de 15h30 pour le capteur  $E1$ . Cette sous estimation est d'environ  $100\text{W/m}^2$  à 11h00 et 15h20 pour le capteur  $E1$  (figure 4.13), mais aussi à 11h20 et 16h10 pour le capteur  $W3$  (figure 4.14). Les irradiances simulées présentent une variabilité représentative de l'effet statistique du modèle. Cette variabilité reste modérée (inférieure à  $20\text{W/m}^2$ ). On observe également, comme dans le cas de la radiosité, une bonne cohérence sur la position du soleil qui se traduit par des passages soleil-ombre (et inversement) parfaitement

coïncidents au niveau de chaque capteur.

De manière générale, on note que les résultats obtenus ne sont pas significativement meilleurs que ceux obtenus en radiosité.

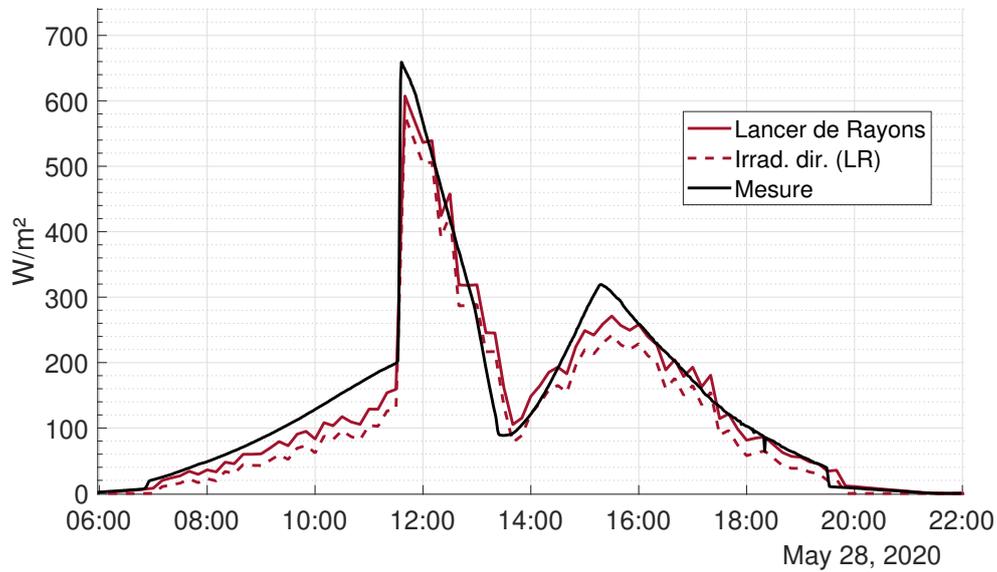


FIGURE 4.13 – Comparaison des irradiances simulées en lancer de rayons et mesurées sur le capteur E1 dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

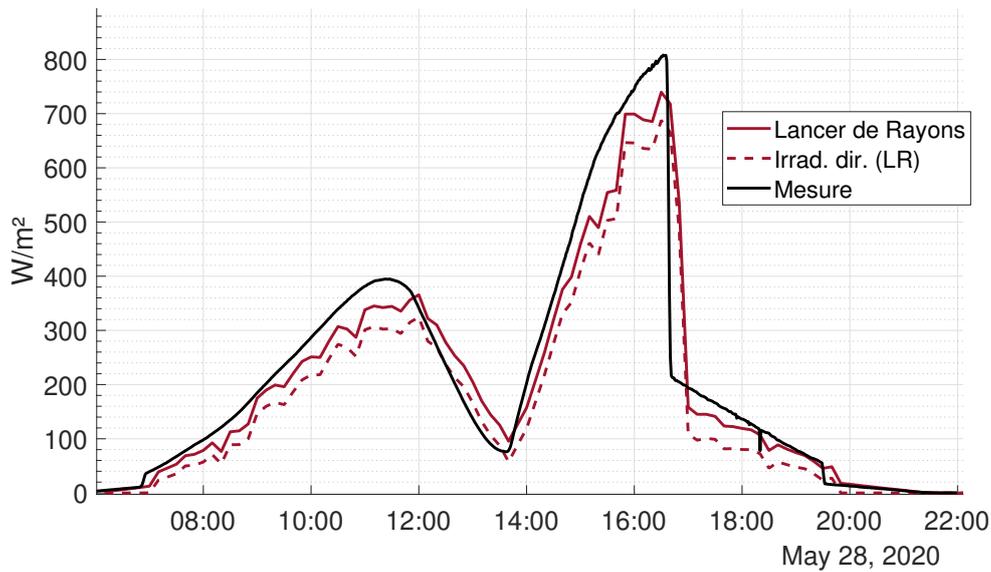


FIGURE 4.14 – Comparaison des irradiances simulées en lancer de rayons et mesurées sur le capteur W3 dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

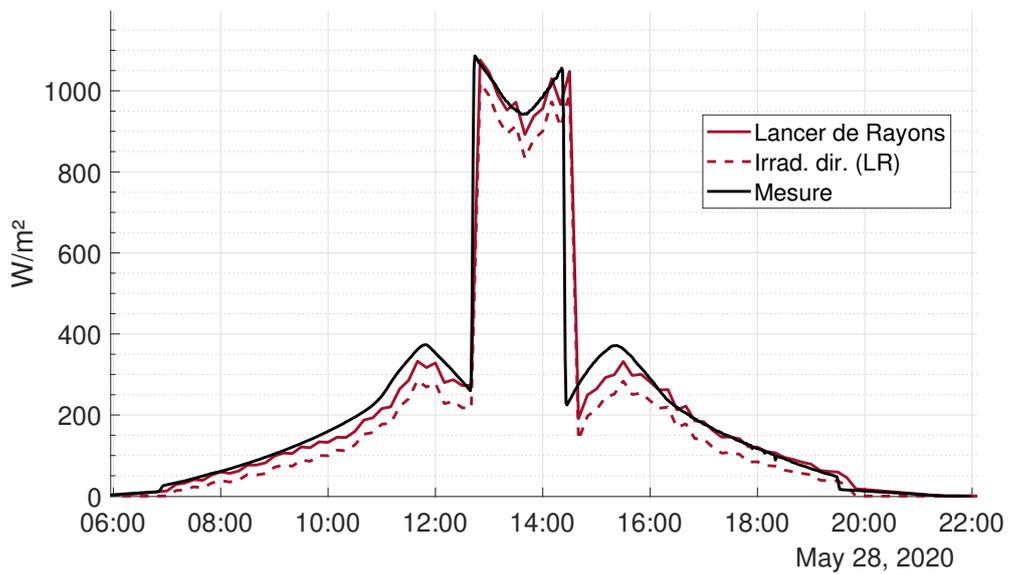


FIGURE 4.15 – Comparaison des irradiances simulées en lancer de rayons et mesurées sur le capteur SC dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

**Apports des réflexions lambertiennes (Lancer de rayons).** Dans cette partie, on évalue les apports des réflexions spéculaires en effectuant une simulation en lancer de rayons sous hypothèse lambertienne. Les coefficients de réflexion utilisés correspondent donc à ceux associés à la composante lambertienne des modes de réflexion évalués au chapitre 3, rappelés dans le tableau 4.2. De nouveau, on observe les irradiances respectivement obtenues sur les capteurs *E1*, *W3* et *SW* que l'on compare avec les mesures réalisées en ces mêmes points (figures 4.16, 4.17, 4.18). Le rayonnement diffus est également ajouté aux irradiances issues des réflexions lambertiennes ("apport lamb. et diffus"). On observe ainsi que les apports lambertiens seuls permettent déjà d'obtenir une bonne approximation des ensoleillements, malgré un coefficient de réflexion trop faible (0.85 au lieu de 0.89). Cette sous-estimation des apports issus des réflexions se traduit par des valeurs simulées légèrement plus faibles que la mesure, et légèrement plus faible que dans les simulations par radiosité. La perte est d'environ  $50\text{W}/\text{m}^2$ .

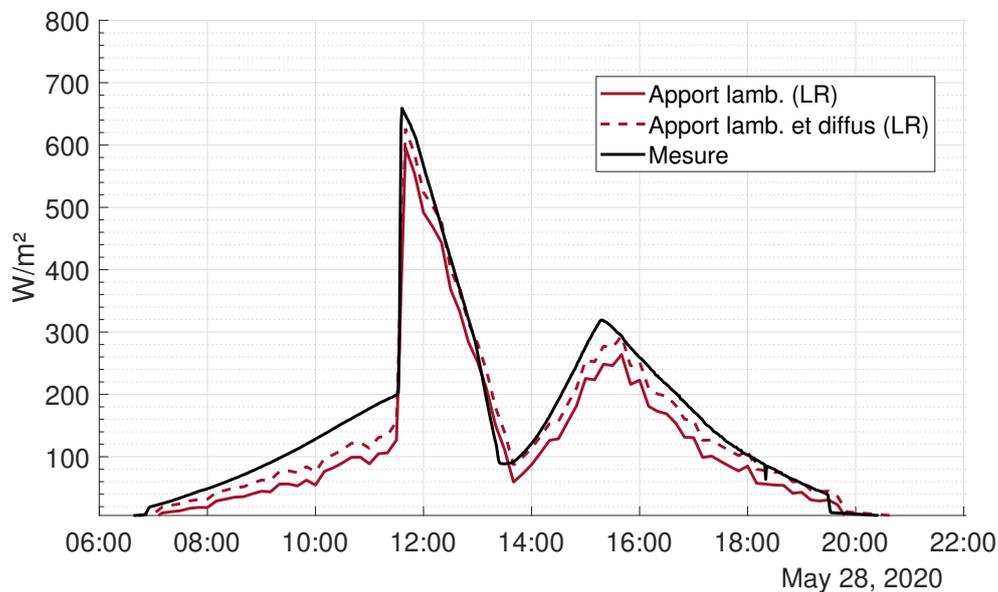


FIGURE 4.16 – Comparaison des irradiances simulées et mesurées sur le capteur *E1* dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

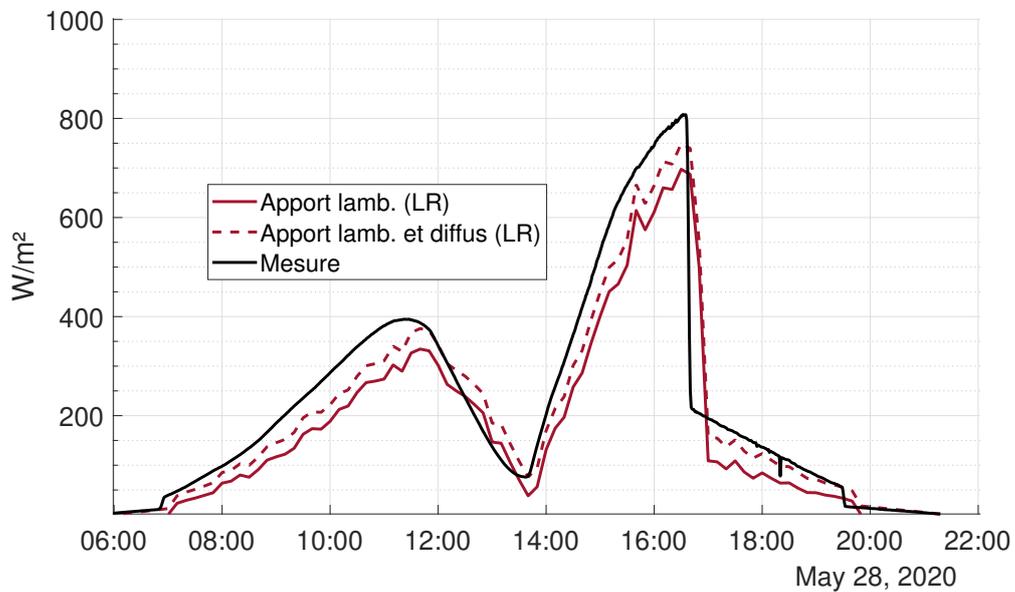


FIGURE 4.17 – Comparaison des irradiances simulées et mesurées sur le capteur W3 dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

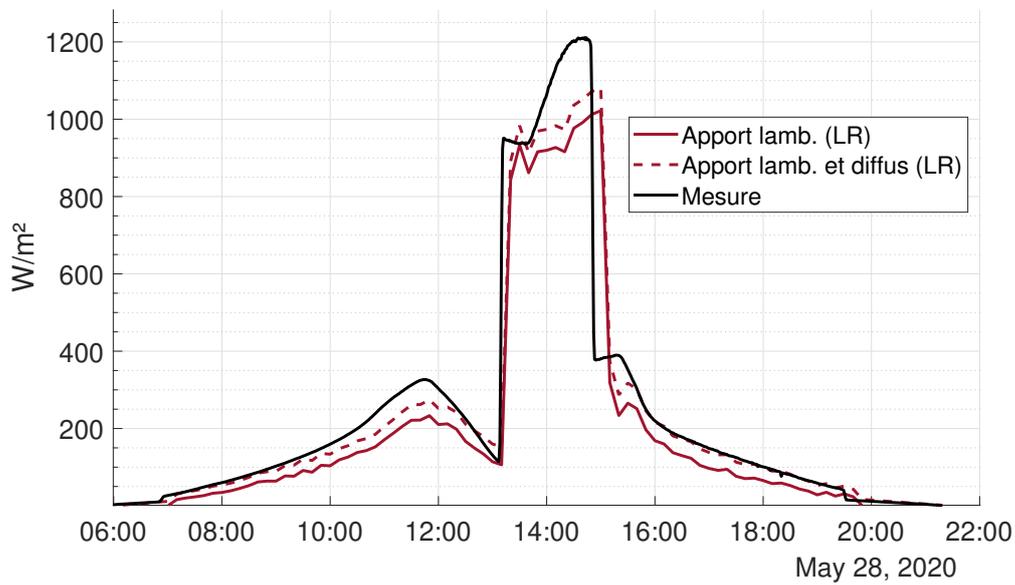


FIGURE 4.18 – Comparaison des irradiances simulées et mesurées sur le capteur SW dans le cas de la configuration 7. Les heures sont renseignées en heures locales.

**Apports des réflexions spéculaires (Lancer de rayons).** Pour évaluer l'impact des réflexions spéculaires, on s'intéresse à la configuration n°7 dans le cas où les réflexions sur chaque paroi du canyon sont uniquement spéculaires. Les coefficients de réflexion sur les parois composant la scène sont alors décrits dans le tableau 4.3.

Surface	Coef. de réfl. lambertien	Coef. de réfl. spéculaire
Sol	0.1	0
Murs (Bard. Blc.)	0	0.04
Toits	0.7	0

TABLE 4.3 – Coefficients de réflexion utilisés dans le cas de la simulation de la configuration n°7.

On observe figure 4.19 les valeurs d'irradiance simulées après réflexions dans le cas d'une source assimilée à l'ensoleillement direct uniquement. On observe alors une différence notable avec les figures 4.11, 4.10 et 4.12 qui est l'absence de pic de réflexion à 11h30 et 15h30. En observant finement les phénomènes de réflexion, on remarque de faibles pics d'irradiance, relativement ponctuels, compris entre  $20 \text{ W/m}^2$  et  $30 \text{ W/m}^2$ , visibles figure 4.20. L'ordre de grandeur de ces valeurs est cohérent au regard des irradiances direct normale ( $B_n$  (mesuré)) et direct horizontale ( $B_h$  (simulé)) présentées figure 4.19, et du coefficient de réflexion spéculaire de 0.04 sur chaque façade. On observe également que la synchronisation des pics d'irradiance est cohérente avec la position des capteurs, et n'est donc pas issue d'un bruit du modèle issu des réflexions du sol. En effet, les capteurs situés en haut de la façade captent les réflexions lorsque le soleil approche de l'horizon et donc lorsque les rayons directs arrivent avec une incidence rasante par rapport à une surface horizontale. A l'inverse, lorsque le soleil est proche de sa position zénithal et que les rayons arrivent avec une irradiance presque normale par rapport à une surface horizontale, se sont les capteurs situés au sol et en bas de façade qui relèvent des pics d'irradiance.

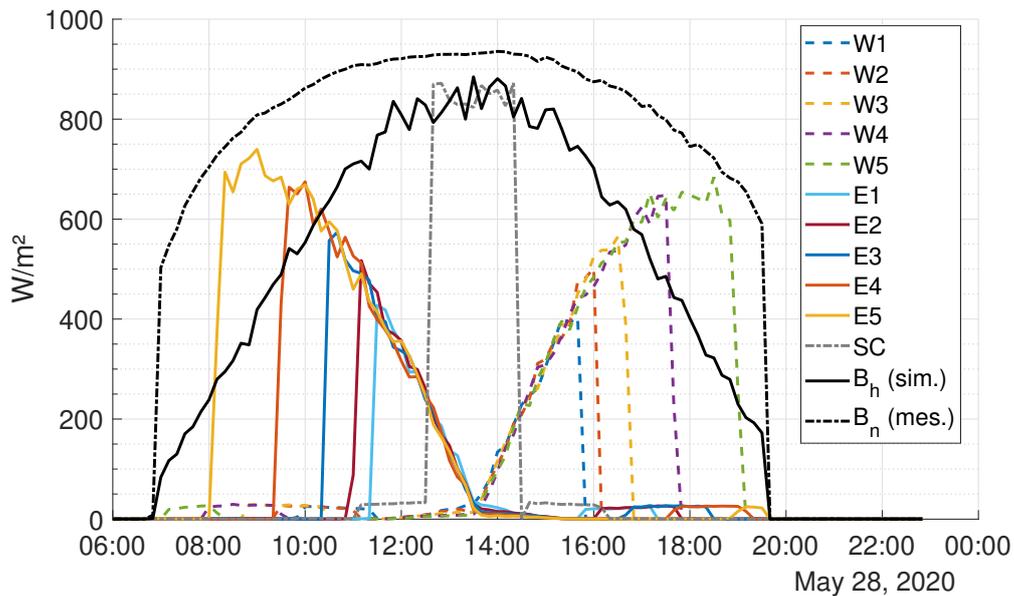


FIGURE 4.19 – Visualisation des irradiances simulées dans le cas de la configuration 7 avec des réflexions uniquement spéculaires sur chaque paroi. Les heures sont renseignées en heures locales.

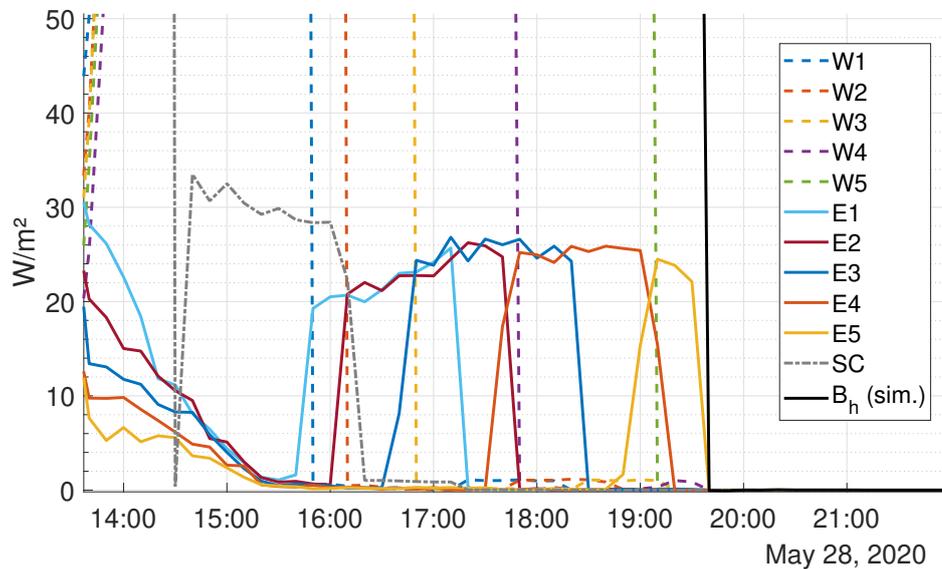


FIGURE 4.20 – Agrandissement sur les phénomènes de réflexion entre 14h00 et 20h00 des irradiances simulées dans le cas de la configuration 7, avec des réflexions uniquement spéculaires sur chaque paroi. Les heures sont renseignées en heures locales.

Les résultats présentés ici expliquent donc la diminution des apports énergétiques issus des réflexions dans le cas des simulations réalisées en lancer de rayons en configuration n°7.

Cette analyse montre par ailleurs le peu d'intérêt de s'intéresser aux composantes spéculaires des réflexions dans le cas de matériaux similaires au bardage blanc étudié ici. Il serait tout de même intéressant de s'intéresser aux effets spéculaires sur des vitrages, mais ces effets sont plus complexes à prendre en compte. En effet, les mesures détaillées en annexe B (section B.3)) montrent que les phénomènes spéculaires sont plus importants lorsque les angles d'incidence augmentent, mais que les verres semblent rester relativement transparents dans le cas d'irradiances normales (comme le montre le spectre de référence mesuré en irradiance à  $8^\circ$  figure B.6, annexe B).

#### 4.4 Conclusion sur les comparaisons.

Les comparaisons présentées dans ce chapitre 4 ne permettent pas de mettre en évidence une précision accrue pour les méthodes par lancer de rayons dans le cas de simulations d'ensoleillements sur des journées complètes. Toutefois, le modèle par radiosité, tel que construit dans ces travaux, montre des limites concernant la modélisation des ombrages. Un affinement du maillage de la voûte céleste semblerait alors pertinent. Contrairement au modèle par radiosité, le modèle par lancer de rayons permet de gagner en précision sur les ombrages. Toutefois, cette précision reste limitée par la précision liée au maillage de la scène urbaine. Une étude comparative sur le même maillage permettrait d'affiner l'analyse sur l'impact de l'approximation de la position du soleil en radiosité. Une répétition de ces simulations sur différents maillages de différentes finesses permettrait également d'évaluer l'impact de la finesse du maillage sur l'approximation des ombrages.

Toutefois, cette confrontation des modèles aux mesures réalisées au sein de la maquette, permet de valider les modèles avec des résultats satisfaisants. En effet, les variables pouvant être sources d'erreurs sont nombreuses. Parmi les sources d'erreurs pouvant être générées par le modèle on peut citer l'approximation de la position du soleil et l'approximation du rayonnement diffus, qui s'appuie notamment sur une construction de modèles empiriques (chapitre 2). Les mesures réalisées dans la maquette présentent également des incertitudes. Hormis les incertitudes liées à la chaîne d'acquisition (chapitre 3), d'autres sources d'incertitudes existent. En particulier lors de l'installation des capteurs, il est difficile de garantir une coplanarité des capteurs avec la façade dans le temps. Par ailleurs, les mesures alimentant les paramètres d'entrées des modèles (coefficients de réflexion notamment) sont également des sources d'erreurs potentielles. Il en ressort également que les modèles permettent alors de mettre en évidence les proportions d'irradiances issues des composantes diffuse et lambertienne.

Concernant l'aspect informatique des modèles, le principal avantage de la radiosité, toujours par rapport aux méthodologies déployées dans ces travaux, reste le temps de

calcul. Cela permet de produire un plus grand nombre de simulation et de faire varier les paramètres avec plus d'aisance. De plus, le rayonnement diffus peut être considéré par la même méthode, ce qui n'est pas le cas du lancer de rayons et qui contraint finalement à mixer les deux méthodes.

Finalement, il semblerait que les deux méthodes puissent être complémentaires. La radiosité peut permettre d'obtenir des résultats rapides et relativement précis des ensoleillements, mais cette méthode montre des limites lorsqu'il s'agit de simuler l'ensoleillement avec une grande précision.

# Conclusion générale.

Cette thèse avait pour objectif initial de revoir les méthodes de simulation d'ensoleillement en milieu urbain, puis de les confronter à des mesures réalisées sur une maquette de rue canyon installée en milieu extérieur. Ces travaux se sont déroulés en quatre temps. Dans un premier temps, l'état de l'art a permis de cerner les méthodes de simulation d'ensoleillement en milieu urbain déjà existantes, à savoir la radiosité et le lancer de rayons. Les méthodes déjà existantes ont notamment été ciblées au travers des logiciels disponibles permettant de calculer des ensoleillements en milieu urbain. Toutefois, la variété des méthodes et des constructions nous a amené à nous interroger sur la pertinence de chaque méthode. Pour comparer ces méthodes, la maîtrise de la chaîne de calcul et des hypothèses initiales est nécessaire. Cela nous a amené à développer chacune de ces méthodes.

La construction de chaque modèle est alors détaillée dans une seconde partie. Dans cette même partie, les résultats obtenus sur une scène d'étude, de type rue canyon, sont confrontés. La correspondance des résultats a permis de valider l'ensemble des briques de calcul de chacun des modèles, dont certaines étaient déjà validées auparavant dans le chapitre. Elle a également permis de dresser la liste des avantages et les points faibles de chacune des méthodes telles qu'elles ont été implémentées dans ces travaux.

La troisième partie se concentre sur les travaux de mesure. Ces mesures se divisent en deux axes de recherche différents. Dans un premier temps, l'étude se focalise sur les mesures réalisées en laboratoire, et la reconstruction de distribution d'énergie après réflexion sur des matériaux typiques du paysage urbain. Ces travaux ont permis de proposer une stratégie pour reconstruire un spectre de réflexion à partir de mesures angulaires. L'intérêt de cette reconstruction du spectre est qu'elle permet de décomposer le spectre de réflexion en un spectre de réflexion associé aux réflexions spéculaires et en un spectre de réflexion associé aux réflexions lambertiennes. Il est alors possible d'affiner les modèles de réflexion proposés en lancer de rayon (chapitre 4). Les travaux expérimentaux se sont également concentrés sur la mesure d'irradiances au sein d'une maquette de rue canyon. Les matériaux qualifiés en laboratoire ont été installés dans cette maquette, et neuf variantes de scénarios ont été testées. Ces mesures permettent de confronter chaque modèle aux relevés d'irradiances réalisés en différents points et altitudes de la rue canyon. Enfin, les travaux aboutissent sur la comparaison des mesures aux modèles. Ces comparaisons permettent de mettre en avant certains avantages de chaque modèle. Finalement ces mé-

thodes paraissent être complémentaires, chacune présentant des avantages en fonction de la précision d'étude souhaitée et des objectifs recherchés. Les résultats présentés au chapitre 4 montrent que les deux méthodes sont pertinentes pour simuler des ensoleillements en milieu urbain.

Parmi les avantages associés à chaque méthode, on peut noter que la méthode par radiosité présente l'avantage non négligeable d'être plus simple, pour des résultats pratiquement aussi précis que la méthode par lancer de rayons. Les principales différences relevées résident finalement dans le calcul des ombrages, avec une initialisation des ensoleillements par la méthode des radiosité qui s'avère approximative. Ce défaut des modèles par radiosité peut notamment être corrigé avec une initialisation différente. Comme évoqué précédemment, deux stratégies semblent ici pertinentes. La première en raffinant le maillage de la voûte céleste pour approximer de manière plus juste la position du soleil ; la seconde en utilisant une méthode de lancer de rayons en "backward", méthode compatible avec des temps de calcul raisonnables. Comme les résultats l'ont montré, les méthodes par lancer de rayons s'avèrent plus efficaces pour simuler les ombrages, bien qu'elles restent sensibles à la définition du maillage de scène utilisé. Par ailleurs, elles présentent l'intérêt de pouvoir modéliser des réflexions de différentes natures. Toutefois, l'étude de bardages n'a pas montré de composantes spéculaires notables pour ces matériaux. L'intérêt de simuler des propriétés de réflexions autres que celles lambertiennes peut alors se poser. La pertinence des méthodes par radiosité étant prouvée dans ces travaux, cette stratégie de simulation semble alors pertinente pour réaliser des études spectrales, tel que présenté dans les perspectives du chapitre 2 (section 2.7.1).

Les outils et méthodes développés au cours de ces trois années de thèse permettent d'envisager plusieurs perspectives techniques.

Dans un premier temps, la description des modèles de radiosité et de lancer de rayons permet de proposer des stratégies évaluant les apports énergétiques issus des réflexions. Les prototypes de code, tels que détaillés dans le chapitre 2, proposent deux stratégies complètes permettant de simuler les ensoleillements sur n'importe quelle scène urbaine. Ce chapitre peut donc servir de base solide pour quelqu'un qui souhaiterait re-développer son propre modèle d'ensoleillement. Il serait alors intéressant de produire un code plus performant, avec un soutien informatique, pour s'affranchir des contraintes de temps de calcul. Cela permettrait d'envisager des études plus approfondies, notamment sur des périodes de temps plus conséquentes. L'impact des modèles pourrait alors être testé sur des simulations annuelles, pour quantifier les écarts énergétiques générés par les modèles sur de telles périodes.

Par ailleurs, nous avons vu que certaines briques des modèles peuvent être source d'erreurs. Le calcul précis des ombrages semble notamment être une source d'erreur non négligeable car ce calcul reste associé au maillage. Une amélioration de ces briques de code pourrait être pertinente pour pousser le développement des modèles.

Il aurait par ailleurs été pertinent de comparer les modèles développés aux modèles

déjà existants, notamment *Solene* pour la radiosité, et *Grasshopper* associé au plug-in *Honeybee* pour le lancer de rayons. La comparaison des modèles développés serait à associer à une analyse des hypothèses de construction des modèles effectués dans les logiciels existants. Il s'agirait alors d'essayer d'identifier des hypothèses pouvant générer des approximations dans le calcul des ensoleillements et ainsi fournir des recommandations de bonne conduite ou de précaution lors de l'utilisation de ces logiciels.

S'affranchir des problématiques de temps de calcul permettrait également de s'intéresser de manière plus aboutie aux problématiques spectrales en milieu urbain. Comme souligné dans cette étude, la prise en compte des effets spectraux pourrait être importante à l'avenir pour une meilleure intégration esthétique des modules photovoltaïques, mais aussi une meilleure performance en adaptant les technologies à cet environnement. Les modèles, tels que construits ici, proposent des stratégies permettant de considérer ces problématiques spectrales, en particulier les méthodes par radiosité (chapitre 2, section 2.7.1). Suivant les objectifs recherchés, ces modèles sont alors à enrichir avec des propriétés de matériaux typiques du paysage urbain. Le chapitre 3 suggèrent une stratégie permettant de dissocier les composantes spéculaires et lambertiennes des réflexions. Cette stratégie s'est montrée satisfaisante sur les matériaux testés durant cette étude, hormis pour le verre BK7<sup>®</sup>. Il serait alors intéressant de mener des campagnes de mesures de réflexions angulaires sur une grande variété de matériaux. Une telle campagne présenterait deux intérêts. Le premier serait de déterminer les propriétés optiques de réflexions typiques des environnements urbains, et de vérifier si certains matériaux couramment utilisés en urbanisme présentent des réflexions avec des proportions spéculaires non négligeables. Le second intérêt d'une campagne massive de qualification de propriétés optiques de matériaux serait de tester le modèle proposé au chapitre 2 sur un grand nombre de matériaux, et ainsi affiner le modèle. On peut également envisager que ce modèle soit transposable à d'autres applications, en éclairagisme notamment.

Enfin, ces modèles peuvent être adaptés pour simuler les échanges sur d'autres bandes spectrales, comme le proche infra-rouge ou l'infra-rouge. Ce fût notamment l'objet d'un stage encadré durant cette thèse.

Malgré l'ensemble de ces résultats, il faut toutefois garder en tête que l'environnement urbain reste difficile à simuler. Si la géométrie d'un bâtiment peut être modélisée avec précision, la géométrie d'un quartier est plus compliquée à considérer. En particulier parce que les masques et la compositions des surfaces peuvent évoluer au cours du temps. Cela peut notamment être le cas lors de nouvelles construction, mais tout simplement en fonction des saisons (végétation) et de l'activité humaine (stationnement de véhicules). La pertinence de simulations très fines est alors discutable.

# Perspectives générales.

Ces travaux détaillent la construction de deux modèles d'ensoleillement en milieu urbain, validés par comparaison à des mesures d'irradiances. Mais la question qui en ressort est alors la suivante : que faire de ces modèles ?

Il est évident que l'objectif de tels modèles est de développer des outils ayant pour objectif de modéliser le potentiel solaire en façade de bâtiment, en particulier en milieux urbains denses. Dans un second temps, ces modèles ont également pour but d'alimenter les entrées des modèles thermiques permettant la simulation du microclimat urbain.

Comme montré en introduction, le but est d'aujourd'hui d'augmenter la part des énergies renouvelables en France (chapitre 1, section 1.2.3). Cette augmentation de la part des énergies renouvelables se fait au moyen de l'installation de centrales de production à plus faibles impacts carbone (centrales solaires, centrales éoliennes, géothermie, centrales marémotrices...), mais aussi par une production locale d'énergie, notamment en valorisant les apports solaires sur les bâtiments. A différentes échelles, l'évaluation du potentiel solaire est alors nécessaire pour développer les stratégies et technologies qui permettent la conversion de l'irradiance incidente en énergie exploitable par le bâtiment. En particulier, l'utilisation des technologies BIPV (chapitre 1, section 1.3.2) doit à la fois être adaptée au besoin, mais également au potentiel solaire disponible. Les modèles développés dans cette thèse ont alors pour rôle de servir d'outils d'aide à la conception. Par exemple, le pilotage d'un composant du bâti peut être assuré par un système autonome et dissocié du réseau, et qui n'aura pas forcément besoin de la même quantité de productible qu'une installation de plus grande envergure. On pourra alors rechercher à valoriser le potentiel solaire sur des façades moins ensoleillées, telles que les façades est ou ouest, voire nord suivant les régions. De même, l'architecture de certains quartiers ou bâtiments peut générer des pièges radiatifs identifiés par ce type d'outil. A l'inverse, une installation raccordée au réseau potentiellement associée à une batterie ayant vocation à alimenter l'ensemble du bâtiment aura besoin d'un fort potentiel solaire. L'outil doit alors, par exemple, permettre de déterminer la surface nécessaire pour qu'une installation en façade sud puisse subvenir à ces besoins. En particulier si les toitures sont encombrées par les autres systèmes comme c'est souvent le cas en milieu urbain.

L'utilisation des modèles a également permis d'identifier certaines zones particu-

lières, comme les pieds des bâtiments, au sol comme en façade, qui peuvent potentiellement percevoir des irradiances plus importantes. L'analyse de ces phénomènes doit alors amener à une réflexion pour savoir si ces zones sont à valoriser ou non, et d'identifier les freins à l'exploitation des ensoleillements sur ces zones là. On peut en effet imaginer que des questions d'assurance liées aux risques pourraient apparaître si des modules photovoltaïques venaient à être installés sur des zones à portée des passants.

Les travaux réalisés dans cette thèse peuvent également servir d'outils pour travailler la minimisation des effets d'îlot de chaleur urbain détaillés tout au long du chapitre 1. Certaines études cherchent à minimiser ces effets en travaillant sur des matériaux à rétro-réflexion [43]. Les modèles peuvent être adaptés pour prendre ce type de réflexions et évaluer l'impact de l'installation de tels matériaux sur l'irradiance distribuée puis sur la température au sein des quartiers. Les modèles permettant de déterminer les parts de réflexion lambertienne et spéculaire développés au chapitre 3 peuvent également aider à déterminer les matériaux idéaux dans la conception de quartiers naturellement mieux régulés thermiquement, notamment en limitant les effets d'absorption des façades.

Les perspectives spectrales, détaillées à la fin du chapitre 2, ouvrent la voie à l'adaptation des technologies photovoltaïques en milieu urbain. On peut en effet imaginer à l'avenir des modules adaptés à l'environnement urbain dans lequel ils sont installés, en fonction des matériaux composant la scène urbaine mais aussi de l'apparence visuelle souhaitée des bâtiments.

Globalement, l'ensemble des perspectives de ces travaux s'inscrit dans une démarche de valorisation de la production locale d'énergie et d'automatisation des bâtiments. Les stratégies de pilotage de gestion des énergies se font à différentes échelles : réseau national pour de grandes installations, à l'échelle de la ville ou du quartier. Elles peuvent aussi se faire à l'échelle du bâtiment, résidentiel ou tertiaire, collectif ou individuel. On parlera alors plutôt de domotique. Ces stratégies de pilotage sont à développer en parallèle du déploiement des énergies solaires en milieu urbain.

# Annexe A

## Complément sur l'instrumentation de la maquette.

### Sommaire

---

<b>A.1</b>	<b>Choix des capteurs. . . . .</b>	<b>201</b>
<b>A.2</b>	<b>Chaîne d'acquisition. . . . .</b>	<b>201</b>
<b>A.3</b>	<b>Test sous banc d'ensoleillement (BES). . . . .</b>	<b>202</b>
<b>A.4</b>	<b>Résultats des campagnes d'acquisition. . . . .</b>	<b>206</b>
A.4.1	Configuration $H/W = 1$ . . . . .	206
A.4.1.1	Configuration n°1 : Crépis blanc sur les 2 façades. . .	206
A.4.1.2	Configuration n°2 : occultation de la façade est. . . .	208
A.4.1.3	Configuration n°3 : Crépis rouge sur les 2 façades. . .	209
A.4.1.4	Configuration n°4 : Bardage blanc sur les 2 façades. .	210
A.4.1.5	Configuration n°5 : Évaluation de l'impact de réflexions spéculaires. . . . .	211
A.4.2	Configuration $H/W = 2$ . . . . .	212
A.4.2.1	Configuration n°6 : réflexions diffuses sur crépis. . . .	213
A.4.2.2	Configuration n°7 : réflexions sur bardage blanc. . . .	213
A.4.2.3	Configuration n°8 : réflexions sur bardage blanc (façade orientée est) et noir (façade orientée ouest). . . .	214
A.4.2.4	Configuration n°9 : réflexions sur bardage noir sur chaque façade (façade orientée est et façade orientée ouest). . . . .	215

---

Cette annexe a pour objectif de compléter les informations présentées chapitre 3 sur les mesures réalisées sur la maquette urbaine.

## A.1 Choix des capteurs.

Plusieurs capteurs, autre que le capteur LICOR-200R, présentent des caractéristiques intéressantes pour réaliser des mesures d'irradiance dans le canyon, et auraient pu également être utilisés. Parmi eux, on retrouve le capteur LICOR-190R, déjà utilisé dans la thèse de Patriarche [10]. Ce capteur est en tout point similaire au LICOR-200R, à la différence que la mesure est effectuée sur la bande 400-700nm. Si cette bande ne correspond seulement qu'à une fraction de la bande utilisée par les technologies photovoltaïques, l'observation des réponses relatives des deux capteurs permet de remarquer que ce capteur est moins sensible au spectre incident reçu.

Malgré une dépendance à la longueur d'onde plus marquée, il a été choisi de privilégier le capteur LICOR-200R travaillant sur la même bande spectrale que les technologies photo-voltaïques. Après analyse des résultats et de la correction des mesures, ce choix reste discutable.

## A.2 Chaîne d'acquisition.

Les capteurs LI-200R utilisés génèrent un signal en  $\mu\text{A}$ , avec une sensibilité de  $75 \mu\text{A}/1000\text{Wm}^{-2}$ . Le signal a toutefois besoin d'être amplifié au delà de 2 m de câble. Afin de limiter les masques proches, la centrale d'acquisition, nécessitant l'utilisation d'un raccord et d'un coffret électrique, a été placée à environ 10 m de la maquette côté au nord (de sorte à ne pas générer des effets de masques). Les signaux issus des capteurs ont donc du être amplifiés, notamment par l'utilisation des amplificateurs *2420 Light Sensor Amplifier*. Ces amplificateurs convertissent alors le signal en volt. Afin d'évaluer l'irradiance mesurée, le facteur de multiplication  $M_V$  ( $[\text{Wm}^{-2}\text{V}^{-1}]$ ) propre à chaque association capteur-amplificateur doit être calculé. Soit  $G$  le gain de l'amplificateur ( $[\text{V}\mu\text{A}^{-1}]$ ), et  $C$  le coefficient de calibration du capteur ( $[\mu\text{A}/100\text{Wm}^{-2}]$ ), le facteur de multiplication  $M_V$  est alors donné par la relation suivante (Equation A.1) :

$$M = \frac{1}{GC} \quad (\text{A.1})$$

Or, si l'on considère  $i$  ( $[\mu\text{A}]$ ) le signal généré par le capteur et reçu par l'amplificateur, le signal  $V_{out}$  ( $[\text{V}]$ ) amplifié est basé sur l'équation suivante (Equation A.2) :

$$V_{out} = Gi \quad (\text{A.2})$$

Il est donc nécessaire de régler correctement le gain de chaque amplificateur et de calculer à partir de ce dernier, et de chaque facteur de calibration, l'ensemble des

facteurs de multiplication  $M_V$  propres à chaque association capteur-amplificateur. Une fois l'association d'un capteur et d'un amplificateur réalisée, celle-ci n'est plus modifiée. Le réglage du gain se fait grâce aux interrupteurs signalés en rouge (1) sur l'image A.1 et la table associée aux amplificateurs. Dans cette étude, le gain a été calibré à 0.075, afin de garantir une amplification importante compatible avec les indications constructeur de la centrale d'acquisition.

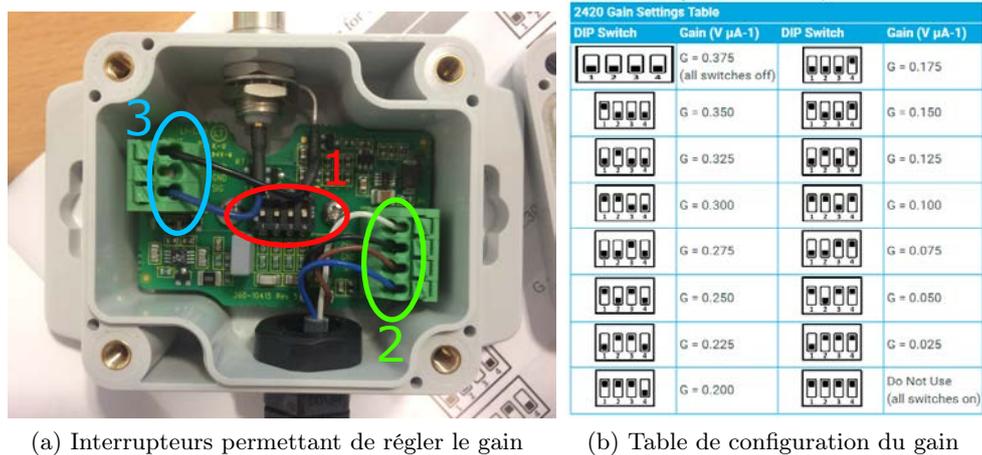


FIGURE A.1 – Réglage du gain sur les amplificateurs LICOR 2420 Light Sensor Amplifier [176]. En rouge (1) : interrupteur permettant le réglage du gain de l'amplificateur. En vert (2) : signe de sortie de l'amplificateur. En bleu (3) : signe d'entrée de l'amplificateur.

La centrale d'acquisition choisie est une *midi LOGGER GL840* de la marque *Graphtech*. Elle est installée dans un tableau électrique ventilé et chauffé afin de limiter les températures excessives. Le signal entrant de 220 V. Il sert à alimenter la centrale d'acquisition.

### A.3 Test sous banc d'ensoleillement (BES).

Le banc d'ensoleillement est équipé de huit lampes aux halogénures métalliques (*Metal Halide (MHG)*). Le spectre généré par ces lampes, en association avec un filtre situé au niveau du verre des lampes, permet de reconstituer le spectre solaire en respectant les normes standards EN12975 :2006 et ISO89806-1 :1994 (Figure A.2). Chaque lampe peut se déplacer indépendamment des autres de sorte à homogénéiser l'irradiance sous le banc d'ensoleillement à la distance souhaitée. Ce banc d'essai est également équipé d'un ciel artificiel permettant de simuler une température de voûte céleste et limiter les apports thermiques issus des lampes. A pleine puissance et sans utilisation du ciel artificiel, le banc permet de monter à une puissance de 1200 W/m<sup>2</sup>. En présence du ciel artificiel, cette puissance maximale chute à 1100 W/m<sup>2</sup>.

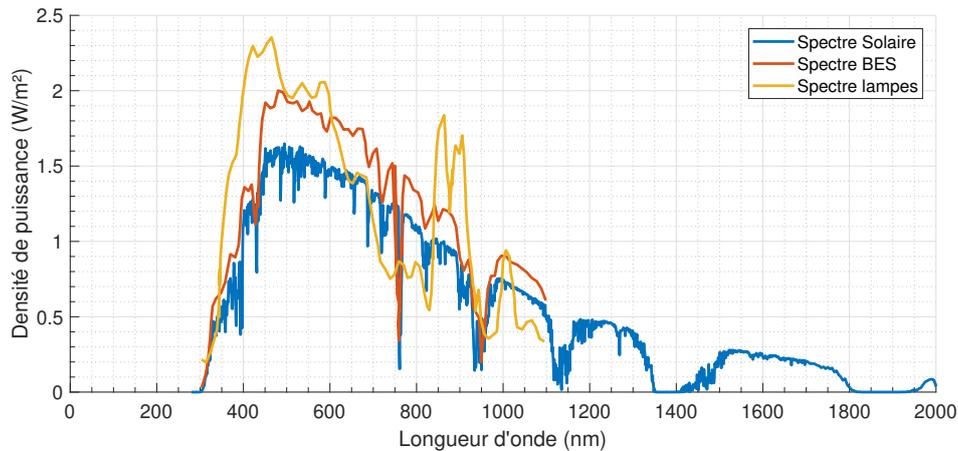


FIGURE A.2 – Comparaison des spectres AM1.5 de référence, du spectre AM1.5 fournit dans la documentation technique du banc d’ensoleillement, et du spectre généré par les lampes du banc d’ensoleillement.

Le spectre A.M1.5 de référence présenté dans la documentation technique du banc d’ensoleillement (Figure A.2) montre des valeurs plus élevées que le spectre de AM1.5 de référence utilisé auparavant (chapitre 2, section 2.3). On choisit alors d’étalonner le capteur LICOR à partir du spectre AM1.5 de référence utilisé jusqu’à présent. L’erreur générée par le spectre des lampes reste évaluée en comparaison au résultat obtenu avec le spectre AM1.5 donné par la documentation technique du banc d’ensoleillement. L’analyse de l’erreur générée par un capteur LICOR avec le spectre des lampes du simulateur solaire donne ici une surévaluation de l’ordre de grandeur de 9%. Toutefois, cette première analyse reste superficielle et semble peu fiable.

Les capteurs sont placés sous le banc d’ensoleillement. Deux mesures de références sont effectuées avec des appareils de référence : une première avec un pyranomètre, puis une seconde avec une cellule photovoltaïque. Il n’est pas possible de sélectionner directement l’irradiance fournie par le banc d’ensoleillement : ce pilotage s’effectue en modulant la puissance maximale des lampes. La mesure réalisée par le pyranomètre de référence est alors nécessaire pour connaître l’irradiance délivrée par le banc. L’utilisation de la cellule photovoltaïque de référence ne permet ici que de fournir une information sur l’homogénéité de l’irradiance sur la zone étudiée, ce qui permet d’évaluer l’hétérogénéité des irradiances au niveau du plan de mesure. Cette hétérogénéité est étudiée à la fois grâce à la cellule de référence et grâce au pyranomètre de référence. Ces deux capteurs ne peuvent se déplacer que par pas de 15cm. La carte d’irradiances dans le plan de mesure est alors obtenue par interpolation sur l’ensemble des mesures.

La figure A.3 permet de comparer les irradiances mesurées par les différents appareils de référence avec celles mesurées par les capteurs LICOR. Les incertitudes de mesure propres au pyranomètre de référence sont prises en compte. De même, les incertitudes associées à la chaîne d’acquisition des capteurs LICOR sont considérées. On remarque

alors que les incertitudes des mesures effectuées ne se recoupent pas. Le biais entre les mesures réalisées par le pyranomètre de référence et celles réalisées par les pyranomètres LICOR est constant, évalué à  $76 \text{ W/m}^2$ . Cela qui représente une erreur positive d'environ 7%. Cette observation pourrait simplement s'expliquer par une surestimation de l'erreur théorique du capteur LICOR sous le banc d'ensoleillement. Notons également que les variations spatiales mesurées par la cellule de référence semblent correspondre à celles relevées par le pyranomètre de référence, mais également par les pyranomètres LICOR.

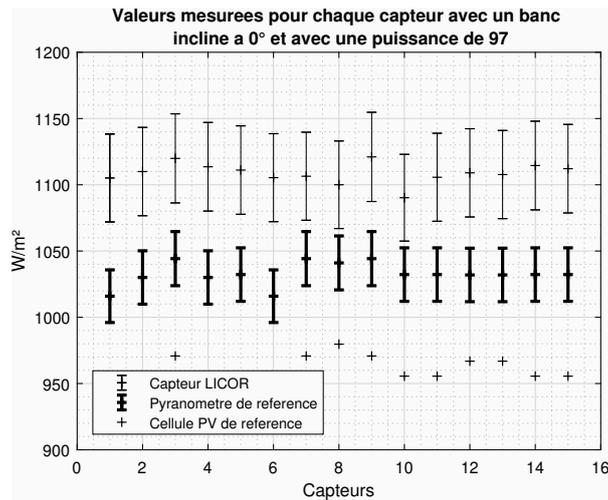
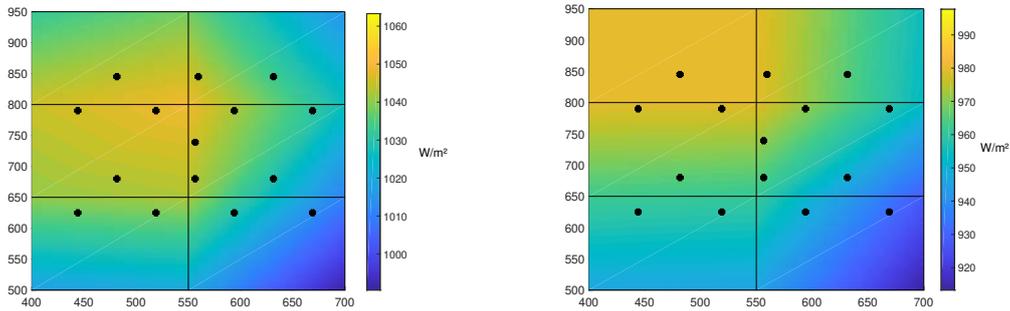


FIGURE A.3 – Irradiances [ $\text{W/m}^2$ ] mesurées avec le pyranomètre de référence, la cellule photovoltaïque de référence et les différents pyranomètres LICOR dans le cas d'une irradiance normale à 97% de la puissance maximale du banc d'ensoleillement.

La cartographie des irradiances (Figure A.4) révèle une disparité différente en fonction de l'appareil de mesure. Le biais de  $50 \text{ W/m}^2$  est retrouvé. On note toutefois certaines similitudes sur ces deux cartes : une irradiance plus faible dans la zone ( $x = 700, y = 500$ ), et une irradiance plus importante dans le quart supérieur gauche.



(a) Pyranomètre de référence

(b) Cellule solaire de référence

FIGURE A.4 – Cartographie des irradiances réalisée à partir des mesures du spectromètre et de la cellule de référence. Chaque pyranomètre LICOR testé est représenté par un point noir.

Dans une configuration à 78% de la puissance maximale du banc, et un banc incliné à  $30^\circ$  par rapport à sa position horizontale, la correspondance entre les mesures effectuées à l'aide du pyranomètre de référence et celles réalisées grâce aux pyranomètres LICOR est respectée, les intervalles de confiance se recoupant pour de nombreux capteurs. Les écarts d'irradiances mesurés sont attribués aux erreurs issues de mesures spatiales, le mode de déplacement du pyranomètre de référence ne permettant que d'obtenir une mesure en un point approché de l'emplacement des pyranomètres LICOR. Dans une configuration encore plus extrême, avec un banc à 62% de sa puissance maximale et incliné à  $45^\circ$ , l'ordre de grandeur des irradiances mesurées est respecté mais les incertitudes de mesures ne se recoupent plus. On s'aperçoit que les pyranomètres LICOR sous-évaluent l'irradiance par rapport au pyranomètre de référence. Les variations spatiales d'irradiance par rapport à celles évaluées par la cellule de référence sont également moins évidentes.

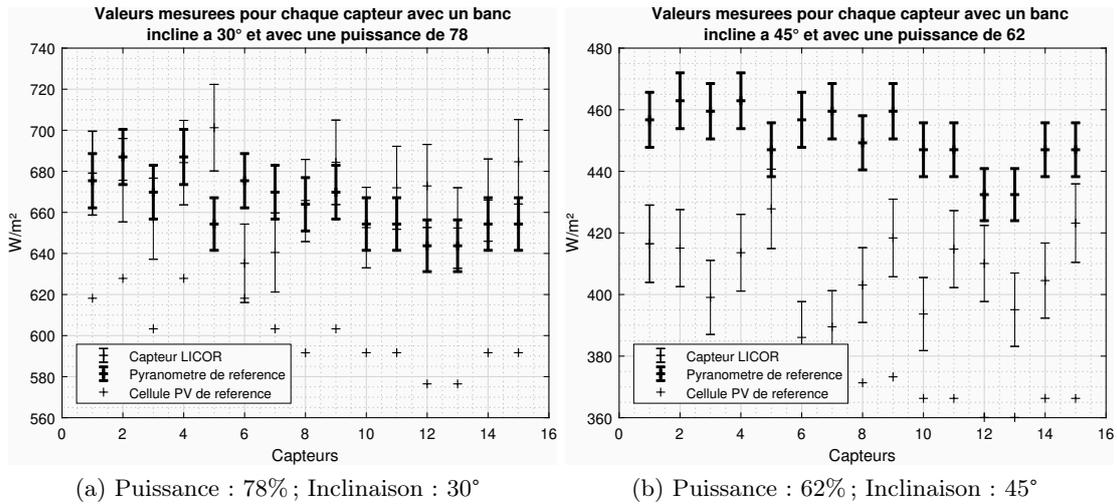


FIGURE A.5 – Comparaison des mesures réalisées au pyranomètre de référence, à la cellule photovoltaïque de référence et aux pyranomètres LICOR testés.

La validation des capteurs sous le banc d'ensoleillement ne peut alors pas aboutir malgré une tendance respectée sur les ordres de grandeur. On suppose ici que les variations spectrales générées par les spectres des lampes sont trop importantes, et la sensibilité des capteurs LICOR à ce spectre trop élevée, pour permettre une validation des capteurs grâce au banc d'ensoleillement. Finalement, les mesures extérieures et la comparaison au spectromètre de la station météorologique de la plateforme INCAS (chapitre 3) permettront de valider la chaîne d'acquisition des capteurs LICOR.

## A.4 Résultats des campagnes d'acquisition.

Cette section a pour objectif de compléter les mesures réalisées au sein de la maquette présentée dans le chapitre 3, section 3.4.

### A.4.1 Configuration $H/W = 1$ .

#### A.4.1.1 Configuration n°1 : Crépis blanc sur les 2 façades.

La première configuration testée correspond à celle d'un canyon de rapport d'aspect  $H/W = 1$ . Les deux façades sont en crépis blanc (Ech1701000) dont le coefficient de réflexion moyen a été mesuré à 0.83 (section 3.2.3). Cette première acquisition révèle une mesure du rayonnement global à partir de 8h00 seulement (Figure A.6). On identifie alors la présence d'un masque pour ce capteur en début de journée. Afin de visualiser le rayonnement incident global sur une surface horizontale dans le cas de la configuration n°1, la mesure réalisée par le pyranomètre de référence de la station météorologique INCAS est également tracée sur la figure A.6.

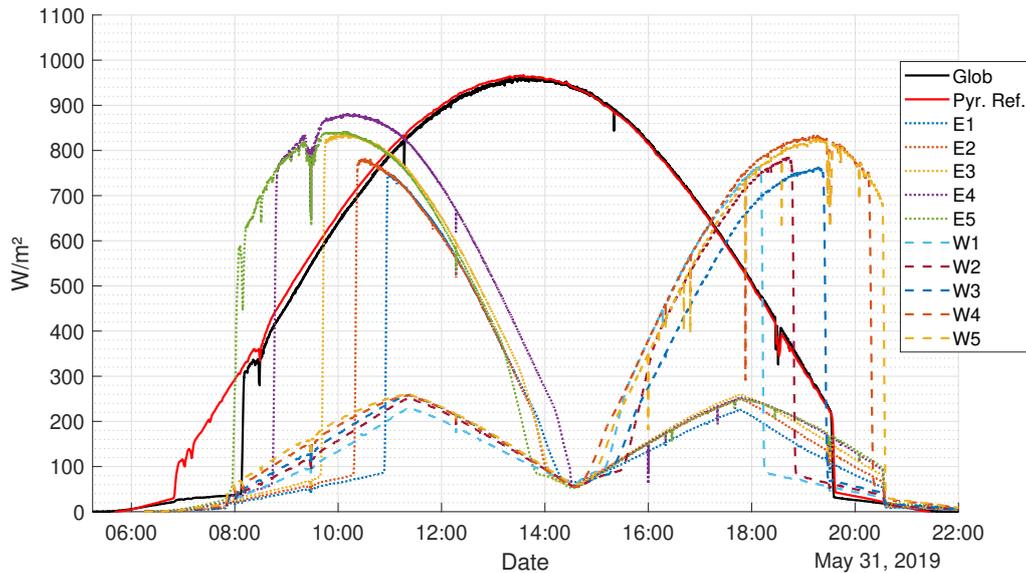


FIGURE A.6 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 31 Mai 2019. Les deux façades sont constituées de crépis blanc (référence Ech1701000).

On observe figure A.6 qu'il s'agit d'une journée largement ensoleillée, avec une mesure du rayonnement global qui révèle peu de perturbations nuageuses. Les profils observés sont relativement symétriques, et sont représentatifs de la répartition des capteurs au sein de la maquette. Les capteurs placés sur la façade ouest (et orientés vers l'est) mesurent rapidement (à 7h57 pour le capteur  $E5$ ) une forte irradiance ( $+550\text{W}/\text{m}^2$ ) associée au rayonnement direct. L'heure à laquelle le rayonnement direct atteint chacun des capteurs installés sur la façade est se distingue clairement par une forte augmentation de l'irradiance (respectivement 7h57, 8h44, 9h39, 10h18 et 10h54 pour les capteurs  $E5$ ,  $E4$ ,  $E3$ ,  $E2$  et  $E1$ ). De même pour la façade ouest, on distingue clairement l'heure à laquelle les capteurs arrêtent d'être exposés au rayonnement direct. L'impact des réflexions et du rayonnement diffus apparaît également sur les capteurs masqués du rayonnement direct, sans distinction notable quant à la hauteur de l'emplacement des capteurs (les capteurs  $E1$  et  $W1$  présentent tout de même des irradiances légèrement plus faibles).

Il est à ce stade difficile de dissocier la part d'irradiance issue de la composante diffuse de celle issue des réflexions. Différentes analyses peuvent toutefois être effectuées. Dans un premier temps, on note que l'apport des réflexions n'est pas négligeable. En effet, l'irradiance mesurée connaît un minimum local au moment du zénith solaire pour l'ensemble des capteurs ( $66\text{W}/\text{m}^2$  à 13h36 pour le capteur  $E1$ ). Ce phénomène est en particulier observé pour les capteurs situés au sol au sein du canyon urbain (exemple figure A.7). De part leur exposition aux rayonnements direct et diffus, et en l'absence de réflexion, les capteurs situés au sol devraient au contraire révéler un maximum d'irradiance au moment du zénith solaire. Les mesures mettent alors en évidence un phénomène de

piégeage radiatif (par réflexions) au sein du canyon. Ce phénomène tend à augmenter l'irradiance sur les façades de manière significative durant les périodes du "matin" et de "l'après-midi".

Par ailleurs, des pics d'irradiances sont observés sur les capteurs non exposés au rayonnement direct, à savoir durant l'après-midi pour les capteurs orientés vers l'est (aux alentours de 11h30), et durant le matin pour les capteurs orientés vers l'ouest (aux alentours de 17h50). Ces pics coïncident pour l'ensemble des capteurs situés sur une même façade. A la même heure, l'irradiance mesurée en façade opposée n'est cependant pas maximale. On peut alors supposer que l'apport des réflexions est maximal sous certains angles d'irradiances qui favorisant l'apport des réflexions.

Enfin, du fait que les irradiances soient mesurées de façon uniforme, dans cette configuration et sur la façade masquée au rayonnement direct, on ne peut que supposer que les réflexions sont de nature diffuse. Cela correspond alors bien au comportement optique du crépis, installé sur la maquette dans cette configuration. Les capteurs *E1* et *W1* semblent relever une irradiance plus faible en réflexion, mais cette différence avec l'irradiance relevée par le reste des capteurs n'est pas suffisamment significative ( $30\text{W}/\text{m}^2$  entre le capteur *E1* et *E5* à 11h22, soit 11% par rapport aux  $260\text{W}/\text{m}^2$  relevés par la capteur *E5* à cette heure-ci) pour pouvoir être interprétée, d'autant que cette observation reste ponctuelle et n'est pas vérifiée sur les autres acquisitions.

Suite à cette première campagne, certains ajustements ont été effectués. Les capteurs au sol au sein du canyon sont ajoutés et le pyranomètre associé au rayonnement global remplacé afin de garantir une mesure tout au long de la journée.

#### **A.4.1.2 Configuration n°2 : occultation de la façade est.**

On étudie à présent la même configuration mais dont la façade orientée vers l'est est masquée avec un drap noir. On cherche ainsi à observer l'impact de l'absence de réflexion sur cette façade.

Concernant les ajustements réalisés, les capteurs au sol au centre du canyon ont été ajoutés et le pyranomètre mesurant l'irradiance globale déplacé. Les mesures effectuées retenues sont celles de la journée du 26 Juin (Figure A.7). En raison du drap obstruant la façade orientée vers l'est, les capteurs présents sur cette façade ont également été masqués et n'apparaissent donc pas sur la figure A.7.

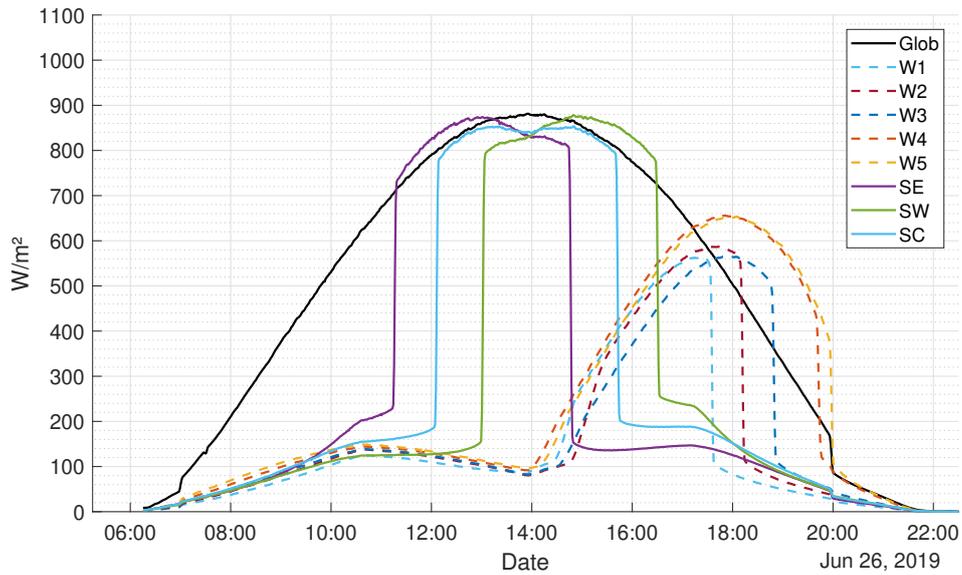


FIGURE A.7 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 26 juin 2019. La façade orientée vers l'est est occultée d'un drap noir afin de minimiser l'impact des réflexions. La façade orientée ouest reste en crépis blanc.

#### A.4.1.3 Configuration n°3 : Crépis rouge sur les 2 façades.

L'objectif est ici d'évaluer l'impact de la couleur sur la répartition des irradiances sur la façade opposée. On choisit donc une couleur présentant un coefficient de réflexion plus faible. Bien que l'irradiance globale soit plus faible que dans la configuration n°1, on observe que les apports solaires issus des réflexions sont plus faibles, que ce soit sur la façade opposée ou au sol.

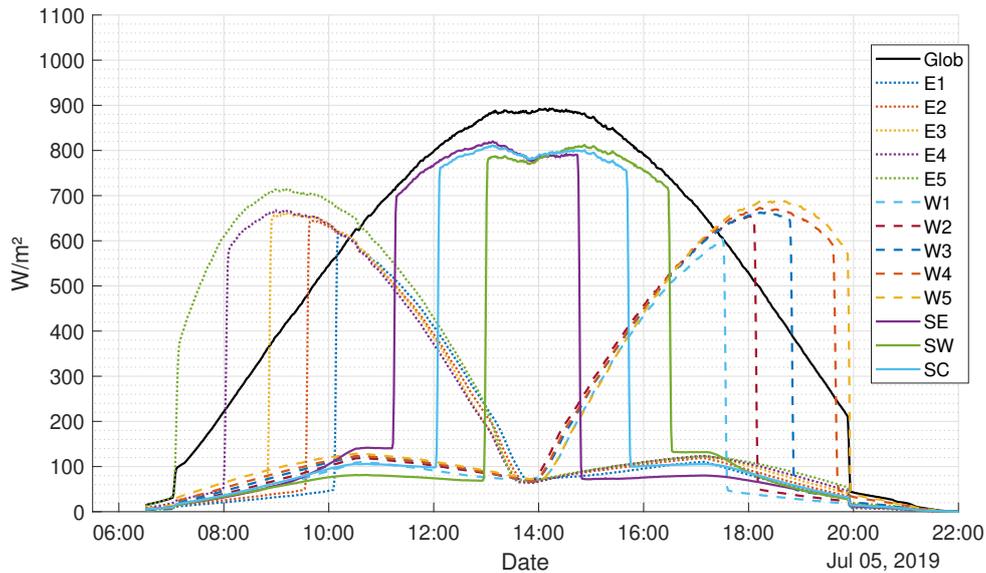


FIGURE A.8 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 4 août 2019. Les 2 façades sont en enduits rouges (Ech13150330).

#### A.4.1.4 Configuration n°4 : Bardage blanc sur les 2 façades.

Le but de cette campagne est d'évaluer l'impact d'un matériau très clair possédant un comportement en partie spéculaire (Section 3.2), sur la distribution des réflexions au sein du canyon. Comme pour la configuration n°1, l'irradiance globale est plus faible quand dans la configuration n°4, l'irradiance globale est plus faible quand dans la configuration n°1. On observe cependant que les apports solaires issus des réflexions sont nettement plus importants, que ce soit sur la façade opposée ou au sol. Cela apparaît nettement sur les capteurs situés au sol, où l'on relève respectivement  $990 \text{ W}/\text{m}^2$  et  $980 \text{ W}/\text{m}^2$  sur *SE* et *SW*.

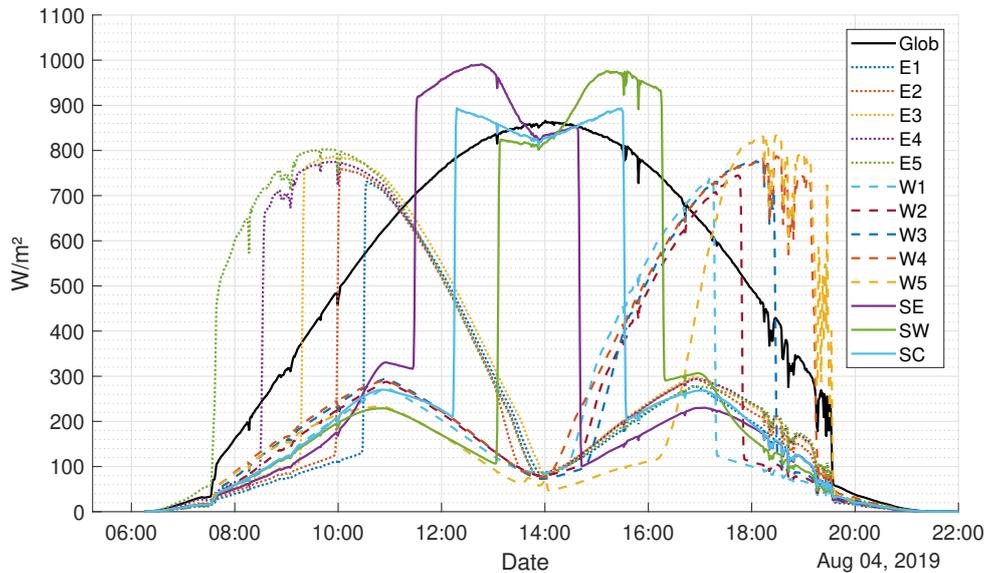


FIGURE A.9 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 4 août 2019. Les 2 façades sont en bardage blanc (Echantillon Bard. Blanc). On relève une incohérence dans la courbe du capteur W5.

La courbe du capteur W5 révèle une incohérence avec une irradiance mesurée trop faible entre 14h00 et 18h00. L'irradiance mesurée est alors incohérente avec les irradiances issues des autres capteurs sur cette même façade et sur cette même période. Cette mesure est également incohérente avec les relevés réalisés dans les autres configurations. Du fait que cette irradiance augmente rapidement à partir de 16h00, de manière synchrone avec la position descendante du soleil, et ce jusqu'à retrouver une valeur cohérente, on suppose que cette erreur provient d'une mauvaise orientation du capteur.

#### A.4.1.5 Configuration n°5 : Évaluation de l'impact de réflexions spéculaires.

De même que pour la configuration n°2, les capteurs présents sur la façade orientée est sont masqués par le miroir et retirés de la Figure A.10. Une découpe du miroir pour les capteurs a été suggérée mais n'a pas été réalisée face au risque de déformer le miroir. On suppose alors le miroir parfait, avec un coefficient de réflexion de 1. Le spectre réfléchi est donc théoriquement le spectre solaire.

On remarque que les capteurs exposés aux réflexions du miroir reçoivent un signal bruité, probablement lié à des irrégularités en surface du miroir suite à sa pose. On observe également que les réflexions peuvent générer des irradiances importantes sur la façade orientée ouest, notamment sur les capteurs situés à mi hauteur (jusqu'à  $1200\text{W}/\text{m}^2$  relevés sur W2, W3 et W4). Les capteurs situés au sol reçoivent également

une irradiance plus importante que dans les autres configurations, notamment le capteur *SE* qui apparaît comme le plus exposé aux réflexions issues du miroir, en particulier lorsque le soleil approche sa position zénithale. Notons que ce capteur semble saturer entre 11h56 et 12h35, le gain sélectionné au niveau de l'amplificateur étant alors probablement trop important. La position zénithale apparaît à 13h46, soit environ 30 minutes après la suppression quasi totale de la contribution des réflexions sur le capteur *SE* (13h11). Ce décalage de 30 minutes s'explique par des rayons issus du rayonnement direct pratiquement tangents à la façade : le capteur *SE* de retrouve alors en dehors de la zone collectant les réflexions. Cette observation tend à montrer la nature spéculaire des réflexions. Une fois cette position zénithale passée, les profils d'irradiance observés sont plus standards et similaires à ceux des acquisitions précédentes.

On peut toutefois noter un phénomène intéressant entre 14h58 et 15h18 : on observe sur cette période une irradiance globale anormalement importante, de pratiquement  $100\text{W/m}^2$  ( $910\text{W/m}^2$  mesuré à 15h07 contre  $801\text{W/m}^2$  à 15h19). Ce phénomène a déjà été relevé par Nicolas Ferley, chercheur au Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), dans ses mesures réalisées à Lille.

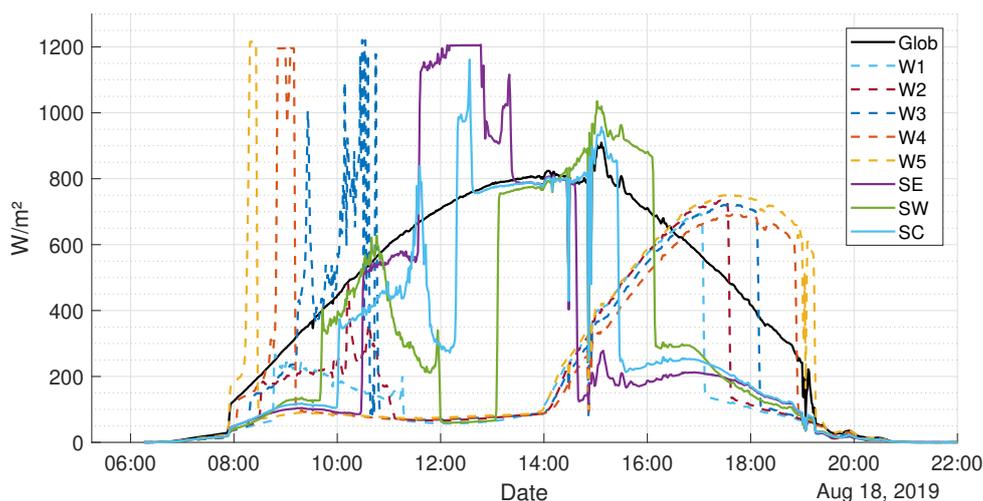


FIGURE A.10 – Irradiances [ $\text{W/m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 18 août 2019. La façade orientée vers l'est est équipée d'un miroir tandis que la surface orientée vers l'ouest est montée d'un bardage blanc.

#### A.4.2 Configuration $H/W = 2$ .

Pour l'ensemble des campagnes de mesures ci-dessous, un décalage de 9 minutes a été observé entre les mesures issues du pyranomètre de la station météorologique et celles remontées par la centrale d'acquisition de la maquette. Bien que cela provienne probablement de la centrale d'acquisition de la maquette, dissociée du réseau, les données n'ont pas été resynchronisées.

#### A.4.2.1 Configuration n°6 : réflexions diffuses sur crépis.

Dans cette configuration, un crépis (ECH1701000), identique à celui utilisé dans la configuration n°1, est installé sur chaque façade. On observe que les irradiances relevées en façades est et ouest sont bien symétriques (A.11).

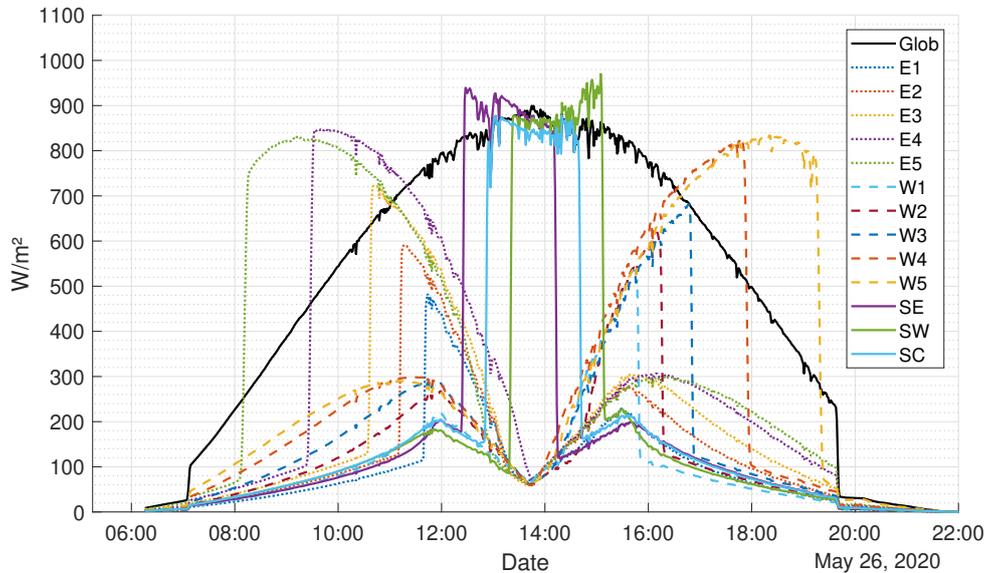


FIGURE A.11 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 26 mai 2020. Les façades sont équipées en crépis (Ech. 1701000).

#### A.4.2.2 Configuration n°7 : réflexions sur bardage blanc.

Dans cette configuration, les deux façades sont montées avec des bardages blancs identiques à ceux de la configuration n°4. Comme précédemment, on observe que les irradiances relevées en façades est et ouest sont bien symétriques. On note que les capteurs  $E2$  et  $E3$  mesurent des irradiances légèrement trop faibles, probablement liées à une mauvaise orientation des capteurs, car le même phénomène n'est pas observé avec les capteurs de la façade orientée ouest. On note également en fort piégeage des rayons sur les capteurs situés au sol, avec  $1200\text{W}/\text{m}^2$  de relevés par les capteurs  $SW$  et  $SE$ , respectivement à 12h28 et 14h50. Cela représente 290 et  $300\text{W}/\text{m}^2$  de plus que le rayonnement global mesuré par le capteur  $Glob$  aux mêmes instants.

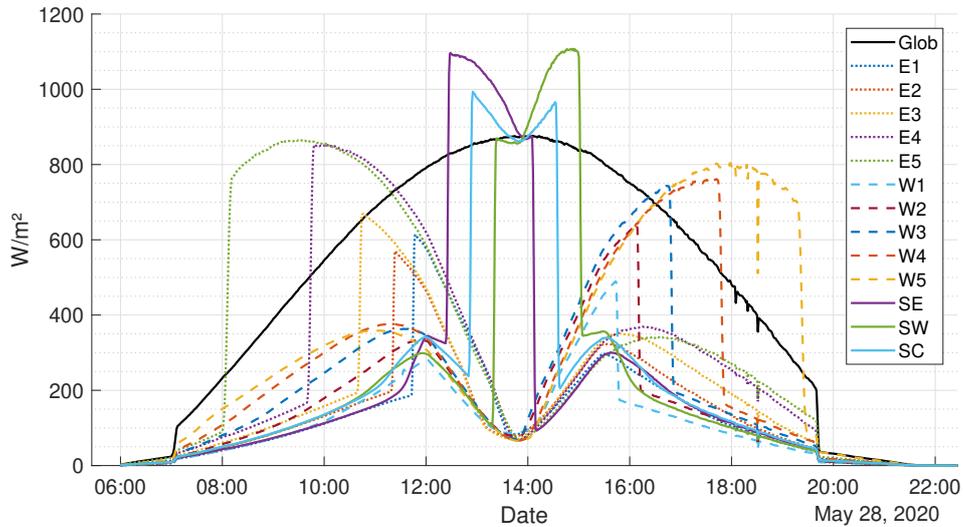


FIGURE A.12 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 27 mai 2020. Les deux façades sont équipées de bardages blancs.

#### A.4.2.3 Configuration n°8 : réflexions sur bardage blanc (façade orientée est) et noir (façade orientée ouest).

Dans cette 8<sup>ème</sup> configuration, la façade orientée vers l'est est montée d'un bardage blanc, tandis que la façade orientée vers l'ouest est montée d'un bardage noir. En l'absence de modifications sur la façade orientée vers l'est, le même biais est observé sur les capteurs  $E2$  et  $E3$ . Quelques passages nuageux l'après-midi sont relevés, et apparaissent notamment sur le profil du rayonnement global  $G_h$ , noté  $G_{\text{glob}}$ .

Il apparaît rapidement que les profils d'irradiance mesurés ne sont pas symétriques. L'absence de pic d'irradiance mesuré par les capteurs  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$ ,  $E4$  et  $E5$  durant l'après-midi révèle une absence de réflexion sur le bardage noir. Ce phénomène est également observé sur les capteurs situés au sol, le capteur  $SW$  ne relevant que  $1001\text{W}/\text{m}^2$  au maximum contre  $1068\text{W}/\text{m}^2$  pour le capteur  $SE$ . Il en est de même pour le capteur  $SC$ , qui relève jusqu'à  $983\text{W}/\text{m}^2$  le matin contre  $932\text{W}/\text{m}^2$  l'après-midi.

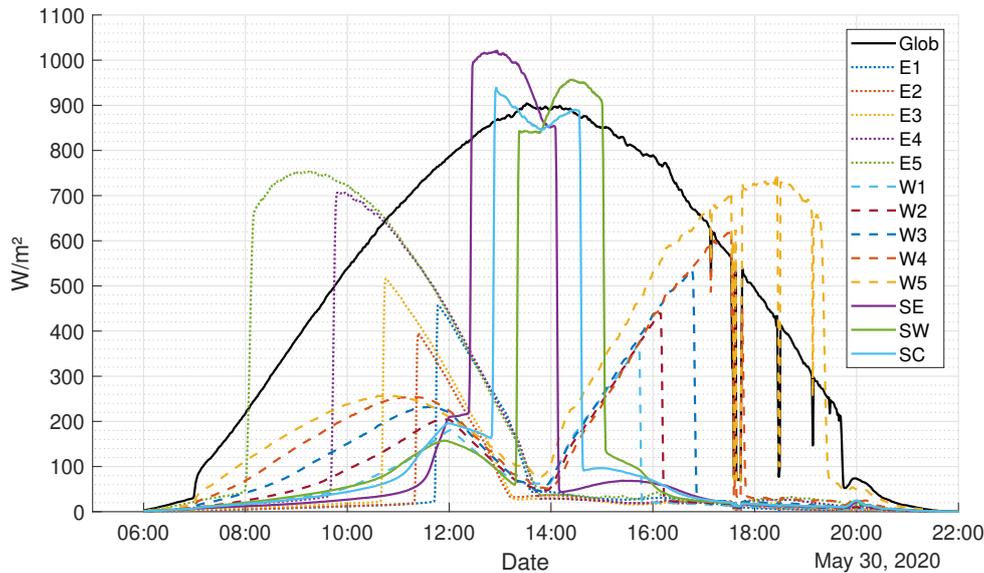


FIGURE A.13 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 27 mai 2020. La façade orientée est est équipée d'un bardage blanc, la façade orientée ouest est équipée d'un bardage noir.

#### A.4.2.4 Configuration n°9 : réflexions sur bardage noir sur chaque façade (façade orientée est et façade orientée ouest).

La configuration n°9 correspond à une configuration où la maquette est équipée de bardage noir sur les 2 façades. Les capteurs ont été réalignés, corrigeant le biais observé sur les deux acquisitions précédentes. Seul le capteur  $W5$  présente un léger décalage par rapport aux autres capteurs ( $\approx +60\text{W}/\text{m}^2$  vers 16h00). L'interprétation de ce décalage reste délicate en raison de l'exposition plus importante de ce capteur à la voûte céleste, et à l'influence des masques et des réflexions sur l'ensemble des capteurs.

En cohérence avec ce qui est attendu et les observations réalisées lors de la configuration n°9, on n'observe pas de "pic d'irradiance" sur les capteurs  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$ ,  $E4$ ,  $E5$ ,  $W1$ ,  $W2$ ,  $W3$ ,  $W4$  et  $W5$ . Comme dans le cas de la configuration précédente, on observe que l'irradiance relevée par le capteur  $SW$  ( $983\text{W}/\text{m}^2$  à 14h34) est plus faible que celle relevée par le capteur  $SE$  ( $1067\text{W}/\text{m}^2$  à 13h07). Seul une absence de réflexion pourrait expliquer cette observation. Cependant, des phénomènes de réflexion sont observés sur les capteurs  $SE$ ,  $SW$  et  $SC$ . Ces phénomènes sont notamment observés sur les relevés du capteur  $SC$ . On observe en effet deux "pics" (centrés sur 12h22 avec  $106\text{W}/\text{m}^2$ , et sur 15h13 avec  $83\text{W}/\text{m}^2$ ). Il n'y a alors pas d'hypothèse satisfaisante qui permette d'expliquer l'observation de ces deux phénomènes sur une même acquisition.

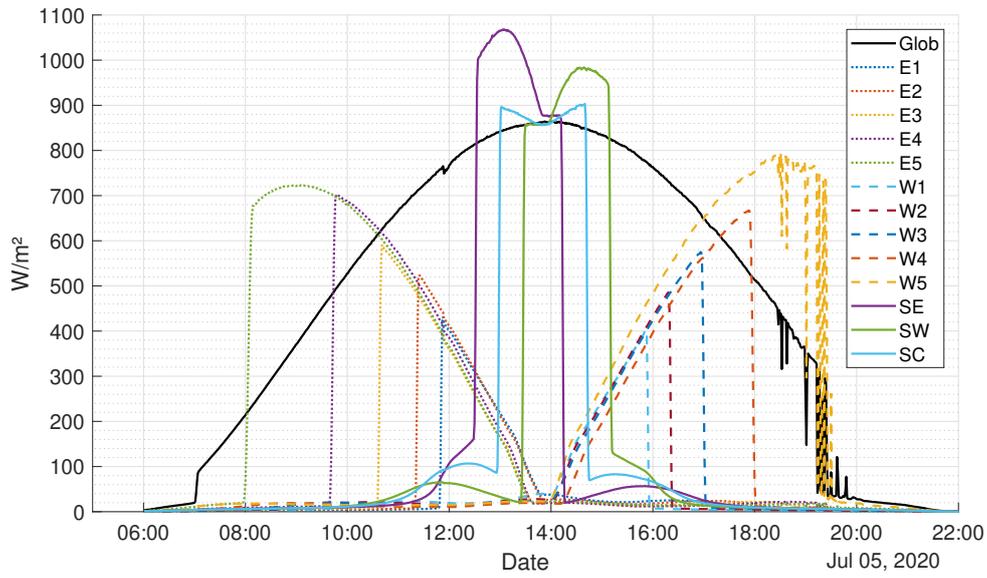


FIGURE A.14 – Irradiances [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] mesurées au sein du canyon urbain pour la journée du 5 août 2020. Les deux façades sont équipées d'un bardage noir.

## Annexe B

# Complément sur les mesures optiques.

### Sommaire

---

B.1 Mesures réalisées sur l'échantillon de bardage rouge. . . . .	218
B.2 Mesures sur l'échantillon de bardage noir. . . . .	219
B.3 Mesures sur un échantillon de verre (BK7 <sup>®</sup> ). . . . .	221
B.4 Observations générales. . . . .	223

---

Cette annexe sert de complément aux mesures optiques réalisées dans le chapitre 3. Les mesures réalisées sur les autres échantillons y sont notamment présentées.

### B.1 Mesures réalisées sur l'échantillon de bardage rouge.

Selon le même protocole de mesure que pour l'échantillon de bardage blanc (section 3.3), des mesures sont réalisées sur différents échantillons. On présente ici les mesures réalisées sur l'échantillon de bardage rouge, dans le cas d'un modèle avec un indice de réfraction commun aux deux polarisations. Les phénomènes observés sont similaires à ceux observés sur l'échantillon blanc, à savoir un spectre reconstruit sous-estimant la réflexion sur la bande spectrale [400 nm, 860 nm], soit avant le changement de capteur et de source, puis une bonne correspondance après 860 nm.

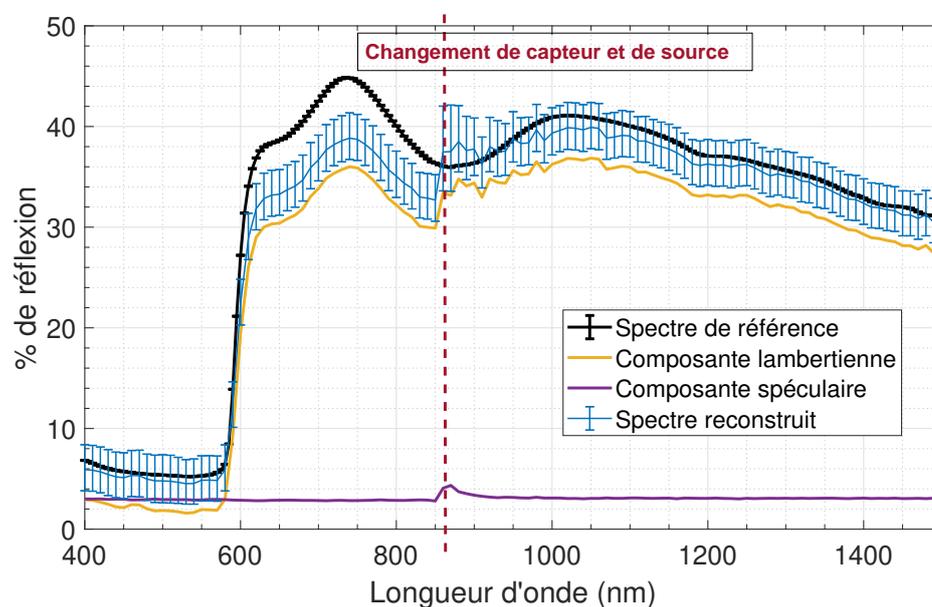


FIGURE B.1 – Reconstruction du spectre de réflexion de l'échantillon de bardage rouge à partir des mesures réalisées à l'ARTA.

La figure B.2 permet de visualiser la correspondance du modèle avec l'ensemble des mesures réalisées à 600 nm, toujours dans le cas d'un modèle où l'on attribut un même indice de réfraction aux deux polarisations. On observe que dans le cas de la polarisation P, l'approximation est moins bonne lorsque l'angle d'incidence augmente. Dans le cas de la polarisation S, on observe qu'un décalage des pics d'intensité apparaît. C'est probablement ce décalage qui génère une partie de l'erreur avant 600 nm.

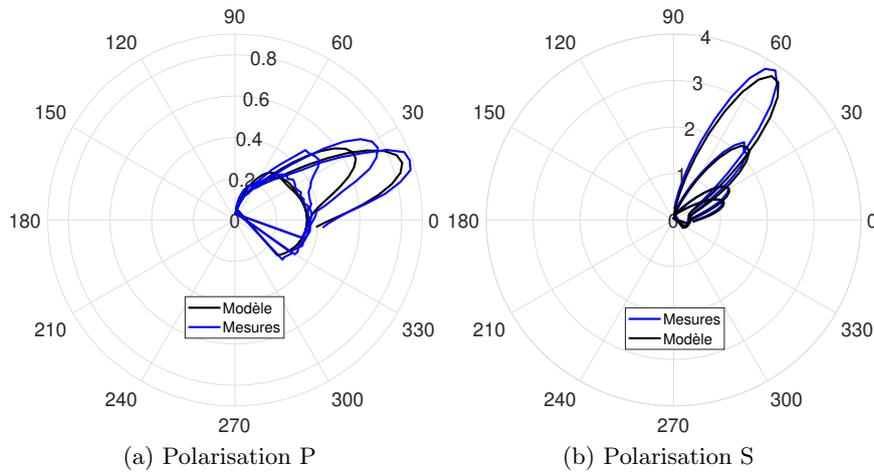


FIGURE B.2 – Confrontation du modèle de réflexion avec la mesure pour chaque polarisation dans le cas de l'échantillon de bardage rouge à 600 nm.

## B.2 Mesures sur l'échantillon de bardage noir.

Dans le cas de l'échantillon de bardage noir, le modèle suggère que la composante spéculaire est plus importante que la composante diffuse (figure B.3). Cette effet est également remarqué figure B.5, où l'on remarque une réflexion concentrée dans la direction attendue pour une réflexion spéculaire. L'erreur avec le spectre de référence est alors similaire avant et après 600 nm. On observe toujours un pic au changement de capteurs et de source, soit à 600 nm. Les composantes diffuse et lambertienne apparaissent relativement indépendantes de la longueur d'onde, de même que l'indice de réfraction obtenu, qui décroît tout de même légèrement lorsque les longueurs d'ondes augmentent ( $-0.1$  entre 400 et 1500 nm, figure B.4).

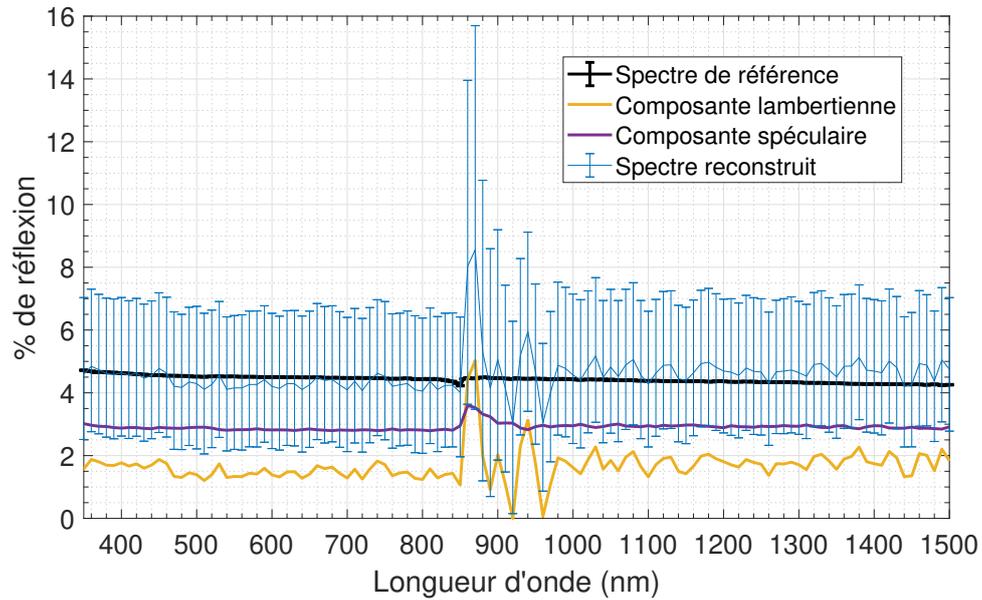


FIGURE B.3 – Reconstruction du spectre de réflexion de l'échantillon de bardage noir à partir des mesures réalisées à l'ARTA.

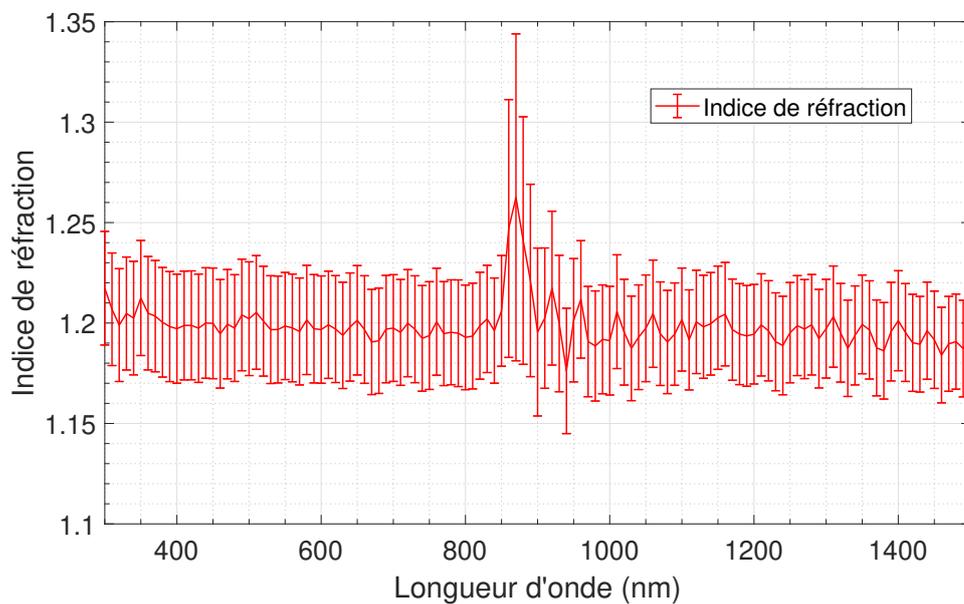


FIGURE B.4 – Reconstruction de l'indice de réfraction dans le cas de l'échantillon de bardage noir.

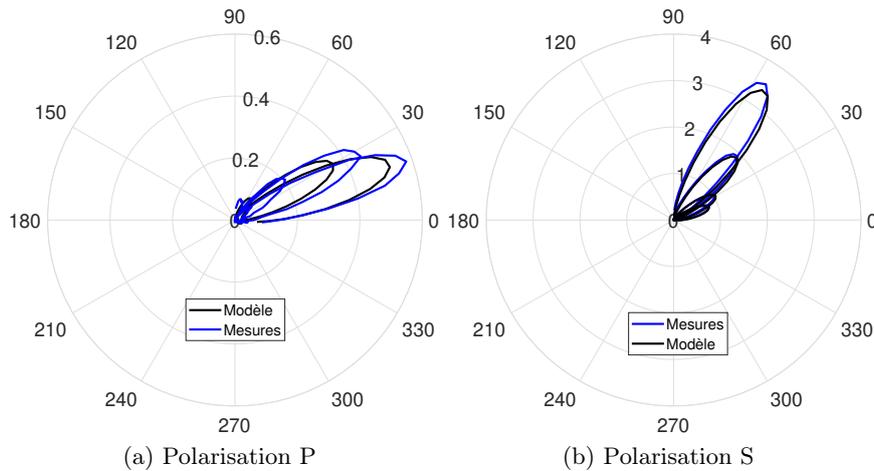


FIGURE B.5 – Confrontation du modèle de réflexion avec la mesure pour chaque polarisation dans le cas de l'échantillon de bardage noir à 600 nm.

### B.3 Mesures sur un échantillon de verre (BK7<sup>®</sup>).

Des mesures sur un échantillon de verre (BK7<sup>®</sup>) ont également été réalisées. Ce verre est le plus utilisé pour les applications dans les domaines du spectre visible et du proche infrarouge. Il est en particulier utilisé pour la construction de fenêtres, en raison de sa forte transmittance entre 350 nm et 2500 nm [179].

La figure B.6 permet de comparer le spectre de réflexion reconstruit à partir des mesures ARTA. On observe que le spectre de référence en réflexion du BK7<sup>®</sup> est pratiquement nul sur l'ensemble de la bande spectrale considérée ([350 nm, 1500 nm]). La composante diffuse alors reconstruite est bien nulle. Toutefois, le modèle sur-estime largement la part de réflexion spéculaire, que ce soit avant ou après 860 nm. Cet effet est probablement lié au fait que le spectre de référence soit mesuré avec un angle proche d'une irradiance normale. Or, on a vu (chapitre 3) que le comportement optique peut être sensible à l'angle d'incidence. Le spectre de référence utilisé, mesuré en irradiance à 8° n'est alors probablement pas pertinent pour être comparé au spectre reconstruit par mesures d'angles. Par ailleurs, l'absence de composante diffuse fait fortement augmenter les marges d'incertitudes de l'approximation des paramètres du modèle.

La nature spéculaire des réflexions apparaît nettement sur la figure B.7. Les mesures révèlent en effet une réflexion particulièrement concentrée dans la direction de réflexion géométrique, phénomène attendu en dans le cas de réflexions spéculaires.

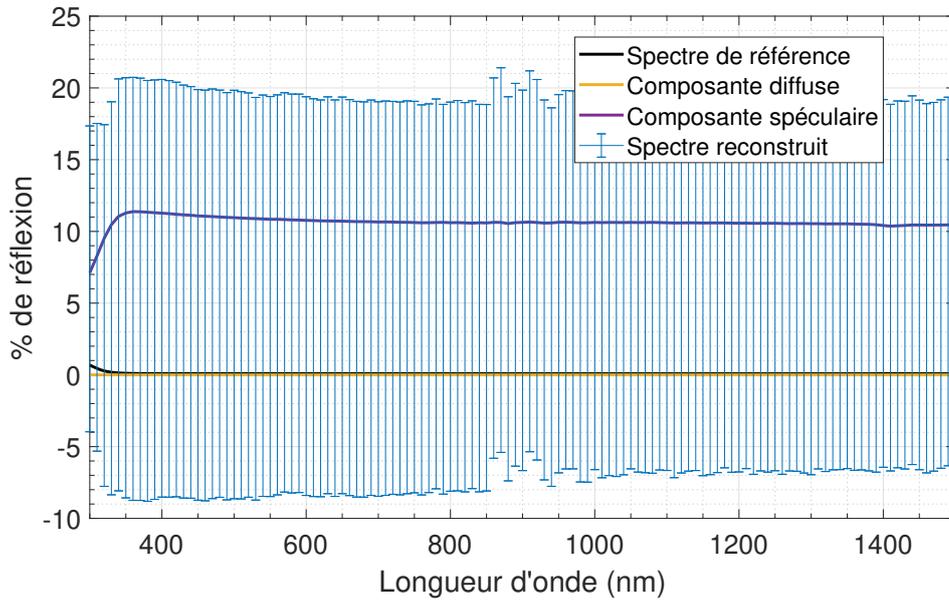


FIGURE B.6 – Reconstruction du spectre de réflexion de l'échantillon de verre ( $BK7^{\text{®}}$ ) à partir des mesures réalisées à l'ARTA.

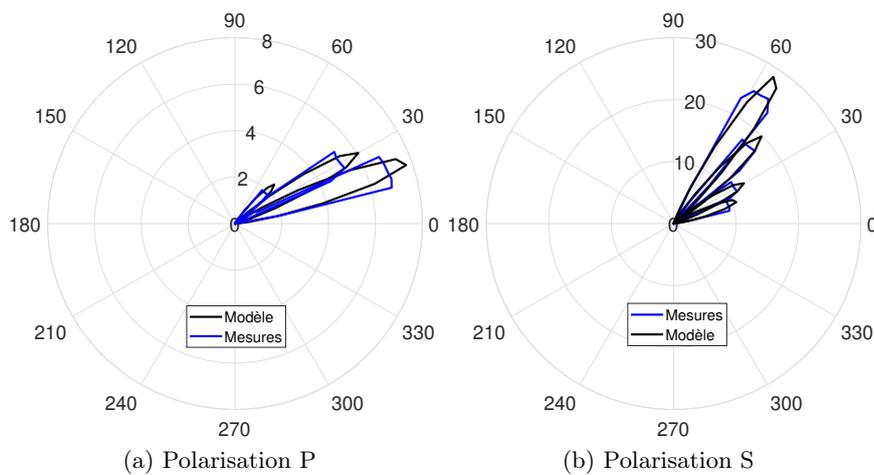


FIGURE B.7 – Confrontation du modèle de réflexion avec la mesure pour chaque polarisation dans le cas de l'échantillon de  $BK7^{\text{®}}$  à 600 nm.

On compare à présent l'indice de réfraction obtenu par le modèle à celui connu du  $BK7^{\text{®}}$  [179].

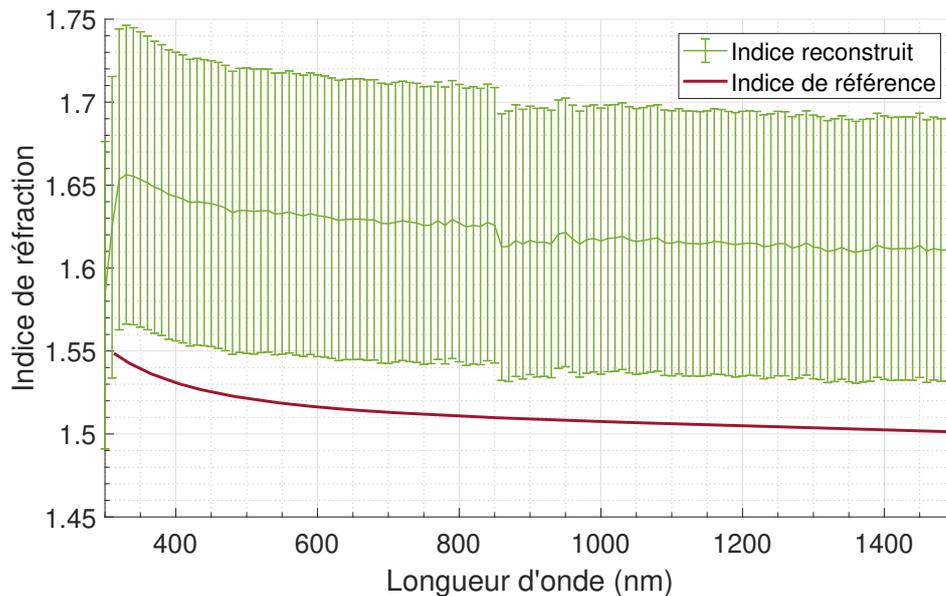


FIGURE B.8 – Comparaison de l'indice de réfraction reconstruit à partir du modèle et de l'indice de réfraction issu de la littérature pour l'échantillon de verre BK7<sup>®</sup>.

#### B.4 Observations générales.

On note que le modèle semble permettre de correctement simuler les BRDF puis de reconstruire le spectre de réflexion, en distinguant les composantes lambertiennes et spéculaires, pour différents matériaux. Cela paraît particulièrement vérifié pour les longueurs d'ondes supérieures à 860 nm. Un protocole de mesure rectifié et adapté pour les longueurs d'ondes inférieures à 860 nm devrait permettre de retrouver des résultats similaires. Des mesures sur une plus grande variété de matériaux seraient également à effectuer pour confronter le modèle à différents modes de réflexions, et l'adapter en conséquence.

# Bibliographie

- [1] VIVAPOLIS. *Solutions innovantes pour la ville durable*. 2019, p. 43. URL : [https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2019-07/energie\\_fr-2.pdf](https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2019-07/energie_fr-2.pdf) (visité le 28/07/2020).
- [2] Commissariat Général au DÉVELOPPEMENT DURABLE. *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2020*. Edition 2020. France : Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020, p. 88.
- [3] *Énergie dans les bâtiments*. Ministère de la Transition écologique. Library Catalog : [www.ecologique-solidaire.gouv.fr](http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr). URL : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/energie-dans-batiments> (visité le 28/07/2020).
- [4] *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique*. Library Catalog : Légifrance. (Visité le 28/07/2020).
- [5] *Efficacité énergétique et bâtiments : définition, solutions, chiffres*. Library Catalog : [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org). 21 déc. 2011. URL : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/efficacite-energetique-et-batiments> (visité le 28/07/2020).
- [6] Eirik RESCH et al. « Impact of Urban Density and Building Height on Energy Use in Cities ». In : *Energy Procedia*. Sustainable Built Environment Tallinn and Helsinki Conference SBE16 96 (1<sup>er</sup> sept. 2016), p. 800-814. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2016.09.142. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216307810> (visité le 06/05/2020).
- [7] Commissariat Général au DÉVELOPPEMENT DURABLE. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2018*. 2018. URL : [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-43-chiffres-clés-de-l-energie-edition-\\_2018-septembre2018.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-43-chiffres-clés-de-l-energie-edition-_2018-septembre2018.pdf) (visité le 26/06/2020).
- [8] GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, Rajendra Kumar PACHAURI et Leo A MEYER. *Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. OCLC : 948289514. Genève (Suisse) : GIEC, 2015. ISBN : 978-92-9169-243-9.

- [9] John HOUGHTON. *Global Warming : The Complete Briefing*. T. Edition Number 5. Cambridge University Press, 7 mai 2015. 396 p. ISBN : 978-1-107-46379-0.
- [10] Manolis PATRIARCHE. « Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains ». Thèse de doct. ENTPE, 2014.
- [11] *Chiffres des ventes & immatriculations de voitures électriques en France*. Automobile Propre. URL : <http://www.automobile-propre.com/dossiers/chiffres-vente-immatriculations-france/> (visité le 10/08/2018).
- [12] OBSERV'ER et Fondation Energie pour le MONDE. « 1. La production d'électricité dans le monde : perspectives générales ». In : (2013), p. 6.
- [13] ANONYMOUS. *Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020*. Action pour le climat - European Commission. Library Catalog : ec.europa.eu. 23 nov. 2016. URL : [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr) (visité le 06/04/2020).
- [14] Ministère de la transition écologique et SOLIDAIRE. *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2020*. 2020, p. 88.
- [15] *Production – Production totale : RTE Bilan électrique 2019*. URL : <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/production-totale/> (visité le 06/04/2020).
- [16] *Population urbaine (% du total) | Data*. URL : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS> (visité le 09/04/2020).
- [17] United NATIONS. *World Population Prospects The 2015 Revision*. New York, 2015. URL : [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/Key\\_Findings\\_WPP\\_2015.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf) (visité le 04/08/2020).
- [18] *Pays du Sud : les grands enjeux de la croissance urbaine*. Ined - Institut national d'études démographiques. Library Catalog : www.ined.fr. URL : <https://www.ined.fr/fr/actualites/presse/pays-sud-grands-enjeux-de-la-croissance-urbaine/> (visité le 09/04/2020).
- [19] E. J. GAGO et al. « Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (1<sup>er</sup> jan. 2015), p. 1-13. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.08.002. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114006777> (visité le 29/07/2020).
- [20] Hou YI-LING et al. « Influences of Urban Temperature on the Electricity Consumption of Shanghai ». In : *Advances in Climate Change Research* 5.2 (1<sup>er</sup> jan. 2014), p. 74-80. ISSN : 1674-9278. DOI : 10.3724/SP.J.1248.2014.074. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927814500135> (visité le 24/03/2020).

- [21] Aude LEMONSU et al. « Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate ». In : *Climatic Change* 116.3 (1<sup>er</sup> fév. 2013), p. 679-692. ISSN : 1573-1480. DOI : 10.1007/s10584-012-0521-6. URL : <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0521-6> (visité le 26/03/2020).
- [22] Xiaoma LI et al. « Urban heat island impacts on building energy consumption : A review of approaches and findings ». In : *Energy* 174 (1<sup>er</sup> mai 2019), p. 407-419. ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2019.02.183. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219303895> (visité le 26/03/2020).
- [23] Nahid MOHAJERI et al. « Integrating urban form and distributed energy systems : Assessment of sustainable development scenarios for a Swiss village to 2050 ». In : *Renewable Energy* 143 (1<sup>er</sup> déc. 2019), p. 810-826. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2019.05.033. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119306925> (visité le 10/08/2020).
- [24] *Les réseaux de chaleur*. ADEME. Library Catalog : [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr). URL : <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/transport-lenergie/reseaux-chaleur> (visité le 09/04/2020).
- [25] Haiyan CHEN, Beisi JIA et S. S. Y. LAU. « Sustainable urban form for Chinese compact cities : Challenges of a rapid urbanized economy ». In : *Habitat International* 32.1 (1<sup>er</sup> mar. 2008), p. 28-40. ISSN : 0197-3975. DOI : 10.1016/j.habitatint.2007.06.005. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397507000367> (visité le 20/03/2020).
- [26] Ryan MARTENS, Brad BASS et Susana Saiz ALCAZAR. « Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance ». In : *Urban Ecosyst* 11.4 (1<sup>er</sup> déc. 2008), p. 399-408. ISSN : 1573-1642. DOI : 10.1007/s11252-008-0053-z. URL : <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0053-z> (visité le 29/07/2020).
- [27] Youpei HU, Marcus WHITE et Wowo DING. « An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area ». In : *Procedia Engineering* 169 (2016), p. 166-174. ISSN : 18777058. DOI : 10.1016/j.proeng.2016.10.020. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816332222> (visité le 29/07/2020).
- [28] FRANÇOIS. *Qualité de l'air : concentration en particules très fines (PM 2.5)*. Bruxelles Environnement. 18 fév. 2016. URL : <https://environnement.brussels/etat-de-lenvironnement/rapport-2011-2014/air/qualite-de-lair-concentration-en-particules-tres-fines> (visité le 08/08/2018).
- [29] OAR US EPA. *Heat Island Effect*. US EPA. 28 fév. 2014. URL : <https://www.epa.gov/heat-islands> (visité le 08/08/2018).

- [30] Clara Stina GOOD, Gabriele LOBACCARO et Siri HÅRKLAU. « Optimization of Solar Energy Potential for Buildings in Urban Areas – A Norwegian Case Study ». In : *Energy Procedia*. Renewable Energy Research Conference, RERC 2014 58 (1<sup>er</sup> jan. 2014), p. 166-171. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2014.10.424. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214017913> (visité le 23/03/2020).
- [31] Mindjid MAÏZIA et al. « Energy requirements of characteristic urban blocks ». In : (sept. 2009). Publisher : Lausanne. URL : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/31629> (visité le 26/03/2020).
- [32] Mindjid MAÏZIA. « L'énergétique urbaine et la morphologie des villes. L'analyse du bâti parisien ». In : *Les Annales de la Recherche Urbaine* 103 (2007). Publisher : PUCA, p. 79-85. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00177784> (visité le 24/03/2020).
- [33] Koen STEEMERS. « Energy and the city : density, buildings and transport ». In : *Energy and Buildings*. Special issue on urban research 35.1 (1<sup>er</sup> jan. 2003), p. 3-14. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/S0378-7788(02)00075-0. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000750> (visité le 26/03/2020).
- [34] Marion BONHOMME. « Contribution to the generation of multiscale and evolutionary databases for a multidisciplinary approach to urban energy ». Thèse de doct. Université de Toulouse, 11 déc. 2013.
- [35] Michele MORGANTI et al. « Urban morphology indicators for solar energy analysis ». In : *Energy Procedia*. Sustainability in Energy and Buildings 2017 : Proceedings of the Ninth KES International Conference, Chania, Greece, 5-7 July 2017 134 (1<sup>er</sup> oct. 2017), p. 807-814. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2017.09.533. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217346623> (visité le 20/03/2020).
- [36] Laura BELLIA, Alessia PEDACE et Francesca FRAGLIASSO. « The impact of the software's choice on dynamic daylight simulations' results : A comparison between Daysim and 3ds Max Design® ». In : *Solar Energy* 122 (1<sup>er</sup> déc. 2015), p. 249-263. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2015.08.027. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15004636> (visité le 25/03/2020).
- [37] T VERMEULEN, J H KÄMPF et B BECKERS. « URBAN FORM OPTIMIZATION FOR THE ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS USING CITYSIM ». In : (2013), p. 6.
- [38] Amina HARZALLAH. « Émergence et évolution des préconisations solaires dans les théories architecturales et urbaines en France, de la seconde moitié du XIXe siècle à la deuxième guerre mondiale ». Thèse de doctorat. Nantes, 1<sup>er</sup> jan. 2007. URL : <https://www.theses.fr/2007NANT2001> (visité le 30/07/2020).

- [39] Aristotelis VARTHOLOMAIOS. « The residential solar block envelope : A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential ». In : *Energy and Buildings* 99 (15 juil. 2015), p. 303-312. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.2015.04.046. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881500345X> (visité le 24/03/2020).
- [40] Daniel SIRET. « Rayonnement solaire et environnement urbain : de l'héliotropisme au désenchantement, histoire et enjeux d'une relation complexe ». In : *Développement durable et territoires* (Vol. 4, n°2 8 mai 2013). ISSN : 1772-9971. DOI : 10.4000/developpementdurable.9767. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/9767> (visité le 03/04/2020).
- [41] Ralph L KNOWLES. « The solar envelope : its meaning for energy and buildings ». In : *Energy and Buildings*. Special issue on urban research 35.1 (1<sup>er</sup> jan. 2003), p. 15-25. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/S0378-7788(02)00076-2. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000762> (visité le 03/04/2020).
- [42] Masaru AIDA et Kiyoshi GOTOH. « Urban albedo as a function of the urban structure—a two-dimensional numerical simulation ». In : *Boundary-layer meteorology* 23.4 (1982), p. 415-424.
- [43] Mattia MANNI et al. « Exploiting selective angular properties of retro-reflective coatings to mitigate solar irradiation within the urban canyon ». In : *Solar Energy* 189 (1<sup>er</sup> sept. 2019), p. 74-85. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2019.07.045. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19307078> (visité le 22/08/2019).
- [44] Gabriele LOBACCARO et al. « Boosting solar accessibility and potential of urban districts in the Nordic climate : A case study in Trondheim ». In : *Solar Energy* 149 (juin 2017), p. 347-369. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/j.solener.2017.04.015. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X17302992> (visité le 07/01/2019).
- [45] Swapnil DUBEY, Jatin Narotam SARVAIYA et Bharath SESHADRI. « Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review ». In : *Energy Procedia*. PV Asia Pacific Conference 2012 33 (1<sup>er</sup> jan. 2013), p. 311-321. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2013.05.072. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829> (visité le 23/03/2020).
- [46] A. D. JONES et C. P. UNDERWOOD. « A thermal model for photovoltaic systems ». In : *Solar Energy* 70.4 (1<sup>er</sup> jan. 2001), p. 349-359. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/S0038-092X(00)00149-3. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00001493> (visité le 23/03/2020).

- [47] A. BOCCALATTE, M. FOSSA et C. MÉNÉZO. « Best arrangement of BIPV surfaces for future NZEB districts while considering urban heat island effects and the reduction of reflected radiation from solar façades ». In : *Renewable Energy* 160 (1<sup>er</sup> nov. 2020), p. 686-697. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2020.07.057. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120311332> (visité le 05/08/2020).
- [48] Jonathan WRIGHT. « GEOMETRIC OPTIMIZATION OF FENESTRATION ». In : (), p. 9.
- [49] John MARDALJEVIC. « Daylight, Indoor Illumination, and Human Behavior ». In : (2012), p. 94.
- [50] Ya Brigitte ASSOA et al. « Thermal analysis of a BIPV system by various modeling approaches ». In : *Solar Energy* 155 (oct. 2017), p. 1289-1299. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/j.solener.2017.07.066. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X17306515> (visité le 30/10/2017).
- [51] EDORA. « Qu'est-ce que le BIPV ? » 2017. URL : [https://edora.org/wp-content/uploads/2017/03/fiche\\_info\\_BIPV\\_photos.pdf](https://edora.org/wp-content/uploads/2017/03/fiche_info_BIPV_photos.pdf) (visité le 27/03/2020).
- [52] Wenli WANG et al. « Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai ». In : *Energy and Buildings* 130 (15 oct. 2016), p. 98-106. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.2016.07.066. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816306764> (visité le 27/03/2020).
- [53] John van ROOSMALEN et al. « Brick modules for improved aesthetics in PV introducing the Dutch solar design project ». In : *Proceedings Advanced Building Skins* (2017).
- [54] L.H. SLOOFF et al. « New module concept for aesthetic PV integration with better shadow performance ». In : *Proceedings Advanced Building Skins* (2017).
- [55] Sara FREITAS et Miguel Centeno BRITO. « Solar façades for future cities ». In : *Renewable Energy Focus* 31 (1<sup>er</sup> déc. 2019), p. 73-79. ISSN : 1755-0084. DOI : 10.1016/j.ref.2019.09.002. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175500841930198X> (visité le 25/03/2020).
- [56] Jennifer ADAMI et al. « Outcome of a BIPV case studies collection : integration concepts ». In : *Proceedings Advanced Building Skins* (2017).
- [57] J. J. BLOEM. « Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment ». In : *Building and Environment. Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components* 43.2 (1<sup>er</sup> fév. 2008), p. 205-216. ISSN : 0360-1323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2006.10.041. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003015> (visité le 02/04/2020).

- [58] Laura MATURI et al. « BiPV System Performance and Efficiency Drops : Overview on PV Module Temperature Conditions of Different Module Types ». In : *Energy Procedia*. Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013) 48 (1<sup>er</sup> jan. 2014), p. 1311-1319. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2014.02.148. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021400410X> (visité le 02/04/2020).
- [59] Alain RICAUD. « Systèmes photovoltaïques ». In : (2011), p. 155.
- [60] B.J BRINKWORTH. « Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts ». In : *Solar Energy* 69.5 (2000), p. 413-420. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/S0038-092X(00)00082-7. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X00000827> (visité le 20/08/2018).
- [61] Martin THEBAULT, Stéphanie GIROUX-JULIEN et Christophe MENEZO. « Modèles d'ordre réduit pour l'analyse et la modélisation de l'effet cheminée et des transferts de chaleur associés - application aux enveloppes ventilées des bâtiments solaires ou producteurs d'énergie. » In : (2016), p. 9.
- [62] Miroslav ČEKON et Jakub ČURPEK. « Parametric analysis of BiPV façade coupled with transparent insulation ». In : *Proceedings Advanced Building Skins* (2017).
- [63] Cristina S. Polo LÓPEZ et Marco SANGIORGI. « Comparison Assessment of BIPV Façade Semi-transparent Modules : Further Insights on Human Comfort Conditions ». In : *Energy Procedia*. Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013) 48 (1<sup>er</sup> jan. 2014), p. 1419-1428. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2014.02.160. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214004226> (visité le 01/09/2020).
- [64] Aritra GHOSH, Senthilarasu SUNDARAM et Tapas K. MALLICK. « Colour properties and glazing factors evaluation of multicrystalline based semi-transparent Photovoltaic-vacuum glazing for BIPV application ». In : *Renewable Energy* 131 (fév. 2019), p. 730-736. ISSN : 09601481. DOI : 10.1016/j.renene.2018.07.088. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118308851> (visité le 08/01/2019).
- [65] C. CHAIN, D. DUMORTIER et M. FONTOYNONT. « Consideration of daylight's colour ». In : *Energy and Buildings* 33.3 (1<sup>er</sup> fév. 2001), p. 193-198. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/S0378-7788(00)00081-5. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800000815> (visité le 20/04/2020).
- [66] *Proceedings Advanced Building Skins*. 2017.
- [67] Bruno SORIA. « Etude des performances électriques annuelles de modules photovoltaïques bifaces. Cas particulier modules bifaces intégrés en façade verticale ». Thèse de doct. Grenoble, 2014.
- [68] *Welcome to PVCDROM | PVEducation*. URL : <https://www.pveducation.org/pvcdrom> (visité le 30/07/2020).

- [69] Tomás BAENAS et Maider MACHADO. « Optical model for multilayer glazing systems : Application to laminated glass and photovoltaic modules ». In : *Solar Energy* 125 (1<sup>er</sup> fév. 2016), p. 256-266. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2015.12.027. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15007008> (visité le 15/06/2020).
- [70] Paul KAAIJK, Yvonnick DURAND et ADEME SOPHIA-ANTIPOLIS. « French experiences and vision on BIPV ». In : (), p. 22.
- [71] Gabriele C. EDER et al. « Designed BIPV-elements with printed front-glass : simulation and experimental evaluation of the effect of printing on the electrical performance ». In : *Proceedings Advanced Building Skins* (2017).
- [72] Gabriele EDER et al. *COLOURED BIPV Market, Research and Development*. Report IEA-PVPS T15-07 : 2019. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, fév. 2019, p. 60. URL : [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS\\_15\\_R07\\_Coloured\\_BIPV\\_report.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_15_R07_Coloured_BIPV_report.pdf) (visité le 08/06/2020).
- [73] Janne HALME et Pyry MÄKINEN. « Theoretical efficiency limits of ideal coloured opaque photovoltaics ». In : *Energy & Environmental Science* 12.4 (2019). Publisher : Royal Society of Chemistry, p. 1274-1285. DOI : 10.1039/C8EE03161D. URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee03161d> (visité le 23/06/2020).
- [74] Isa ZANETTI et al. *Building Integrated Photovoltaics : Product overview for solar building skins*. Status Report 2017. Switzerland : SERAC - SUPSI, 2017. URL : [http://www.bipv.ch/images/Report\%202017\\_SUPSI\\_SEAC\\_BIPV.pdf](http://www.bipv.ch/images/Report\%202017_SUPSI_SEAC_BIPV.pdf) (visité le 30/07/2020).
- [75] *La révolution de l'autoconsommation collective*. Alternatives Economiques. URL : <https://www.alternatives-economiques.fr/revolution-de-lautoconsommation-collective/00081563> (visité le 01/09/2020).
- [76] Morgane COLOMBERT. « Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville ». Thèse de doct. Université Paris Est, 2008. 541 p.
- [77] T. R. OKE. « City size and the urban heat island ». In : *Atmospheric Environment* (1967) 7.8 (1<sup>er</sup> août 1973), p. 769-779. ISSN : 0004-6981. DOI : 10.1016/0004-6981(73)90140-6. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004698173901406> (visité le 16/11/2020).
- [78] Sylvain DUPONT et Patrice G. MESTAYER. « Parameterization of the Urban Energy Budget with the Submesoscale Soil Model ». In : *J. Appl. Meteor. Climatol.* 45.12 (1<sup>er</sup> déc. 2006). Publisher : American Meteorological Society, p. 1744-1765. ISSN : 1558-8424. DOI : 10.1175/JAM2417.1. URL : <https://journals.ametsoc.org/jamc/article/45/12/1744/12776/Parameterization-of-the-Urban-Energy-Budget-with> (visité le 04/08/2020).

- [79] Clément RIBAULT. « Quel modèle de développement pour les éco-quartiers ? » In : (2014). Publisher : Unpublished. DOI : 10.13140/RG.2.1.3223.8964. URL : <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3223.8964> (visité le 24/03/2020).
- [80] Carlo RATTI, Nick BAKER et Koen STEEMERS. « Energy consumption and urban texture ». In : *Energy and Buildings* 37.7 (1<sup>er</sup> juil. 2005), p. 762-776. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.2004.10.010. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804003391> (visité le 20/03/2020).
- [81] Dominique GROLEAU. « Solene un Outil de Simulation des Eclairages Solaires et Lumineux dans les Projets Architecturaux et Urbains ». In : (2000), p. 8.
- [82] Adrien GROS. « Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier ». Thèse de doct. Université de la Rochelle, 26 juin 2013. 162 p. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01066106/document> (visité le 14/02/2018).
- [83] Pierre P. KASTENDEUCH, Georges NAJJAR et Nicolas RINGENBACH. « Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg ». In : *Climatologie* (Volume 3 2006), p. 25-42.
- [84] P.P. KASTENDEUCH et G. NAJJAR. « Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas ». In : *Solar Energy* 83.3 (mar. 2009), p. 333-341. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/j.solener.2008.08.006. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X08002090> (visité le 16/11/2017).
- [85] Darren ROBINSON et al. « Citysim : comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning ». In : (27 juin 2009), p. 8.
- [86] Thomas LEISS, Peter FERSCHIN et Werner PURGATHOFER. « Radiosity with Textures, Specular Reflexion and Transmission ». In : (16 juin 2017), p. 16.
- [87] Ian ASHDOWN. *Radiosity : A Programmer's Perspective*. Illustré. Wiley, 1994. 497 p. ISBN : 0-471-30444-1 978-0-471-30444-9.
- [88] Tanja SIEMS et al. *State-of-the-Art of Education on Solar Energy in Urban Planning - Part 2 : Solar Irradiation Potential Tools in Education*. IEA SHC Task 51, 1<sup>er</sup> fév. 2018. DOI : 10.18777/ieashc-task51-2018-0002. URL : [http://task54.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/180222\\_Task51\\_Report\\_DD1\\_Part21.pdf](http://task54.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/180222_Task51_Report_DD1_Part21.pdf) (visité le 25/03/2020).
- [89] Francis MIGUET et Dominique GROLEAU. « A daylight simulation tool for urban and architectural spaces— application to transmitted direct and di use light through glazing ». In : *Building and Environment* (2002), p. 11.
- [90] Benjamin MORILLE, Marjorie MUSY et Laurent MALYS. « Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale : Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions ». In : *Energy and Buildings*. SI : Countermeasures to Urban Heat Island 114 (Supplement C 15 fév. 2016), p. 275-282. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.

- 2015.06.030. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815300578> (visité le 01/12/2017).
- [91] Ian ASHDOWN et al. « LICASO and DAYSIM : A Comparison ». In : All Things Lighting blog (fév. 2017). DOI : 10.13140/RG.2.2.25669.09441.
- [92] Darren ROBINSON et Andrew STONE. « Solar radiation modelling in the urban context ». In : *Solar Energy* 77.3 (sept. 2004), p. 295-309. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/j.solener.2004.05.010. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04001161> (visité le 30/10/2017).
- [93] S. J. BODE, P. GAUCHÉ et D. GRIFFITH. « A Novel Approach to Reduce Ray Tracing Simulation Times by Predicting Number or Rays ». In : (2013). URL : <https://core.ac.uk/reader/82278010> (visité le 22/04/2020).
- [94] Johan FREDRIKSSON et Adam SCOTT. *Generating Real Time Reflections by Ray Tracing Approximate Geometry*. Master's thesis. Department of Interaction Design et Technologies : CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2016. URL : <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/242141/242141.pdf> (visité le 24/06/2020).
- [95] Tim FOLEY et Jeremy SUGERMAN. « KD-tree acceleration structures for a GPU raytracer ». In : ACM Press, 2005, p. 15. ISBN : 978-1-59593-086-6. DOI : 10.1145/1071866.1071869. URL : <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1071866.1071869> (visité le 10/07/2018).
- [96] Jean-Patrick ROCCIA et Vincent FOREST. « RayBooster : An efficient, robust, generic and easy to use basic component for high performance radiative simulations ». In : (2014), p. 12.
- [97] Jesús ROBLEDO et al. « From video games to solar energy : 3D shading simulation for PV using GPU ». In : *Solar Energy* 193 (15 nov. 2019), p. 962-980. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2019.09.041. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19309168> (visité le 19/02/2020).
- [98] Greg WARD LARSON et Rob A. SHAKESPEARE. *Rendering with Radiance : The Art and Science of Lighting Visualization*. Morgan Kaufmann Publishers, 1998. ISBN : 0-9745381-0-8. URL : <https://floyd.lbl.gov/radiance/book/index.html> (visité le 10/08/2020).
- [99] Christoph F. REINHART et Sebastian HERKEL. « The simulation of annual daylight illuminance distributions — a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods ». In : *Energy and Buildings* 32.2 (1<sup>er</sup> juil. 2000), p. 167-187. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/S0378-7788(00)00042-6. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800000426> (visité le 25/03/2020).

- [100] Christoph F. REINHART et Oliver WALKENHORST. « Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds ». In : *Energy and Buildings* 33.7 (1<sup>er</sup> sept. 2001), p. 683-697. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/S0378-7788(01)00058-5. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801000585> (visité le 25/03/2020).
- [101] R. PEREZ, R. SEALS et J. MICHALSKY. « All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation ». In : *Solar Energy* 50.3 (1<sup>er</sup> mar. 1993), p. 235-245. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/0038-092X(93)90017-I. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9390017I> (visité le 12/12/2017).
- [102] *Ladybug Tools / Honeybee*. URL : <https://www.ladybug.tools/honeybee.html> (visité le 10/08/2020).
- [103] Mostapha SADEGHIPOUR ROUDSARI, Pak MICHELLE et Smith ADRIAN. « Ladybug : A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design ». In : 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France, 26 août 2013.
- [104] *ArchSim Energy Modeling for GH*. Food4Rhino. 13 sept. 2013. URL : <https://www.food4rhino.com/app/archsim-energy-modeling-gh> (visité le 10/08/2020).
- [105] SOLEMMA. *Solemnia LLC*. Solemma. Jan. 2019. URL : <https://www.solemnia.com/> (visité le 23/01/2019).
- [106] Mostapha Sadeghipour ROUDSARI, Michelle PAK et Adrian SMITH. « Ladybug : a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design ». In : *Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug. 2013*. 2013.
- [107] *OpenStudio-Radiance Reference Guide - OpenStudio® SDK User Docs*. URL : [https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/reference/refguide\\_radiance/](https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/reference/refguide_radiance/) (visité le 10/08/2020).
- [108] Fredrik LINDBERG, Björn HOLMER et Sofia THORSSON. « SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings ». In : *International Journal of Biometeorology* 52.7 (sept. 2008), p. 697-713. ISSN : 0020-7128, 1432-1254. DOI : 10.1007/s00484-008-0162-7. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00484-008-0162-7> (visité le 16/11/2020).
- [109] Bruno CATTANEO. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. EU Science Hub - European Commission. 15 juin 2018. URL : <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (visité le 13/08/2020).
- [110] PVSyst. *PVSyst*. PVSyst. URL : <https://www.pvsyst.com/fr/> (visité le 13/08/2020).

- [111] Hassan RADHI, Fayze FIKRY et Stephen SHARPLES. « Impacts of urbanisation on the thermal behaviour of new built up environments : A scoping study of the urban heat island in Bahrain ». In : *Landscape and Urban Planning* 113 (1<sup>er</sup> mai 2013), p. 47-61. ISSN : 0169-2046. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2013.01.013. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204613000200> (visité le 24/03/2020).
- [112] Hassan RADHI, Essam ASSEM et Stephen SHARPLES. « On the colours and properties of building surface materials to mitigate urban heat islands in highly productive solar regions ». In : *Building and Environment* 72 (1<sup>er</sup> fév. 2014), p. 162-172. ISSN : 0360-1323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2013.11.005. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003193> (visité le 24/03/2020).
- [113] Marie-Hélène AZAM et al. « A new urban soil model for SOLENE-microclimat : Review, sensitivity analysis and validation on a car park ». In : *Urban Climate* (nov. 2017). ISSN : 22120955. DOI : 10.1016/j.uclim.2017.08.010. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095517300743> (visité le 16/11/2017).
- [114] Gregory WARD. « Measuring and Modeling Anisotropic Reflection ». In : (2 juil. 1992), p. 265-272. URL : <https://cseweb.ucsd.edu/~ravir/6998/papers/p265-ward.pdf> (visité le 10/08/2020).
- [115] Christoph F. REINHART et Marilyne ANDERSEN. « Development and validation of a Radiance model for a translucent panel ». In : *Energy and Buildings*. Special Issue on Daylighting Buildings 38.7 (1<sup>er</sup> juil. 2006), p. 890-904. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.2006.03.006. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000703> (visité le 25/03/2020).
- [116] Gabriele LOBACCARO et Francesco FRONTINIB. « Solar Energy in Urban Environment : How Urban Densification Affects Existing Buildings | Elsevier Enhanced Reader ». In : (2014). DOI : 10.1016/j.egypro.2014.02.176. URL : <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S187661021400438X?token=063B4BF097B17D5841BBB5C7B1BF752753E525C5FFC50644B9427B369BE0D6AB96E3A81C3351556CA986> (visité le 22/08/2019).
- [117] Thibaut VERMEULEN. « Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire ». Thèse de doct. Compiègne : Université de technologie de Compiègne, 8 oct. 2014.
- [118] Vincent GUIHENEUF. « Approche multi-physique du vieillissement des matériaux pour application photovoltaïque ». Publisher : Unpublished. Thèse de doct. 2017. URL : <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26396.80002> (visité le 27/03/2020).
- [119] Christian A. GUEYMARD. « The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models ». In : *Solar Energy* 76.4 (1<sup>er</sup> avr. 2004), p. 423-453. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2003.08.039. URL :

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003967>  
(visité le 27/03/2020).
- [120] Christelle RIGOLLIER, Olivier BAUER et Lucien WALD. « On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method ». In : *Solar energy* 68.1 (2000), p. 33-48.
- [121] KASTEN et al. « Revised optical air mass tables and approximation formula. » In : 28.22 (1989), p. 4735-4738.
- [122] S. FREITAS et al. « Modelling solar potential in the urban environment : State-of-the-art review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (jan. 2015), p. 915-931. ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.08.060. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114007461> (visité le 08/01/2019).
- [123] K. N. SHUKLA, Saroj RANGNEKAR et K. SUDHAKAR. « Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface : A case study for Bhopal, India ». In : *Energy Reports* 1 (1<sup>er</sup> nov. 2015), p. 96-103. ISSN : 2352-4847. DOI : 10.1016/j.egy.2015.03.003. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000177> (visité le 11/08/2020).
- [124] P.R. TREGENZA. « Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements ». In : *Lighting Research & Technology* 19.1 (mar. 1987), p. 13-14. ISSN : 0024-3426. DOI : 10.1177/096032718701900103. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/096032718701900103> (visité le 14/04/2020).
- [125] Stanislav DARULA et Richard KITTLER. « CIE GENERAL SKY STANDARD DEFINING LUMINANCE DISTRIBUTIONS ». In : (2002), p. 9.
- [126] Miguel de SIMÓN-MARTÍN, Cristina ALONSO-TRISTÁN et Montserrat Díez-MEDIAVILLA. « Diffuse solar irradiance estimation on building's façades : Review, classification and benchmarking of 30 models under all sky conditions ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (sept. 2017), p. 783-802. ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2017.04.034. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117305312> (visité le 16/11/2017).
- [127] A.G. IMENES et J. KANTERS. « 3D solar maps for the evaluation of building integrated photovoltaics in future city districts : A norwegian case study ». In : Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. T. 2016-November. 2016, p. 3141-3146. DOI : 10.1109/PVSC.2016.7750245.
- [128] Christoph WAIBEL, Ralph EVINS et Jan CARMELIET. « Efficient time-resolved 3D solar potential modelling ». In : *Solar Energy* 158 (déc. 2017), p. 960-976. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/j.solener.2017.10.054. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X17309349> (visité le 15/01/2019).

- [129] Núria SÁNCHEZ-PANTOJA, Rosario VIDAL et M. Carmen PASTOR. « Aesthetic impact of solar energy systems ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98 (déc. 2018), p. 227-238. ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2018.09.021. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118306695> (visité le 08/01/2019).
- [130] Núria SÁNCHEZ-PANTOJA, Rosario VIDAL et M. Carmen PASTOR. « Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture ». In : *Sustainable Cities and Society* 39 (mai 2018), p. 203-214. ISSN : 22106707. DOI : 10.1016/j.scs.2018.02.027. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670717307035> (visité le 31/08/2018).
- [131] Feiyue MAO, Wei GONG et Jun LI. « Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar ». In : *Optics & Laser Technology* 44.4 (1<sup>er</sup> juin 2012), p. 907-912. ISSN : 0030-3992. DOI : 10.1016/j.optlastec.2011.10.024. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399211003458> (visité le 31/07/2020).
- [132] Y. SASANO et al. « Geometrical form factor in the laser radar equation : an experimental determination ». In : *Appl. Opt., AO* 18.23 (1<sup>er</sup> déc. 1979). Publisher : Optical Society of America, p. 3908-3910. ISSN : 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.18.003908. URL : <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-18-23-3908> (visité le 31/07/2020).
- [133] Eduardo FERNÁNDEZ et Gonzalo BESUIEVSKY. « A sample-based method for computing the radiosity inverse matrix ». In : *Computers & Graphics* 41 (juin 2014), p. 1-12. ISSN : 00978493. DOI : 10.1016/j.cag.2014.02.001. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0097849314000259> (visité le 24/08/2018).
- [134] Christophe GEUZAINÉ et Jean-François REMACLE. « Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. » In : *Int. J. Numer. Meth. Engng.* (2009). ISSN : 00295981.
- [135] Tomas MOLLER et Ben TRUMBORE. « Fast, Minimum Storage Ray/Triangle Intersection ». In : (), p. 7.
- [136] Francis MIGUET. « Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain. » Thèse de doct. University of Nantes, France, 2000.
- [137] M LEFÈVRE, M ALBUISSON et L WALD. « DESCRIPTION OF THE SOFTWARE HELIOSAT-II ». In : (2002), p. 43.
- [138] Gabriel PEYRÉ. « Résolution numérique d'équations intégrales : Exemple de la radiosité ». 2001. URL : <https://www.lpsm.paris/pageperso/nourdin/LeSiteDeLAgreatif/radiosite.pdf> (visité le 13/08/2018).
- [139] Jean Claude LEHL. « Etudes sur le lancer de rayons spectral ». In : (2000), p. 169.

- [140] Jean-Marc HASENFRATZ et Djamchid GHAZANFARPOUR. « Rendering CSG scenes with general antialiasing ». In : (1996), p. 16.
- [141] Gilles CADET. « Accélération de la requête d'intersection par la réorganisation des Rayons ». In : (2008), p. 208.
- [142] Hanan SAMET. « Implementing ray tracing with octrees and neighbor finding ». In : *Computers & Graphics* 13.4 (jan. 1989), p. 445-460. ISSN : 00978493. DOI : 10.1016/0097-8493(89)90006-X. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/009784938990006X> (visité le 09/11/2018).
- [143] David JOSEPH et al. « Calcul des flux solaires pour le Bâtiment par méthode de Ray-Tracing ». In : (2011), p. 6.
- [144] Blaise RAYBAUD et al. « Preliminary Numerical Evaluation of the BIPV's Potential in Urban Areas : Which Method to Use for Solar Radiation Calculation ? » In : (2019), p. 8.
- [145] Christian SIEGL et al. « Solving aliasing from shading with selective shader supersampling ». In : *Computers & Graphics* 37.8 (1<sup>er</sup> déc. 2013), p. 955-962. ISSN : 0097-8493. DOI : 10.1016/j.cag.2013.08.002. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849313001271> (visité le 19/06/2020).
- [146] Bui Tuong PHONG. « Illumination for computer generated pictures ». In : *Communications of the ACM* 18.6 (1<sup>er</sup> juin 1975), p. 311-317. ISSN : 00010782. DOI : 10.1145/360825.360839. URL : <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=360825.360839> (visité le 14/10/2019).
- [147] Eric P. F. LAFORTUNE et Yves WILEMS. « Using the modified Phong reflectance model for Physically based rendering ». In : (nov. 1994), p. 19. URL : [http://mathinfo.univ-reims.fr/IMG/pdf/Using\\_the\\_modified\\_Phong\\_reflectance\\_model\\_for\\_Physically\\_based\\_rendering\\_-\\_Lafortune.pdf](http://mathinfo.univ-reims.fr/IMG/pdf/Using_the_modified_Phong_reflectance_model_for_Physically_based_rendering_-_Lafortune.pdf) (visité le 05/11/2019).
- [148] James F BLINN. « Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures ». In : (22 juil. 1977), p. 7.
- [149] Jannik Boll NIELSEN. « On Practical Sampling of Bidirectional Reflectance ». In : (2016), p. 163.
- [150] Robert L COOK. « A Reflectance Model for Computer Graphics ». In : *ACM Transactions on Graphics* 1.1 (jan. 1982), p. 18.
- [151] Heqi LU. « Importance Sampling of Realistic Light Sources ». Thèse de doct. Université de Bordeaux, 2015.
- [152] Spectral Sciences INCORPORATE. *MODTRAN*®. MODTRAN. 8 fév. 2019. URL : <http://modtran.spectral.com/> (visité le 08/02/2019).
- [153] Emmanuel BOZONNET. « Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-Cas de la rue canyon ». Thèse de doct. Université de la Rochelle, 2005.

- [154] *FieldSpec ASD / Spectroradiomètres portables sur le terrain / Malvern Panalytical*. URL : <https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/product-range/asd-range/fieldspec-range> (visité le 01/10/2020).
- [155] Peter A van NIJNATTEN, Jurgen de WOLF et Ivo SCHOOF. « Automated Reflectance / Transmittance Analyzer for Variable Angle Spectrometry ». In : (), p. 4.
- [156] PERKINELMER. « Applications and Use of Integrating Spheres With the LAMBDA 650 and 850 UV/Vis and LAMBDA 950 UV/Vis/NIR Spectrophotometers ». In : *Application note*. [https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74191APP\\_LAMBDA650IntegratingSpheres.pdf](https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74191APP_LAMBDA650IntegratingSpheres.pdf) (2004), p. 6.
- [157] Yujie WU, Jérôme H. KÄMPF et Jean-Louis SCARTEZZINI. « Performance assessment of the BTDF data compression based on wavelet transforms in daylighting simulation ». In : *Solar Energy* 190 (15 sept. 2019), p. 329-336. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2019.07.096. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19307686> (visité le 03/02/2020).
- [158] Min YANG et al. « A modified version of BRDF model based on Kubelka-Munk theory for coating materials ». In : *Optik* 193 (1<sup>er</sup> sept. 2019), p. 162982. ISSN : 0030-4026. DOI : 10.1016/j.ijleo.2019.162982. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402619308599> (visité le 29/01/2020).
- [159] R. GUERRERO-LEMUS et al. « Bifacial solar photovoltaics – A technology review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (juil. 2016), p. 1533-1549. ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2016.03.041. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116002768> (visité le 19/02/2020).
- [160] Mohammed AYOUB. « A review on light transport algorithms and simulation tools to model daylighting inside buildings ». In : *Solar Energy* 198 (1<sup>er</sup> mar. 2020), p. 623-642. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2020.02.018. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20301250> (visité le 18/02/2020).
- [161] Eleanor S. LEE, David GEISLER-MORODER et Gregory WARD. « Modeling the direct sun component in buildings using matrix algebraic approaches : Methods and validation ». In : *Solar Energy* 160 (15 jan. 2018), p. 380-395. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2017.12.029. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17311118> (visité le 18/02/2020).
- [162] Lu CHEN et al. « Modeling and simulating the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by oil emulsion ». In : *Optik* 140 (1<sup>er</sup> juil. 2017), p. 878-886. ISSN : 0030-4026. DOI : 10.1016/j.ijleo.2017.05.022. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617305454> (visité le 18/02/2020).

- [163] Charly COLLIN et al. « Discrete ordinate method for polarized light transport solution and subsurface BRDF computation ». In : *Computers & Graphics* 45 (1<sup>er</sup> déc. 2014), p. 17-27. ISSN : 0097-8493. DOI : 10.1016/j.cag.2014.09.002. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009784931400082X> (visité le 03/02/2020).
- [164] Donghai XIE et al. « Polarized reflectances of urban areas : Analysis and models ». In : *Remote Sensing of Environment* 193 (1<sup>er</sup> mai 2017), p. 29-37. ISSN : 0034-4257. DOI : 10.1016/j.rse.2017.02.026. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717300858> (visité le 22/01/2020).
- [165] Mikhail LANGOVOY et Gerd WUBBELER. « Empirical BRDF models for standard reference materials ». In : (nov. 2013), p. 9.
- [166] Eric P. F. LAFORTUNE et al. « Non-linear approximation of reflectance functions ». In : *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '97*. the 24th annual conference. Not Known : ACM Press, 1997, p. 117-126. ISBN : 978-0-89791-896-1. DOI : 10.1145/258734.258801. URL : <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=258734.258801> (visité le 31/10/2019).
- [167] K. E. TORRANCE et E. M. SPARROW. « Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces\* ». In : *Journal of the Optical Society of America* 57.9 (1<sup>er</sup> sept. 1967), p. 1105. ISSN : 0030-3941. DOI : 10.1364/JOSA.57.001105. URL : <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-57-9-1105> (visité le 18/02/2020).
- [168] M. M. BAGHER, C. SOLER et N. HOLZSCHUCH. « Accurate fitting of measured reflectances using a Shifted Gamma micro-facet distribution ». In : *Computer Graphics Forum* 31.4 (juin 2012), p. 1509-1518. ISSN : 01677055. DOI : 10.1111/j.1467-8659.2012.03147.x. URL : <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8659.2012.03147.x> (visité le 31/10/2019).
- [169] Csaba KELEMEN et László SZIRMAY-KALOS. « A Microfacet Based Coupled Specular-Matte BRDF Model with Importance Sampling ». In : 2001. DOI : 10.2312/egs.20011003.
- [170] Rosana MONTES et Carlos UREÑA. « An Overview of BRDF Models ». In : (2012), p. 26.
- [171] Weichao SHI et al. « Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) on cutting surface based on the coaxial optical microscopic imaging ». In : *Optik* 170 (1<sup>er</sup> oct. 2018), p. 278-286. ISSN : 0030-4026. DOI : 10.1016/j.ijleo.2018.04.111. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618306053> (visité le 20/02/2020).

- [172] Hitendra KUMAR, J. RAMKUMAR et K. S. VENKATESH. « Surface texture evaluation using 3D reconstruction from images by parametric anisotropic BRDF ». In : *Measurement* 125 (1<sup>er</sup> sept. 2018), p. 612-633. ISSN : 0263-2241. DOI : 10.1016/j.measurement.2018.04.090. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118303725> (visité le 19/02/2020).
- [173] James. S. BARROWMAN. « The practical calculation of the aerodynamic characteristics of slenders finned vehicles. » In : (mar. 1967).
- [174] Haklim CHOI et al. « The Influence of Atmospheric Composition on Polarization in the GEMS Spectral Region ». In : *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* (18 août 2020), p. 1-1-17. ISSN : 1976-7633. DOI : 10.1007/s13143-020-00218-x. URL : <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssjs&AN=edssjs.DFC0655D&site=eds-live> (visité le 02/10/2020).
- [175] Alessandro MEI et al. « Spectroradiometric Laboratory Measures on Asphalt Concrete : Preliminary Results ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. SIIV-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures 2012 53 (3 oct. 2012), p. 514-523. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.09.902. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812043649> (visité le 25/05/2020).
- [176] *LI-200R Pyranometer | 2420 Light Sensor Amplifier*. URL : <https://www.licor.com/env/support/LI-200R/topics/200R-2420-amplifier.html> (visité le 21/04/2020).
- [177] JCGM. *Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. 2008. URL : [https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_F.pdf](https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_F.pdf) (visité le 08/05/2020).
- [178] Maria Beatriz PIDERIT, Coralie CAUWERTS et Muriel DIAZ. « Definition of the CIE standard skies and application of high dynamic range imaging technique to characterize the spatial distribution of daylight in Chile ». In : *Revista de la construcción* 13.2 (août 2014), p. 22-30. ISSN : 0718-915X. DOI : 10.4067/S0718-915X2014000200003. URL : [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2014000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2014000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=en) (visité le 29/07/2020).
- [179] *Optical Glass N-BK7 Optical Material*. URL : <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/optical-glass-n-bk7-and-others> (visité le 25/09/2020).



## FOLIO ADMINISTRATIF

### THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : RAYBAUD

DATE de SOUTENANCE : 04/12/2020

Prénoms : Blaise, René, Henri

TITRE : Évaluation de l'impact des propriétés optiques large-bande de l'environnement sur la distribution énergétique en milieu urbain.

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2020LYSEI126

Ecole doctorale : MEGA ED162

Spécialité : Thermique - Énergétique

RESUME : La performance d'un module photovoltaïque est conditionnée par l'environnement dans lequel il est installé. En effet, la quantité d'énergie solaire convertie en électricité dépend de l'irradiance incidente sur le module. Les progrès dans l'intégration des modules photovoltaïques sur bâtiment et la diminution de leurs coûts amènent à considérer le potentiel solaire en milieu urbain, en toiture mais aussi en façade. En milieu urbain, la densité des bâtiments limite les apports solaires en façade par la présence de masques. La volonté publique encourage une augmentation de la production locale d'énergies renouvelables. Il est alors nécessaire de se doter d'outils numériques permettant d'évaluer avec précision le potentiel solaire en ville, et ainsi évaluer la rentabilité d'installations photovoltaïques. Il s'agit en particulier d'évaluer les apports solaires issus des réflexions sur les différentes surfaces composant la scène urbaine. Les problématiques d'intégration visuelle, soulevant la question des couleurs et des spectres incident sur les surfaces dans différentes gammes de longueurs d'ondes doivent également être considérées. Enfin, ces outils doivent également permettre d'évaluer l'impact d'une intégration photovoltaïque en milieu urbain afin d'éviter de renforcer les phénomènes d'îlot de chaleur. Les travaux de thèse se sont donc focalisés sur les méthodes de simulation d'ensoleillement en milieu urbain, au travers du développement de deux stratégies de modélisation (radiosité et lancer de rayons). Les modèles de simulation sont comparés sous des hypothèses de réflexions optiques équivalentes, permettant une validation des hypothèses utilisées dans chacune des méthodes. Parallèlement, une qualification des propriétés optiques de matériaux typiques de l'environnement urbain permet la construction de modèles de réflexion optiques basés sur les distributions de réflectivité bidirectionnelles (BRDF en anglais). Ces modèles, injectés dans les modèles d'irradiance, permettent d'évaluer la part d'énergie issue des différents modes de réflexion. Par ailleurs, des mesures d'irradiance sont réalisées en milieu extérieur. Un banc de test est conçu de sorte à mesurer les irradiances perçues en façade et au sol. Différentes configurations sont testées dans via cette maquette. Les mesures obtenues sont alors confrontées aux résultats numériques sous conditions réelles, permettant une validation des modèles.

MOTS-CLÉS : BIPV, Irradiances, Potentiel solaire, BRDF, Mesure solaire



RESUME : The performance of a photovoltaic module is conditioned by the environment in which it is installed. Indeed, the amount of solar energy converted into electricity depends on the incident irradiance on the module. In an urban environment, the density of buildings limits solar gain on the facade by the presence of masks. Progress in the integration of photovoltaic modules and the reduction of their costs leads us to consider the solar potential in urban areas, both on roofs and facades. Some institutes public are encouraging an increase in the production of renewable and local energy. In order to respond to these political wishes, it is therefore necessary to acquire digital tools to accurately assess the solar potential in towns and cities, and thus evaluate the profitability of photovoltaic installations. In particular, it is necessary to evaluate the solar contributions resulting from reflections on the various surfaces that make up the urban scene. Visual integration issues, raising the question of the incident spectra on surfaces in different wavelength ranges must also be considered. Finally, these tools must also make it possible to assess the impact of massive photovoltaic integration in urban environments in order to avoid reinforcing urban heat island phenomena. The thesis work is therefore focused on methods for simulating sunshine in an urban environment, through the development of two modelling strategies (radiosity and ray throwing). The simulation models are compared under equivalent optical reflections hypotheses, allowing a validation of the hypotheses used in each of the methods. At the same time, a qualification of the optical properties of typical materials from the urban environment allows the construction of optical reflection models based on Bidirectional Reflectance Distribution Functions (BRDF). These reflection models are integrated into the irradiance models. Therefore, it becomes possible to evaluate the share of energy resulting from the different modes of reflection. In addition, irradiance measurements are carried out in an external environment. Finally, a test bench is designed to measure the irradiances perceived on the facade and on the ground. Different configurations are tested in this model. The measurements obtained are then compared with the numerical results under real conditions, enabling the models to be validated.

KEY WORDS : BIPV, Irradiances, Solar Potential, BRDF, Solar measurements

Laboratoire (s) de recherche : CETHIL / CEA-INES

Directeur de thèse: Jean-Jacques ROUX

Président de jury : Monika WOLOSZYN

Composition du jury : Jean-Christophe BATSAL, Marjorie MUSY, Monika WOLOSZYN, Valérick CASSAGNE, Philippe THONY, Etienne VERGNAULT, Jean-Jacques ROUX

