



HAL
open science

Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains

Manolis Patriarche

► **To cite this version:**

Manolis Patriarche. Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains. Sciences de l'environnement. ENTPE, 2014. Français. NNT: . tel-01088928v1

HAL Id: tel-01088928

<https://hal.science/tel-01088928v1>

Submitted on 29 Nov 2014 (v1), last revised 3 Oct 2017 (v2)

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Thèse

Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains

Présentée devant
L'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Pour obtenir
Le grade de docteur

Formation doctorale :
École doctorale : MEGA de Lyon

Par
Manolis PATRIARCHE

Soutenue le 8 septembre 2014 devant la commission d'examen

Jury

| | | |
|------------------------|---|--------------------|
| M. Dumortier Dominique | HDR, ENTPE | Directeur de thèse |
| M. Beckers Benoit | HDR, Université de Technologie de Compiègne | Rapporteur |
| M. Ineichen Pierre | Professeur, Université de Genève | Rapporteur |
| M. Blanc Philippe | Docteur, MINES ParisTech | Examineur |
| M. Deleuil Jean-Michel | Professeur, INSA de Lyon | Examineur |
| M. Toussaint Jean-Yves | Professeur, INSA de Lyon | Examineur |

Laboratoire de recherche : LGCB

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Dominique Dumortier pour m'avoir accompagné et soutenu durant mes années de découverte du monde de la recherche. Sa méthode et son regard sur mon travail représentent un pilier de mon apprentissage. Sa sérénité, sa bienveillance et sa bonne humeur, qualités humaines bien connues de tous ceux qui le côtoient, ont aussi contribué à faire de moi un doctorant très chanceux.

Je remercie les rapporteurs Benoit Beckers et Pierre Ineichen qui ont accepté de lire et critiquer mon mémoire, leur expertise et leur qualité de chercheur est un atout qui donne du crédit à mon travail. Au même titre, je remercie les membres du jury qui se sont rendus disponibles pour évaluer les différents aspects de cette thèse.

Je remercie Xavier Daval, PDG de kiloWattsol, la société qui a financé la thèse. Travailler avec lui a été très enrichissant tant sur le plan professionnel que personnel.

Je remercie les développeurs des logiciels que j'ai utilisé, lesquels m'ont aidé à en comprendre le fonctionnement : Christoph Reinhart pour Daysim, Luc Masset pour Heliodon, Jérôme Kaempf pour Citysim. J'accorde une mention spéciale aux deux derniers qui ont pris du temps pour ajouter quelques fonctionnalités à leur programme afin de me permettre de produire des résultats utilisables dans mon travail.

J'attribue un premier remerciement matériel aux bouchons d'oreilles qui m'ont apporté des heures d'isolement acoustique salutaires face au tout puissant bruit ambiant qui règne dans l'open space du laboratoire. Un second pour les différents langages de programmation et outils qui m'ont permis de manipuler mes données et produire mes résultats, notamment Java sous Eclipse avec plus de 18000 lignes de code réparties dans 127 classes. Un dernier à mon vélo avec qui j'ai passé des centaines d'heures à traverser la ville de Lyon et qui a toujours su trouver les mots pour me motiver à aller au laboratoire le matin mais aussi à rentrer chez moi le soir.

Je salue la sympathie du personnel du laboratoire qui a su apporter un regard neuf sur ma méthode, débloquent des problèmes et maintenir une ambiance conviviale, notamment Philippe, Céline et Riccardo.

Enfin, je dédicace cette thèse à mes parents, pour m'avoir donné les moyens de suivre des études qu'ils n'ont pas eu la chance de pouvoir poursuivre, et qui m'ont enseigné à travers leur parcours l'intégrité et la persévérance.

Résumé

L'augmentation de la population mondiale et l'urbanisation croissante conduisent à une densification urbaine qui menace l'accès des habitants des villes au soleil et à la lumière naturelle. Cet accès est lié à des problématiques de consommation d'énergie, de santé et de bien-être ; il peut être limité par plusieurs caractéristiques du tissu urbain telles que la largeur des rues, la hauteur des bâtiments, la clarté des façades et de la chaussée. Nous avons étudié l'influence des caractéristiques les plus importantes d'un canyon urbain sur la disponibilité de la lumière naturelle à l'intérieur du canyon sous des conditions climatiques réelles.

Nous avons fabriqué dans ce but, le modèle réduit d'un canyon urbain, la représentation simplifiée d'une rue. Cette maquette est modifiable, le rapport d'aspect H/W (Hauteur/Largeur) du canyon peut être modifié et les façades sont interchangeable. Durant une année, les éclairagements lumineux y ont été mesurés sur le sol et à plusieurs hauteurs des façades, au pas de la minute, sous des conditions de ciel réelles. Au total, 12 configurations sont représentées dans la base de données obtenue, avec 3 rapports d'aspect : $H/W=0,5$, 1 et 2, et 4 types de façades de facteur de réflexion lumineux différent. Les revêtements de façade utilisés sont : noir, blanc, crépi et crépi avec des parties vitrées. Nous étudions l'influence de ces paramètres en fonction des types de ciel définis par la CIE pour un canyon orienté nord/sud.

Nous utilisons aussi ces données pour étudier l'usage, la performance et la précision de trois logiciels de modélisation du rayonnement solaire en milieu urbain : Citysim, Daysim et Heliodon. Ces trois logiciels offrant différents niveaux de simplification.

Enfin, nous avons mené une campagne de mesure dans les rues de Lyon. Cela nous a permis de nous confronter à la réalité des données de terrain, juger des difficultés à les recueillir et à modéliser le rayonnement solaire dans l'espace réel. Nous avons aussi évalué une nouvelle méthode de mesure des éclairagements lumineux d'une façade. Cette méthode se base sur des cartes de luminances obtenues à partir de photos fisheye avec un appareil photo numérique étalonné en luminances. La comparaison de ces mesures avec celles de la maquette permet d'évaluer l'erreur commise en utilisant un revêtement simplifié.

En utilisant les données récoltées sur la maquette, le rapport d'aspect $H/W=1$ permet d'obtenir le meilleur accès à la lumière naturelle dans le canyon, il correspond à un bon compromis entre la contribution des façades et du ciel. Pour chaque ville, une configuration optimale peut être déterminée en fonction du climat local, qui peut être représenté par la fréquence d'observation des différents types de ciel CIE. Nous avons évalué la capacité des logiciels choisis à prendre en compte le climat. Avec Heliodon, il est possible d'obtenir des éclairagements lumineux proches de ceux mesurés sur la maquette, pour des ciels sans nuages. Puisque le climat varie tout au long de l'année, la prise en compte des 15 types de ciel CIE doit être préférée à l'utilisation d'un ciel uniquement sans nuages, ou couvert comme cela est souvent le cas. Les logiciels Citysim et Daysim sont capables de prendre en compte le climat réel et produisent de bonnes corrélations avec les mesures effectuées sur la maquette pour tous les types de ciel.

Grâce aux mesures dans les rues de Lyon, nous avons pu valider la méthode de calcul des éclairagements lumineux à partir de photos avec un objectif fisheye. Cette méthode pourrait donner des résultats plus précis en disposant d'une carte des facteurs de réflexion de la façade. La complexité du terrain a été mise en évidence, empêchant de faire le lien entre les mesures sur la maquette et dans les rues réelles. L'utilisation de modèles simplifiés de rues dans des simulations peut donc produire des résultats erronés, par exemple, dans les études d'estimation de la consommation énergétique des bâtiments pour l'éclairage à l'échelle d'un quartier ou d'une ville.

Il est nécessaire de réduire la densité des zones urbaines afin d'améliorer l'accès à la lumière naturelle. Cela apporte d'autres avantages comme la réduction de l'exposition à la pollution des véhicules ou la réduction de l'îlot de chaleur urbain. Le calcul d'un rapport d'aspect idéal peut être effectué à l'aide des outils étudiés et de données météo locales.

Mots clefs : lumière naturelle, canyon urbain, modèle réduit, simulations, mesures sur site, facteur de réflexion lumineux

Abstract

Measurement and modelling of daylight in urban canyons

As the world population and the urbanization increase, cities become denser, thus reducing access to daylight and sunlight for city dwellers. This access is linked to some issues such as energy consumption, health and comfort; it can be limited by several urban fabric features such as street width, building height, façade and road coating. We have evaluated the influence of the most important features of an urban canyon regarding daylight availability inside the canyon under real sky conditions.

To that end, we have built a scale model of an urban canyon, the simplest representation of a street. This scale model can be modified: the aspect ratio H/W (Height/Width) can be changed as well as the type of façade. During one year, outdoor illuminances have been measured every minute on the ground and at different heights of the façades. Hence, we created a database containing twelve combinations of an urban canyon with the following parameters: three aspect ratios ($H/W=2, 1$ and 0.5) and four types of façades with different reflection factors. The different coatings of the façades are: black, white, roughcast and roughcast with windows. We evaluate the influence of these parameters for each type of sky defined according to the CIE for a north/south orientated canyon.

We also use this database in order to evaluate the ease of use, performance and precision of three software tools for the estimation of solar radiation in urban context: Citysim, Daysim and Heliodon, each having different simplification levels.

Finally, we have carried a measuring campaign in the streets of the French city of Lyons. This campaign allowed us to realize the difficulty of collecting data in the field and modelling solar radiation of a real street. We have also assessed a new method for measuring illuminances of a whole façade. This method is based on a luminance map generated from a calibrated digital camera equipped with a fisheye lens. A comparison between these illuminances with illuminances measured on the scale model with regular sensors allows us to estimate the bias of using a simplified coating.

Based on illuminances measured on the scale model, a canyon with an aspect ratio $H/W=1$ has a better access to daylight, it represents a good compromise between contributions of the sky and the opposing façade. Every city has an optimal canyon shape according to its local climate that could be defined as the frequency of occurrence of the CIE types of sky. We have evaluated the ability of the selected software tools to take into account the climate. For clear skies, Heliodon is able to produce illuminances close to those measured on the scale model. Because the weather changes throughout the year, one would rather take into account the 15 CIE types of sky instead of using either a clear sky or an overcast sky as many studies do. Citysim and Daysim are able to take into account the climate and correlate well with scale model measurements for each type of sky.

The method for measuring illuminances using a fisheye lens camera has been validated based on the measurements in real streets of Lyons. This method could produce more accurate values using a reflection factor map of the façade. Illuminances measured on

the scale models didn't correlate well with illuminances measured in real streets because of the complexity of the streets compared to the simplicity of the idealized canyon of the scale model. The use of simplified models of streets can lead to bad results, for instance, with studies estimating the energy consumption of buildings for lighting at district or urban scale.

The density of urban areas must decrease in order to improve access to daylight. That would provide other advantages such as the reduction of exposure to vehicles pollution or reduction of the urban heat island. The calculation of an ideal aspect ratio could be achieved using tools evaluated in this thesis.

Key words: daylight, urban canyon, scale model, simulations, on-site measurements, reflection factor.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 15 |
| Partie I - L'énergie solaire pour la ville | 17 |
| I.1. Une solution aux problèmes énergétiques et environnementaux de la ville | 19 |
| I.1.1. Utilisation des énergies renouvelables | 20 |
| I.1.2. Bâtiments à énergie positive BEPOS | 25 |
| I.1.2.1. Qu'est-ce qu'un BEPOS ? | 26 |
| I.1.2.2. Mise en œuvre par l'attribution de labels..... | 27 |
| I.1.3. Écoquartiers | 29 |
| I.1.3.1. Qu'est-ce qu'un écoquartier ? | 30 |
| I.1.3.2. Quelques exemples en France et dans le Monde | 32 |
| I.2. Domaine d'utilisation | 34 |
| I.2.1. L'enveloppe du bâtiment : un collecteur solaire | 34 |
| I.2.2. Le solaire pour l'énergie | 38 |
| I.2.2.1. Solaire thermique..... | 38 |
| I.2.2.2. Photovoltaïque..... | 39 |
| I.2.3. Le solaire pour l'éclairage..... | 43 |
| I.2.3.1. Notions d'éclairagisme..... | 43 |
| I.2.3.2. Dimensionnement des surfaces vitrées | 48 |
| I.3. Études menées sur l'énergie solaire en milieu urbain..... | 50 |
| I.3.1. Études menées à l'échelle de la ville..... | 51 |
| I.3.2. Études menées à l'échelle de la rue..... | 53 |
| I.3.3. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain | 58 |
| I.3.4. Les indicateurs de la géométrie urbaine | 60 |
| I.3.5. Études liées à l'éclairage des bâtiments | 67 |
| I.3.6. Études liées au photovoltaïque | 68 |
| I.3.6.1. Sur les toits..... | 69 |
| I.3.6.2. Sur les façades | 72 |
| I.4. Objectifs et démarche de notre étude | 74 |
| Partie II - Données et outils pour la modélisation des canyons urbains..... | 77 |
| II.1. Données pour décrire la géométrie urbaine | 79 |
| II.1.1. Données LIDAR | 79 |
| II.1.2. Modèles numériques de terrain ou d'élévation | 80 |
| II.1.3. Modèles 3D des villes..... | 84 |
| II.2. Données pour décrire les propriétés des matériaux | 86 |
| II.3. Données pour décrire le rayonnement du soleil et du ciel | 88 |
| II.3.1. Trajectoire du soleil et énergie rayonnée..... | 88 |
| II.3.1.1. Mouvement de la terre autour du soleil | 88 |
| II.3.1.2. Trajectoire locale du soleil..... | 90 |
| II.3.1.3. Heure solaire et heure légale | 92 |
| II.3.1.4. Énergie rayonnée par le soleil | 93 |
| II.3.2. Données sur le rayonnement solaire..... | 95 |
| II.3.2.1. Mesures au sol..... | 96 |
| II.3.2.2. Estimations à partir d'images satellites | 97 |
| II.3.2.3. Bases de données existantes | 99 |
| II.3.2.4. Mesures effectuées à l'ENTPE | 101 |
| II.3.3. Modélisation des luminances du ciel | 103 |
| II.3.3.1. Modèles de luminances du ciel | 104 |
| II.3.4. Classification CIE des ciels..... | 109 |

| | |
|--|------------|
| II.3.4.1. Principes de la classification et ciels types | 109 |
| II.3.4.2. Méthode de détermination des ciels types | 111 |
| II.4. Méthodes de calcul de l'éclairement des bâtiments en milieu urbain..... | 114 |
| II.4.1. Calcul des échanges radiatifs au sein d'un canyon urbain | 114 |
| II.4.1.1. Méthodes de calcul et algorithmes | 114 |
| II.4.1.2. Prise en compte des réflexions spéculaires | 115 |
| II.4.2. Méthodes prenant en compte le climat | 117 |
| II.5. Outils logiciels..... | 124 |
| II.5.1. Les solutions disponibles | 125 |
| II.5.1.1. Des plugins pour SIG..... | 125 |
| II.5.1.2. Des logiciels autonomes..... | 127 |
| II.5.2. Les trois logiciels sélectionnés pour notre étude..... | 129 |
| II.5.2.1. Citysim | 129 |
| II.5.2.2. Daysim..... | 132 |
| II.5.2.3. Heliodon | 134 |
| II.5.2.4. Comparaison des trois logiciels sur deux cas simples | 136 |
| II.5.2.5. Synthèse des fonctionnalités des trois logiciels | 141 |
| Partie III - Mesures effectuées pour notre étude..... | 143 |
| III.1. Mesures sur le terrain..... | 145 |
| III.1.1. Sélection des rues..... | 148 |
| III.1.2. Données mesurées | 150 |
| III.1.3. Protocole de mesure | 153 |
| III.1.4. Caractérisation de la géométrie des rues | 156 |
| III.1.5. Caractérisation des façades | 157 |
| III.1.5.1. Mesure des facteurs de réflexion lumineux | 158 |
| III.1.5.2. Évaluation du taux de vitrage | 160 |
| III.1.6. Détermination du facteur de vue du ciel | 168 |
| III.1.7. Traitements appliqués aux mesures | 173 |
| III.1.7.1. Étalonnage des appareils de mesure..... | 174 |
| III.1.7.2. Production des cartes de luminances des façades..... | 175 |
| III.1.7.3. Calcul des éclairements à partir des luminances | 179 |
| III.1.8. Préparation des simulations Daysim | 179 |
| III.1.8.1. Données de géométrie 3D | 180 |
| III.1.8.2. Description des fichiers d'entrée | 181 |
| III.2. Mesures sur maquette..... | 184 |
| III.2.1. Description de la maquette..... | 184 |
| III.2.1.1. Conception et installation de la structure | 186 |
| III.2.1.2. Erreurs de mesure potentielles liées à la structure | 188 |
| III.2.1.3. Conception des façades interchangeables..... | 192 |
| III.2.1.4. Mesures du facteur de réflexion des façades | 194 |
| III.2.2. Caractérisation des obstructions au rayonnement solaire de la maquette..... | 196 |
| III.2.2.1. À partir de données satellitaires | 196 |
| III.2.2.2. À partir d'une photo avec objectif fisheye | 199 |
| III.2.2.3. Combinaison des deux méthodes | 201 |
| III.2.2.4. Génération d'un fichier 3D des obstructions | 203 |
| III.2.3. Mesure des éclairements lumineux sur la maquette | 204 |
| III.2.3.1. Choix et positionnement des sondes | 204 |
| III.2.3.2. Vérification de la correction en cosinus des sondes | 207 |
| III.2.3.3. Étalonnage des sondes | 211 |
| III.2.3.4. Description du système d'acquisition | 216 |
| III.2.4. Organisation des données et contrôle de qualité..... | 220 |
| III.2.4.1. Description du contrôle de qualité appliqué aux mesures | 221 |
| III.2.4.2. Conditions climatiques couvertes par les mesures | 226 |
| Partie IV - Analyse des mesures et test des logiciels | 229 |

| | |
|--|------------|
| IV.1. Analyse des mesures sur la maquette | 231 |
| IV.1.1. Variation journalière de l'éclairement lumineux par ciel sans nuages..... | 231 |
| IV.1.2. Réception de soleil direct par les sondes | 244 |
| IV.1.2.1. Détermination de la visibilité du soleil par une sonde..... | 244 |
| IV.1.2.2. Fréquences de visibilité du soleil pour chaque sonde..... | 250 |
| IV.1.3. Variation de l'éclairement relatif au sol..... | 255 |
| IV.1.3.1. Analyse des situations sans soleil direct | 256 |
| IV.1.3.2. Analyse des situations avec soleil direct | 260 |
| IV.1.4. Variation de l'éclairement relatif à chaque étage | 263 |
| IV.1.4.1. Analyse des situations sans soleil direct | 263 |
| IV.1.4.2. Analyse des situations avec soleil direct | 278 |
| IV.1.4.3. Importance de la prise en compte du type de ciel | 288 |
| IV.2. Test des logiciels de simulation | 291 |
| IV.2.1. Avec le revêtement noir..... | 292 |
| IV.2.2. Avec le revêtement blanc..... | 295 |
| IV.2.3. Avec le revêtement crépi | 296 |
| IV.2.4. Avec le revêtement crépi vitré | 297 |
| IV.3. Analyse des mesures sur le terrain..... | 300 |
| IV.3.1. Éclairements mesurés avec les sondes photométriques | 300 |
| IV.3.1.1. Rue des Charmettes | 300 |
| IV.3.1.2. Rue Fénelon | 303 |
| IV.3.1.3. Rue Molière | 304 |
| IV.3.1.4. Rue Leynaud | 307 |
| IV.3.1.5. Rue Royale | 308 |
| IV.3.1.6. Corrélation avec les mesures sur la maquette | 310 |
| IV.3.2. Cartes des luminances des façades | 311 |
| IV.3.3. Calcul des éclairagements à partir des cartes de luminances | 313 |
| IV.3.3.1. Exemples de bonnes corrélations avec les sondes..... | 313 |
| IV.3.3.2. Exemples de mauvaises corrélations avec les sondes..... | 316 |
| IV.3.3.3. Restrictions à l'utilisation des cartes de luminances..... | 318 |
| IV.3.3.4. Comparaison des éclairagements relatifs provenant des deux méthodes..... | 319 |
| IV.3.3.5. Conclusion..... | 320 |
| IV.3.4. Comparaison cartes luminances et maquette pour la sonde au sol | 321 |
| IV.3.5. Comparaison entre éclairagements relatifs modélisés et mesurés..... | 322 |
| Conclusion générale..... | 327 |
| Bibliographie | 333 |
| Liste des figures | 346 |
| Liste des tableaux | 355 |
| Annexes..... | 356 |

Nomenclature

| Désignation | Description | Unité |
|-------------|--|-------------------|
| AM | Air Mass (masse d'air optique) | - |
| BDD | Base De Données | - |
| BEPOS | Bâtiment à Énergie Positive | - |
| BIPV | Building Integrated Photovoltaics (système photovoltaïque intégré au bâtiment) | - |
| BRDF | Bidirectional Reflectance Distribution Function (fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle) | - |
| CBDM | Climate Based Daylight Modeling (modélisation de la lumière du jour à partir de données climatiques) | - |
| CIE | Commission Internationale de l'Éclairage | - |
| DC | Daylight Coefficient (coefficient de lumière du jour) | - |
| EED | Éclairement énergétique diffus horizontal | W.m ⁻² |
| EEG | Éclairement énergétique global horizontal | W.m ⁻² |
| EES | Éclairement énergétique direct horizontal | W.m ⁻² |
| EESN | Éclairement énergétique direct normal | W.m ⁻² |
| EESNO | Éclairement énergétique direct normal extraterrestre | W.m ⁻² |
| ENR | Énergies renouvelables | - |
| EQM | Écart Quadratique Moyen | - |
| EVD | Éclairement lumineux diffus horizontal | lux |
| EVG | Éclairement lumineux global horizontal | lux |
| EVS | Éclairement lumineux horizontal | lux |
| EVSNO | Éclairement lumineux direct normal | lux |
| EVSNO | Éclairement lumineux direct normal extraterrestre | lux |
| GES | Gaz à Effet de Serre | - |
| H/W | Rapport d'aspect d'un canyon, hauteur H / largeur W | - |
| HDRI | High Dynamic Range Image (image à grande gamme dynamique) | - |
| HVAC | Heating, Ventilation and Air-Conditioning (Chauffage, ventilation et climatisation) | - |
| IDMP | International Daylight Measurement Programme (Programme international de mesure de la lumière naturelle) | - |
| MNE | Modèle Numérique d'Élévation | - |
| MNT | Modèle Numérique de Terrain | - |
| OMM | Organisation Météorologique Mondiale | - |
| PLU | Plan Local d'Urbanisation | - |
| PTR | Percent True Response | % |
| PV | Photovoltaïque | - |
| SIG | Système d'Information Géographique | - |
| SVF | Sky View Factor (facteur de vue du ciel) | - |
| TRY / TMY | Test Reference Year / Typical Meteorological Year | - |
| UHI | Urban Heat Island (îlot de chaleur urbain) | - |
| WWR | Window to Wall Ratio (taux de vitrage) | - |

Introduction générale

Le taux d'urbanisation mondial étant supérieur à 50% (UN-DESA, 2012), cela signifie qu'une personne sur deux habite en milieu urbain alors que cette surface ne représente que 2% des terres émergées. En France et en Europe, ce taux s'élève déjà à 75%. Ce constat implique de nombreuses questions par rapport à la morphologie des villes existantes. Comment faire face à une future concentration massive de la population sur une surface réduite (67% en 2050) ? Avec des villes qui s'étendent en surface mais croissent aussi verticalement, quels choix garantissent la pérennité des constructions et du niveau de vie au sein d'une agglomération dense ? Comment gérer les ressources nécessaires à la gestion d'un tel ensemble ?

Pour pouvoir s'adapter, et contenir cette population urbaine toujours croissante, deux solutions existent : l'étalement et la densification. Chacune de ces deux approches possède des inconvénients. L'étalement urbain implique par exemple une pollution plus importante causée par les véhicules à moteur car les trajets que les habitants effectuent quotidiennement (travail, loisir, achats...) sont plus longs. Le coût des infrastructures est d'ailleurs plus important pour les villes ayant une plus grande superficie. L'artificialisation des sols est une autre conséquence dramatique de l'étalement urbain : notre milieu naturel est remplacé par des routes et des bâtiments. Cela réduit et perturbe l'écosystème dont l'équilibre est crucial à toute espèce vivante. L'autre solution, la densification, implique aussi des problèmes de pollution. En effet, l'air circule moins bien dans des rues plus étroites, la concentration des gaz d'échappement y est donc plus grande. De plus, la température y est souvent bien plus élevée que dans les campagnes voisines ; cet effet est appelé "îlot de chaleur urbain", il sera décrit dans la première partie de la thèse. Enfin, la vue du ciel et du soleil est plus facilement réduite dans des villes plus denses, l'accès à la lumière naturelle dans les logements et dans les bureaux y est donc menacé. C'est sur ce dernier point que porte notre étude, dont l'organisation est décrite dans les paragraphes suivants.

La première partie traite des problématiques liées à l'accès à la lumière naturelle en milieu urbain. Nous aborderons tout d'abord notre étude sous l'angle de l'exploitation des énergies renouvelables au sein des villes. En présentant les approches existantes qui permettent de tirer partie de l'énergie solaire, nous verrons comment cette ressource peut apporter des éléments de réponse aux contraintes énergétiques et environnementales des villes. Dans un second temps, nous présenterons les principaux domaines d'utilisation du rayonnement solaire pour l'énergie (thermique, photovoltaïque) et pour l'éclairage, qui est lié à la vision humaine et qui se trouve au cœur du sujet de notre étude. Nous finirons ensuite par une étude bibliographique détaillée qui nous permettra d'aborder les méthodes existantes permettant d'évaluer et de tirer partie de la ressource solaire en milieu urbain.

La seconde partie décrit les outils et les méthodes qui permettent d'évaluer l'accès à la lumière naturelle dans une représentation simplifiée d'une rue : le canyon urbain. Nous verrons dans un premier temps qu'il existe des méthodes permettant d'obtenir, à distance, des informations sur la géométrie des villes, ainsi que des bases de données déjà disponibles. De même, nous avons évalué la disponibilité de bases de données contenant des

informations sur le revêtement des façades des bâtiments, ou du moins, sur leur matériau. Puisque nous traitons du gisement solaire, cela implique de connaître la géométrie solaire, mais aussi de mesurer des paramètres climatiques à partir de stations au sol. Nous verrons à cette occasion quel est l'intérêt de connaître la distribution des luminances du ciel. Nous détaillerons les modèles existants, et décrirons une méthode de calcul et de classification des types de ciel. La considération du type de ciel constitue un point original de notre étude. Enfin, nous présenterons les méthodes permettant de caractériser cette ressource en un lieu donné, et les outils logiciels qui permettent d'appréhender le rayonnement solaire en milieu urbain. Trois d'entre eux ont été étudiés plus en détail afin d'évaluer l'influence des différentes méthodes de calcul et niveaux de simplification sur la qualité des données qu'ils produisent.

La troisième partie décrit la mise en place de deux protocoles expérimentaux ayant pour but de mesurer des éclairements lumineux dans des rues de Lyon et sur un modèle réduit de canyon urbain placé à l'extérieur. Il s'agit dans les deux cas de mesures effectuées sous des conditions de ciel réelles. Nous pourrions ainsi présenter des résultats en fonction des distributions types de luminances du ciel. Pour chacun de ces deux protocoles, nous caractériserons l'environnement de mesure, nous décrirons les méthodes de manière détaillée et nous présenterons les méthodes et les résultats de calibration des appareils de mesure et d'acquisition utilisés. Les mesures effectuées sur le terrain nous permettront de vérifier si des outils ou des bases de données en lignes nous permettent d'obtenir des données géométriques ou photométriques sur les rues sans avoir à se déplacer sur site.

La quatrième et dernière partie présentera l'analyse des mesures et des simulations effectuées. Nous commencerons par l'étude des mesures sur la maquette afin d'évaluer l'influence de la géométrie du canyon, du revêtement des façades (notamment la prise en compte des parties vitrées) et du type de ciel sur l'accès à la lumière naturelle au sol et sur les façades des bâtiments. Cette base de données de mesures sera confrontée aux résultats de simulations produits par les trois logiciels sélectionnés, pour les mêmes configurations de maquette. Cela nous permettra d'évaluer la capacité de ces logiciels à produire des éclairements lumineux proches de ceux mesurés sous des conditions de ciel réelles. Les mesures effectuées dans les rues de Lyon seront elles aussi confrontées à celles de la maquette pour vérifier l'écart entre les données obtenues dans un contexte réel par rapport à un contexte idéal. Ce dernier étant généralement utilisé pour tirer des conclusions dans la littérature. Les mesures sur le terrain nous permettront enfin d'évaluer une méthode de mesure d'une carte d'éclairements lumineux sur toute une façade, à partir de photographies réalisées avec un appareil photo numérique étalonné en luminances.

Partie I - L'énergie solaire pour la ville

Cette première partie présente le contexte dans lequel s'inscrit notre étude ainsi que les concepts qui seront utilisés dans la suite du document. Dans le premier chapitre, nous mettrons en évidence les problèmes liés à la consommation et à la production d'énergie en milieu urbain. Cela nous permettra de présenter les solutions existantes permettant d'y répondre : la construction de bâtiments et de quartiers plus respectueux de l'environnement.

Nous définirons dans le second chapitre, le contexte technique autour duquel se déroule l'étude : l'accès à la lumière naturelle sur l'enveloppe des bâtiments. Pour cela, nous présenterons le lien entre l'enveloppe d'un bâtiment et l'énergie solaire, à travers une étude bibliographique. Après une présentation des moyens technologiques existants pour exploiter l'énergie solaire, nous nous focaliserons sur l'éclairagisme. Nous décrirons alors les notions propres à ce domaine d'étude de la lumière naturelle.

Le troisième chapitre poursuit l'étude bibliographique, en s'étendant sur les études menées à l'échelle de la ville ou d'une rue. Ce cadre plus vaste nous permettra de présenter des indicateurs permettant de décrire la géométrie d'une rue de manière simplifiée. L'utilisation de ces indicateurs sera présentée dans des études liées à l'éclairage des bâtiments et à la production d'électricité via des panneaux photovoltaïques, sur les toits et façades des bâtiments.

Nous terminerons cette première partie par une explication de la démarche globale de notre étude afin de pouvoir rentrer dans le détail des travaux effectués.

I.1. Une solution aux problèmes énergétiques et environnementaux de la ville

Le rapport Brundtland (Brundtland, 1987) décrit le développement durable comme "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs". Ce recueil de 75 études à travers le monde intitulé "Notre avenir à tous" identifie les problèmes inhérents à la perpétuelle croissance démographique mondiale. Il propose des solutions pour lutter efficacement contre la destruction de l'écosystème, pour la bonne gestion de l'énergie, de l'industrie, des populations, pour la sécurité alimentaire et pour lutter contre la crise urbaine que représentent les difficultés que rencontrent les collectivités à assumer les implications d'une forte croissance urbaine. Le taux d'urbanisation mondiale est passé de 12% en 1940 à 50% en 2007 (UN-DESA, 2007). À travers le monde, cette explosion de la densité de population urbaine est inégalement répartie. Par exemple, la population urbaine moyenne des villes d'Asie, d'Afrique ou d'Amérique latine a été multipliée par 5 entre 1950 et 2010 (cf. Figure I-1) alors que dans les régions déjà industrialisées en 1950 tels qu'en Europe, Amérique du nord, Australie et Japon la population urbaine a doublé tout au plus.

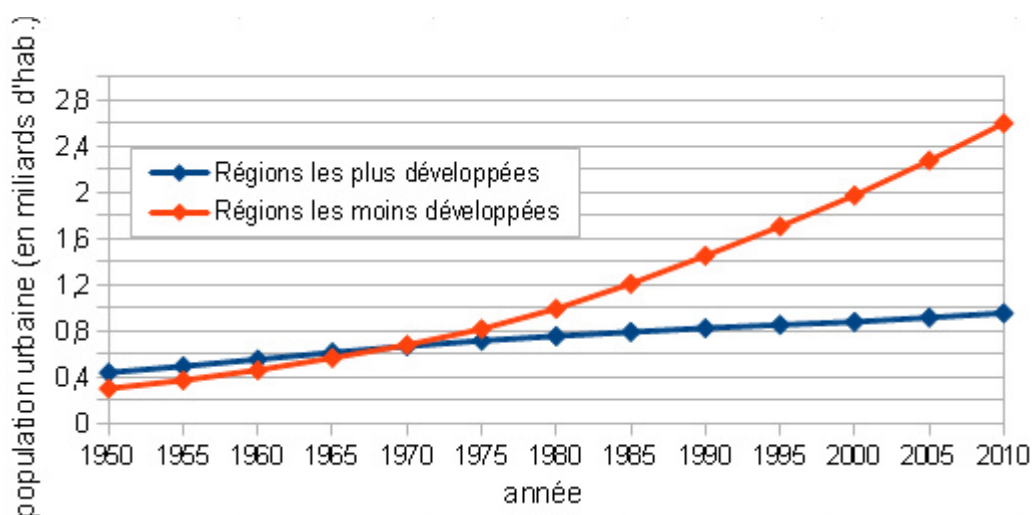


Figure I-1 : Croissance de la population des aires urbaines dans le monde entre 1950 et 2010 (UN-DESA, 2012)

Cette forte croissance a empêché la mise en place d'une infrastructure permettant de gérer une telle population. Les pays en développement souffrent le plus de cette situation. La pollution de l'eau et de l'air dans les villes, entraîne des maladies du système cardio-respiratoire (Dora, Phillips, et Phillips, 2000) qui touchent le plus souvent la population pauvre. Les villes se sont étendues sans considération pour l'environnement. Les pays développés ne sont toutefois pas épargnés. Les logements sociaux construits entre 1950 et 1970 sous forme de grands ensembles devenant vétustes, leurs coûts de maintenance sont élevés pour des habitants dont les ressources financières sont réduites menant ainsi à un état de précarité énergétique. Ces quartiers, qui ne proposent pas d'emploi, sont abandonnés par les jeunes et les personnes instruites, laissant le chômage et la misère. Le traitement des nombreux déchets générés par exemple par la surconsommation ou le suremballage, est

aussi un problème de taille dans les pays industrialisés car les zones où ils sont stockés et brûlés sont contaminées pour de nombreuses années. L'utilisation de véhicules à moteur en grande quantité dans les villes contribue à une mauvaise qualité d'air et donc à l'apparition de maladies directement liées à cette pollution ; Kunzli rapporte ainsi que chaque année en France, 17 600 cas de mortalité seraient liés à l'exposition (à long terme) à la pollution provenant des véhicules à moteur (Kunzli *et al.*, 2000).

Pour répondre à ces problématiques, des engagements ont été pris par 173 pays représentés au sommet de la Terre à Rio en 1992 (Summit, 1992). Cette conférence a initié le mouvement vers le développement durable, les villes sont au cœur des préoccupations environnementales et sociales, car c'est là où la pollution de l'air fait le plus de victimes, où la crise des logements entraîne la pauvreté. En 1994, la première conférence sur le thème des villes durable s'est déroulée à Aalborg au Danemark (Charte d'Aalborg, 1994). La charte qui y a été rédigée reconnaît la responsabilité du mode de vie urbain sur les problèmes environnementaux. Conscients qu'un changement dramatique de comportement doit être fait, les pays signataires se sont engagés à respecter la biodiversité à travers un aménagement durable du territoire, la réduction de la production de gaz à effet de serre et une gestion économique préservant le capital naturel. La mise en application de ces engagements doit être faite en concertation avec les citoyens pour qu'ils deviennent acteurs du changement, en intégrant la notion de justice sociale et en menant des politiques locales de gestion. La charte s'inscrit dans les directives du chapitre 28 de l'Agenda 21, le plan d'action pour le 21^{ème} siècle signé par 173 pays lors du sommet de la Terre de 1992. Les engagements sont renouvelés et précisés à travers les 10 thèmes suivants :

- 1- Gouvernance
- 2- Gestion locale vers la durabilité
- 3- Biens naturels communs
- 4- Consommation responsable et choix de style de vie
- 5- Planification et conception
- 6- Mobilité améliorée, trafic limité
- 7- Actions locales pour la santé
- 8- Economie locale vivante et durable
- 9- Equité sociale et justice
- 10- Du local au global

Dans ce contexte en plein changement se trouvent donc de nombreux points de vigilance rassemblés autour d'axes majeurs. Des stratégies nationales peuvent être élaborées afin d'inverser les tendances pessimistes décrites précédemment. La gestion de l'énergie est l'un de ces axes.

I.1.1. Utilisation des énergies renouvelables

Les aires urbaines sont donc à l'origine de problèmes environnementaux, sociaux et sanitaires. De plus, il s'agit de milieux liés à une forte problématique concernant l'énergie. En effet, la présence d'activités humaines nécessite de disposer d'une grande quantité d'énergie dont la gestion est complexe. L'énergie est l'agent du changement, elle confère à

un système sa capacité à fournir un travail (mécanique), modifier un état (thermodynamique) ou émettre un rayonnement électromagnétique. Le bon fonctionnement d'une civilisation repose sur la gestion de l'énergie. L'homme a tout d'abord pris à la nature la force qu'il n'avait pas, en exploitant les animaux pour le travail agricole, puis a commencé à modifier son environnement, par exemple en construisant des barrages hydroélectriques. La disponibilité de sources d'énergie est cruciale dans le développement de l'humanité. Les problématiques liées à leur gestion sont la mise à disposition (quantité voulue au moment voulu), le stockage, le coût et l'impact de leur production sur l'environnement.

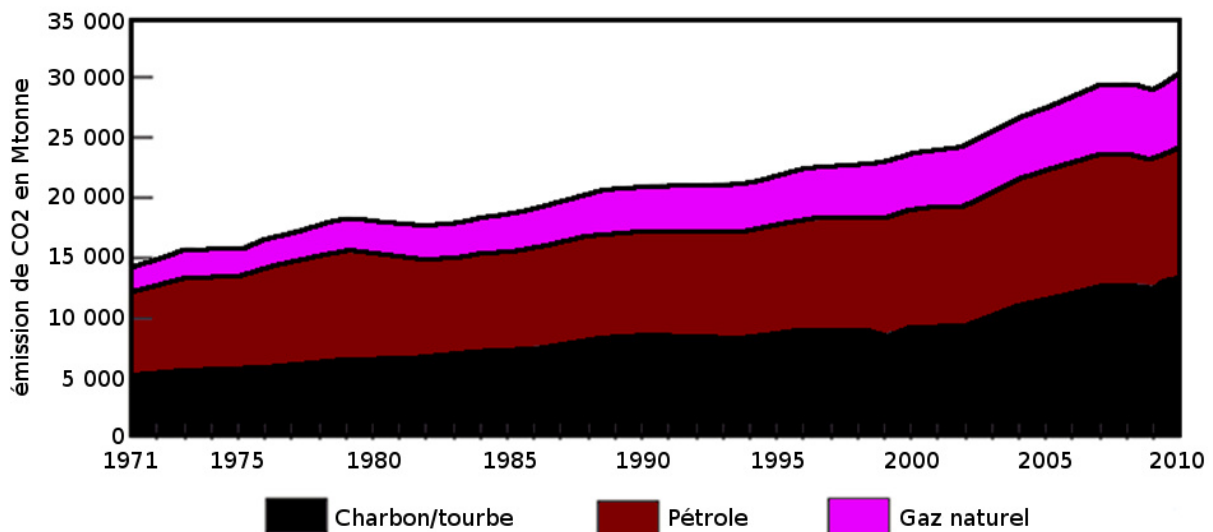


Figure I-2 : Émissions de CO₂ dues à l'exploitation des énergies fossiles (IEA, 2012a)

Les statistiques liées à l'énergie la considèrent sous forme primaire ou finale. L'énergie est dite primaire lorsqu'elle est considérée avant toute transformation ou raffinage, c'est-à-dire sous sa forme naturelle. Par exemple le pétrole et le soleil sont des sources d'énergie primaire. Par opposition, l'énergie finale est obtenue après les pertes de transformation, de production et de transport de l'énergie primaire en une forme utilisable directement comme l'énergie thermique ou électrique. La quantité d'énergie primaire nécessaire pour obtenir de l'énergie finale s'exprime à l'aide d'un coefficient de conversion. Ce coefficient vaut, par exemple, 2,58 pour l'électricité. Cela signifie qu'il faut 2,58 unités d'énergie primaire pour obtenir une unité d'énergie finale sous cette forme. Un coefficient de 1,0 est appliqué pour les autres sources comme le gaz par exemple. Parmi les sources d'énergie primaire, on trouve les combustibles fossiles et les énergies renouvelables (ENR). Les ENR ont la particularité de rejeter une faible quantité, éventuellement nulle, de gaz à effet de serre (principalement méthane et CO₂). Au contraire, les énergies fossiles sont connues pour être à l'origine de pollution de l'environnement durant leur transformation (raffinage du pétrole, extraction des gaz de schiste) ou leur exploitation (usines de charbon, centrales nucléaires). Les ENR se distinguent aussi des énergies fossiles par rapport à la quantité de gisement qui les caractérise. Pour évaluer cela, on distingue des énergies de stock et de flux selon que leur gisement respectif est une réserve épuisable ou non. Les énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'uranium sont des énergies de stock. Les ENR telles

que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse forment les cinq familles d'énergies de flux. La Figure I-2 est extraite du rapport de l'agence internationale de l'énergie sur l'exploitation des énergies dans le monde en 2012 (IEA, 2012a). En 40 ans, la consommation de pétrole et donc la quantité de CO₂ provenant de son utilisation a doublé. Le réchauffement climatique est avéré (GIEC, 2007), de plus, ce rapport du GIEC attribue l'augmentation de la température aux activités humaines. Néanmoins, si l'objectivité de cet organisme et ses méthodes sont contestées, la production de gaz à effet de serre (GES) est bien réelle et son impact sur l'environnement aussi. L'utilisation d'énergies renouvelables s'inscrit comme un moyen de lutter contre la production de GES. Cette dernière a été encouragée par les gouvernements suite au sommet de la Terre à Rio. La Figure I-3 montre l'augmentation de 57% de la production d'énergie renouvelable en Europe entre 1998 et 2008, ainsi que l'année clef 2005 où sa production a dépassé celle du pétrole. Cependant si la production de pétrole a diminué, son importation Européenne a augmenté de 8% pour arriver à 592 millions de tonnes en 2008 (Commission Européenne, 2010).

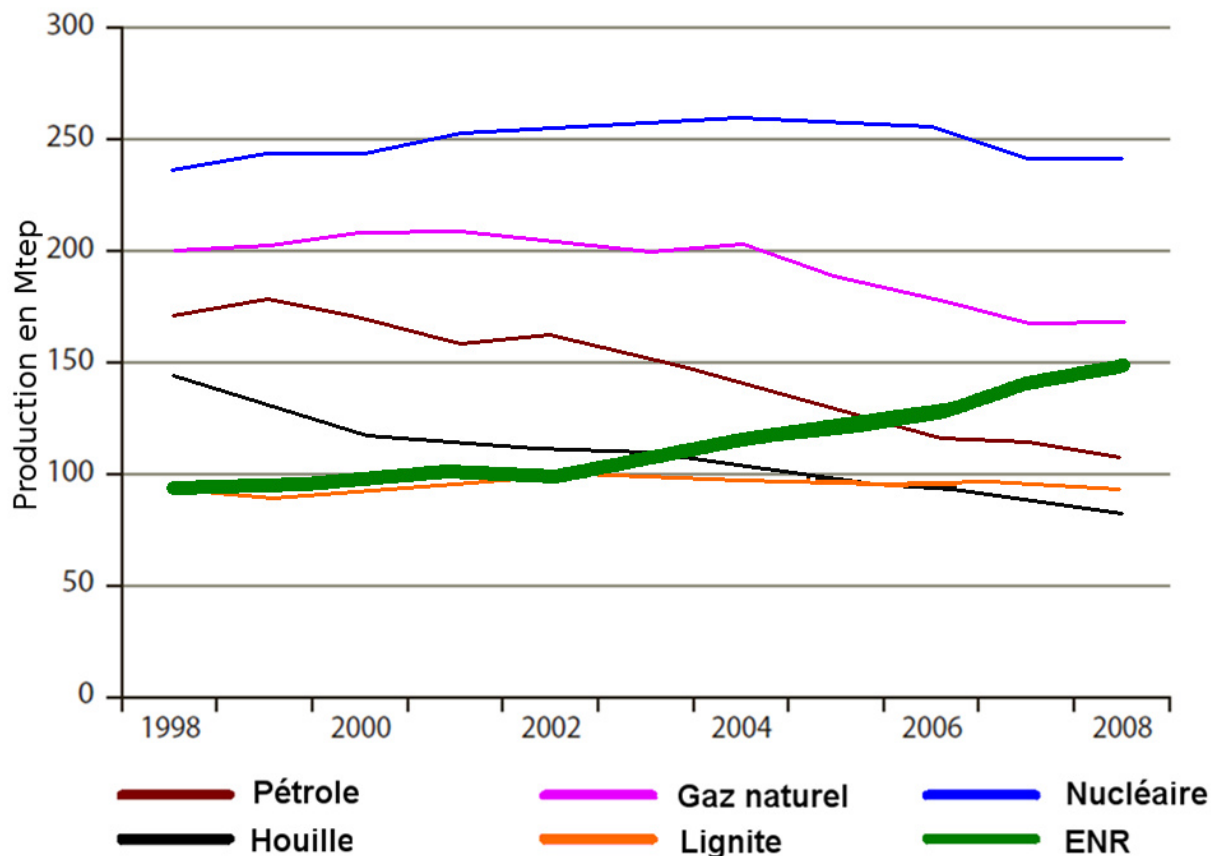


Figure I-3 : Évolution de la production des énergies primaires en Europe (Commission Européenne, 2010)

L'intensité énergétique correspond au rapport entre la consommation d'énergie primaire d'un pays et son PIB, cette donnée permet de mesurer l'efficacité énergétique d'un pays. Plus l'intensité énergétique est élevée, plus le pays "gaspille" de l'énergie. En Europe, l'intensité énergétique a diminué de 17% sur cette même période (de 1998 à 2008) ce qui

indique une meilleure gestion de l'énergie, cependant la consommation d'énergie primaire a tout de même augmenté de 5%. Cette énergie provient donc d'autres pays, ainsi la dépendance énergétique a augmenté de 9 points pour arriver à près de 55%. Ainsi plus de la moitié de l'énergie consommée en Europe en 2008 provient d'autres régions du monde comme par exemple la Russie pour le gaz naturel, la Norvège pour le pétrole ou l'Afrique du sud pour le charbon. Ces indicateurs permettent d'évaluer la place et l'impact des énergies renouvelables en Europe, la Figure I-4 montre par exemple que le bilan est géographiquement mitigé avec en tête la Lettonie (100%), le Portugal (97%) et l'Autriche (73%). Notons cependant que si l'énergie primaire de ces pays provient majoritairement de sources renouvelables, ils importent de l'énergie provenant d'autres sources pour subvenir à leurs besoins. En effet, ils permettent de produire localement l'énergie afin de réduire les dépenses concernant l'importation de l'énergie tout en réduisant les coûts environnementaux.

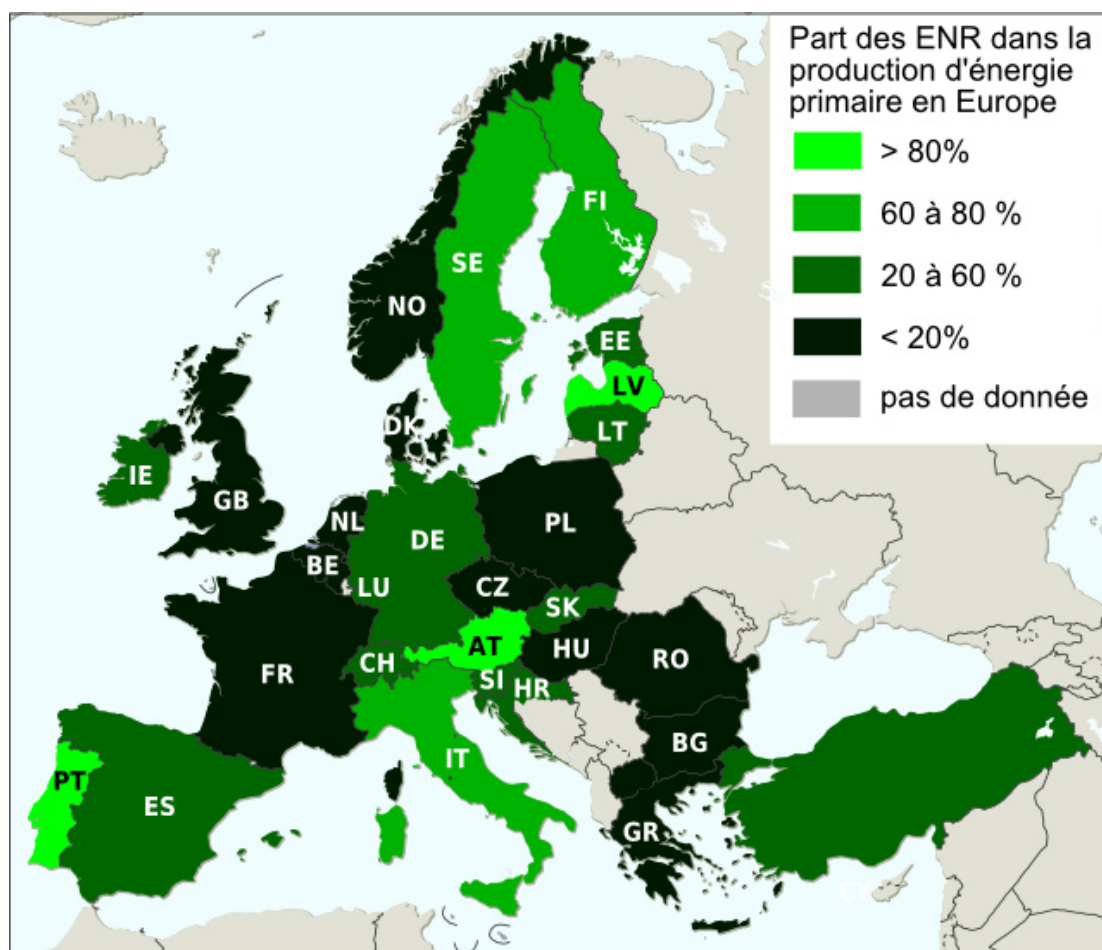


Figure I-4 : Pourcentage d'énergie primaire produite à partir de sources renouvelables, en 2009, en Europe (Commission Européenne, 2010)

Les ENR ont deux enjeux, le premier est géopolitique l'autre est écologique. La raréfaction des gisements pétrolifères rend leur extraction de plus en plus délicate. La catastrophe de la plate-forme BP "Deepwater Horizon" en 2010 en fait le constat, la pollution engendrée par l'extraction des schistes bitumineux en est un autre. En milieu urbain la problématique de la sécurité existe aussi, il n'est pas concevable de construire une centrale nucléaire à proximité

d'une ville à cause des risques industriels majeurs liés à cette source non renouvelable. La plupart des pays du monde reçoivent chaque jour une grande quantité de rayonnement solaire, ils sont soumis à des vents sur tout le territoire et sont innervés par des cours d'eau. Toute cette énergie disponible localement permet de mettre un pays à l'abri de crises graves telles que les chocs pétroliers. Conjointement, le développement d'un savoir-faire national et la génération d'emplois dans ces secteurs sont des arguments de poids en faveur des énergies renouvelables. Il s'agit d'un avantage socio-économique vis à vis de la filière des énergies fossiles dont le taux de recrutement est inférieur. Si la combustion d'hydrocarbures rejette une forte quantité de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables en émettent peu ou pas. Bien que la relation entre réchauffement climatique et effet de serre soit sujette à discussion, il est admis que l'accumulation de GES piège le rayonnement solaire qui aurait autrement été évacué vers l'espace, c'est donc un axe mis en avant pour le développement et l'installation de centrales à énergie "propre". La mise en place de ces centrales doit se faire dans le respect des règles architecturales (Plan Local d'Urbanisation) en milieu rural comme en milieu urbain.

La production mondiale d'électricité renouvelable a atteint 19% en 2009, cependant il existe une grande inégalité entre les différents pays. Les régions post industrialisées affichent une croissance faible de la production d'électricité par habitant, contrairement aux régions en développement telles que l'Afrique du nord et l'Asie du sud. Au niveau international, le protocole de Kyoto signé en 1997, et entré en vigueur en 2005, est un traité ayant pour objectif de réduire les émissions de GES, il a été ratifié par 183 pays en 2010. Parallèlement, le livre blanc "énergie pour l'avenir" publié par la commission européenne en 1997 proposait de réduire les émissions de gaz à effet de serre (-15% par rapport au niveau de 1990) et d'augmenter l'exploitation d'énergies renouvelables (12% de la production) pour l'année 2010. En 2001, la directive 2001/77/CE a fixé un objectif de 21% de contribution des énergies renouvelables, puis en 2006 le parlement européen a émis le souhait d'atteindre 25% de part d'énergies renouvelables dans la consommation globale de l'UE. En 2007, l'Europe a mis en place l'objectif des "3x20" c'est à dire une réduction de 20% des émissions de GES, une augmentation de 20% de l'efficacité énergétique et le passage à 20% de part d'énergie consommée à partir de sources renouvelables pour 2020 (Commission Européenne, 2008). En France, la loi Grenelle 1 promulguée en 2009, prévoit de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre pour 2050 et d'atteindre 23% d'énergies renouvelables afin de s'aligner sur les décisions européennes. Afin de stimuler les secteurs concernés dans le but d'atteindre les objectifs, des moyens financiers ont été mis en œuvre tels que des primes, le crédit d'impôt, le prêt vert ainsi que le rachat de l'électricité mais aussi la formation de professionnels du bâtiment. Par exemple pour l'installation de modules photovoltaïques sur les toits dans le cadre du plan "Face Sud" une loi promulguée en 2005 prévoyant l'installation annuelle de 50 000 toits thermiques-photovoltaïques et 200 000 chauffe-eau solaires en 2010. Cependant en 2006 à peine plus de 50 000 systèmes solaires thermiques (chauffe-eau solaire individuel ou système solaire combiné qui peut être aussi utilisé pour le chauffage) ont été installés et ce chiffre est en baisse d'environ 10% par an en moyenne pour arriver à 33 600 en 2011 (MEDDE, 2012a). Cela peut s'expliquer par le fort engouement pour les installations solaires photovoltaïques, encouragé par le gouvernement avec un tarif de rachat élevé de l'électricité et un crédit d'impôt. Les particuliers ont préféré investir dans la filière PV qui a ainsi fait de l'ombre à la filière solaire thermique.

Le "négawatt" est un concept apportant une nouvelle approche aux problématiques liées à la consommation d'énergie. Il s'agit de se focaliser sur l'énergie qui peut ne pas être consommée à travers différents moyens. Par exemple, en améliorant le rendement des appareils qui en consomment (efficacité énergétique) et en agissant sur le comportement des gens (sobriété énergétique). En milieu urbain, il existe plusieurs pistes pour réduire la consommation d'énergie, telles que l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments, par exemple en améliorant l'isolation thermique, l'exploitation de l'énergie solaire ou l'utilisation de systèmes de chauffage plus efficaces. En effet, la consommation d'énergie en milieu urbain pour les pays à haut revenu est majoritairement imputée au secteur du bâtiment (cf. Figure I-5), cette énergie est utilisée essentiellement pour le chauffage et l'éclairage.

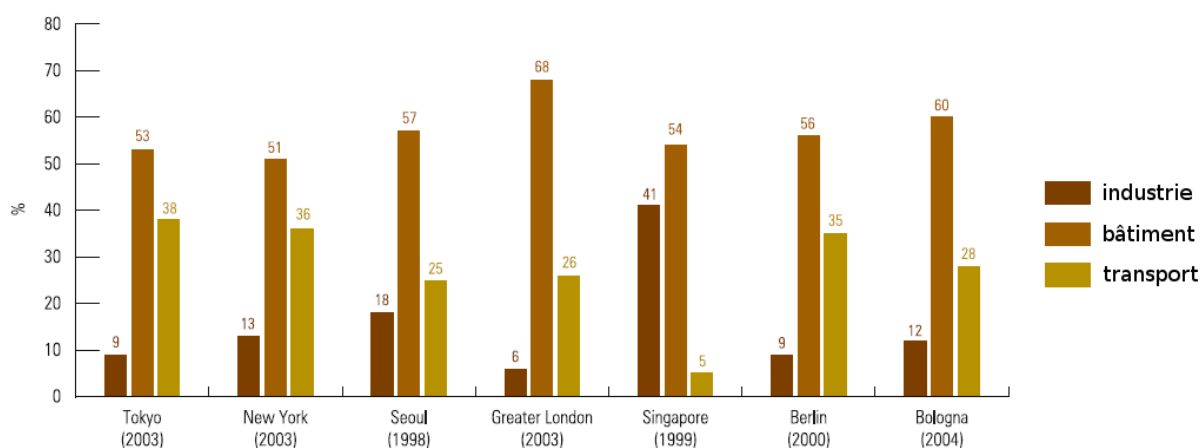


Figure I-5 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur, dans des villes à haut revenu (UN-HABITAT, 2008)

La mise en œuvre conjointe d'un ensemble de méthodes permettant d'améliorer la performance énergétique d'un bâtiment peut même conduire ce dernier à produire plus d'énergie qu'il n'en consomme notamment en exploitant les énergies renouvelables disponibles localement telles que le solaire ou la géothermie, de tels bâtiments sont dits à énergie positive.

I.1.2. Bâtiments à énergie positive BEPOS

De 1998 à 2008, la consommation d'énergie en Europe pour les habitations a augmenté de 2% pour arriver à 297 Mtep (Commission Européenne, 2010). Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer cette augmentation comme : l'augmentation de la population, le temps passé dans les bâtiments, des exigences de confort plus élevées... Afin de satisfaire ce besoin de confort, l'utilisation d'air conditionné a été évalué comme le facteur le plus influent concernant la consommation des habitations dans les pays industrialisés (Perez-Lombard, Ortiz, et Pout, 2008). La consommation d'énergie du secteur du bâtiment doit être maîtrisée. En 2004, le gouvernement français a lancé le "plan climat" dont le but principal est de réduire les émissions de CO₂ afin de limiter l'effet de serre dû aux activités humaines

(Plan Climat, 2004). Ce plan d'action s'est organisé autour de plusieurs thèmes tels que le transport, l'agriculture et le bâtiment. Le programme national de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans les bâtiments (PREBAT) a été initié à cette occasion, en 2005. Son objectif est de mettre en place des stratégies de réduction de la consommation d'énergie pour les bâtiments (quel que soit le secteur) à travers la mise en œuvre de projets démonstrateurs. En 2010, l'ADEME avait déjà financé plus de 500 projets de bâtiments à basse consommation concernant du neuf et de la rénovation dans les secteurs résidentiels (à 60%) et tertiaire (40%) (ADEME, 2010). Le PREBAT se focalise sur le bâtiment et ne considère pas les implications à l'échelle de la ville. Cependant les projets financés ont permis de tirer des enseignements permettant de mettre en place la RT2012. La réglementation thermique (RT) fixe les limites maximales des performances énergétiques des bâtiments dans le cadre d'une rénovation ou d'une construction. Le PREBAT2, a été instauré par la suite, en 2010, avec comme but de concevoir le bâtiment de demain. Ce dernier accorde une considération plus importante à la ville à travers la recherche sur les réseaux électriques intelligents et la favorisation de projets à l'échelle du quartier. Pour cela, plusieurs groupes de travail ont été mis en place dont deux sur la conception des bâtiments à énergie positive (*BEPOS - Vers des bâtiments à énergie positive* et *BEPOS, smart grid, territoires et habitants*).

Le secteur du bâtiment représente plus de 40% des consommations énergétiques nationales et 25% des émissions de CO₂. Au regard de ce constat, des mesures importantes ont été prises et des réglementations mises en place pour s'assurer du respect des accords relatifs au protocole de Kyoto, des objectifs de la commission européenne et plus directement des lois issues du Grenelle de l'environnement. Le plan bâtiment (MEDDE, 2012b) permet de gérer la bonne mise en œuvre des engagements du Grenelle au travers de la mise en place de réglementations, d'audits, d'aides financières et de constructions exemplaires afin d'atteindre l'objectif de ne construire que des bâtiments à "zéro énergie" à partir de 2019, c'est-à-dire qui produisent au moins autant d'énergie qu'ils en consomment. Cet engagement pourra bénéficier de la mise en œuvre de la RT2012 qui prévoit que les bâtiments et équipements publics et tertiaires neufs construits à partir du 1^{er} janvier 2013 consomment au plus 50 kWh/m² d'énergie primaire par an. Dans un avenir proche, la RT2020 prévoit que *"Toutes les constructions neuves faisant l'objet d'une demande de permis de construire déposée à compter de la fin 2020 présentent, sauf exception, une consommation d'énergie primaire inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite dans ces constructions, et notamment le bois-énergie"* (Loi n° 2009-967, 2009).

I.1.2.1. Qu'est-ce qu'un BEPOS ?

Un bâtiment à énergie positive (BEPOS) est un bâtiment qui produit annuellement plus d'énergie (à partir de source renouvelable) qu'il n'en consomme. De même, sa construction est sobre en matière de consommation d'énergie, par exemple, en raison de l'utilisation de matériaux produits localement. Cependant son architecture doit garantir une intégration harmonieuse dans son environnement. On distingue des productions d'énergie sur site et hors du site selon que l'énergie est produite directement au niveau du bâtiment ou qu'elle est importée de sources proches. L'idée sous-jacente est de réduire la quantité d'énergie grise, c'est à dire la quantité d'énergie consommée pendant tout le cycle de vie d'un produit, de la

fabrication au recyclage en passant par l'entretien et la maintenance. Dans le cycle de vie d'un bâtiment, l'exploitation qui dure plusieurs dizaines d'années est la plus critique. Des bureaux ou des boutiques ont des besoins importants en électricité pour la ventilation/chauffage/climatisation (HVAC) ou l'éclairage, l'alimentation du matériel informatique *etc.* L'énergie nécessaire au déplacement des utilisateurs du bâtiment est aussi prise en compte comme les ascenseurs par exemple. Cette approche de l'énergie consommée pour le transport peut être considérée à l'échelle de la ville, une ville plus étalée impliquant une plus grande consommation pour le déplacement de la population.

Il existe plusieurs indicateurs qui permettent de juger de la qualité d'une telle construction tels que la consommation d'énergie avec et sans considération de la production locale. Cependant la forme du bâtiment influe sur ces indicateurs, le rapport de la surface de toit disponible pour une installation photovoltaïque par rapport à la consommation d'énergie au mètre carré est très faible pour un immeuble de bureaux par rapport à une habitation individuelle. La localisation est plus ou moins contraignante concernant l'intégration architecturale ou le climat. Enfin le niveau de confort est directement lié à la consommation d'énergie et va varier en fonction des activités pratiquées au sein du bâtiment. Le CSTB décline la problématique pour concevoir, construire et gérer les BEPOS en huit objectifs thématiques (CSTB, 2009):

- 1- faciliter les comportements responsables
- 2- apporter un environnement confortable et sûr
- 3- assurer une qualité architecturale et urbaine (intégration du bâtiment dans la ville)
- 4- maîtriser l'énergie pour le transport des utilisateurs
- 5- maîtriser les impacts liés à la construction du bâtiment
- 6- exploiter les énergies renouvelables sur le site
- 7- maîtriser les consommations pour les autres usages locaux
- 8- maîtriser les consommations pour les usages de la RT (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage, auxiliaires)

I.1.2.2. Mise en œuvre par l'attribution de labels

Les BEPOS doivent produire de l'énergie mais doivent avant tout maîtriser leur consommation. Lorsqu'il s'agit de limiter la production d'énergie primaire à 50 kWh/m² par an, il est nécessaire de s'attaquer à tous les postes de dépense. Pour parvenir à ce but, les stratégies de la conception solaire passive telles que l'isolation, le type de vitrage, la taille des fenêtres, la couleur du mur extérieur et la présence de masques solaires extérieurs sont utilisées. Ces paramètres peuvent être contradictoires ainsi le choix de l'optimisation de ces derniers dépend de l'activité du bâtiment (logements, bureaux) et du moment de la journée ou ils sont habités (Cheung, Fuller, et Luther, 2005).

Les performances des bâtiments peuvent être définies sous deux approches différentes (Leprince, 2010) : la première basée sur la réduction de l'empreinte écologique du bâtiment et de ses occupants, la seconde focalisée uniquement sur l'amélioration des performances énergétiques du bâtiment. Les normes représentent un moyen d'obliger les concepteurs de bâtiments à respecter certains points. Les labels de performance sont une façon de les inciter financièrement à porter leur attention sur des points précis.

La première approche décrite par Leprince consiste à agir à toutes les étapes de la création d'un bâtiment. En France, la norme de construction HQE (Haute Qualité Environnementale) définit des axes orientés autour de l'éco-construction, l'éco-gestion, le confort et la santé des occupants. Parmi les 14 axes définis par la norme, le maître d'ouvrage doit en choisir au moins 3 sur lesquels il devra porter une attention particulière. La consommation énergétique du bâtiment peut ne pas être choisie, ainsi ce label ne garantit pas une faible consommation énergétique du bâtiment. Au Royaume-Uni, la BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) est basée sur un système de points (Baldwin, Leach, Doggart, et Attenborough, 1990). Des points sont attribués à un projet en fonction du respect des exigences prévues par la méthode. La répartition des points en fonction des catégories peut être sujette à discussion. En effet, parmi les catégories on trouve par exemple, la gestion de l'eau, le confort et le management en plus des matériaux et de l'efficacité énergétique, une fois de plus, le label ne signifie pas obligatoirement une réduction de la consommation d'énergie. Enfin, aux États-Unis, se trouve le système de notation LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) qui se présente comme un barème de points à l'instar de la méthode britannique (US Green Building Council, 1999). Néanmoins, ce dernier est plus centré sur la performance énergétique des bâtiments si l'on se réfère à l'attribution des points par catégorie. Ces méthodes ont l'avantage d'être plutôt exhaustives dans la considération de l'impact du bâtiment, cependant la consommation énergétique n'est pas une contrainte chiffrée pour l'obtention des labels.

La seconde approche décrite par Leprince regroupe des labels qui limitent la consommation énergétique annuelle en kWh/m². En Allemagne, le standard PassivHaus date de la fin des années 80 (Feist, 2007). Pour l'obtenir, le bâtiment doit, entre autre, consommer moins de 120 kWh/m².an d'énergie primaire et moins de 15 kWh/m².an d'énergie finale pour le chauffage, avec une puissance de chauffage inférieure à 10 W/m². Pour atteindre ces objectifs, l'exposition au soleil ainsi que l'isolation du bâtiment sont des éléments cruciaux afin de respecter le seuil de confort thermique requis par le label.

En Suisse, il existe trois labels Minergie, pour décrire des bâtiments : à faible consommation d'énergie (Minergie), à énergie minimale (Minergie-P) et à énergie positive (Minergie-A). Ces labels imposent des valeurs de consommations maximales permettant de respecter des conditions de confort thermique tout en fixant le surcoût de la mise en œuvre (construction ou rénovation) par rapport à un bâtiment conventionnel. Ainsi, la consommation des bâtiments voués au logement doit être respectivement inférieure à 38 kWh/m².an, 30 kWh/m².an et égale à 0 kWh/m².an. Il existe des catégories différentes pour les autres types de bâtiments permettant d'appliquer des contraintes adaptées comme par exemple 70 kWh/m².an pour un hôpital. Les besoins de chaleur pour le chauffage doivent se trouver sous un certain pourcentage en dessous de la norme suisse SIA 380/1 en fonction du label (80% pour Minergie par exemple). Pour les logements, il n'y a pas de réglementation concernant l'éclairage, en revanche les autres types de bâtiments doivent respecter des critères fixés dans des normes suisses.

En France, l'arrêté du 3 mai 2007 définit un label "Haute Performance Énergétique" (HPE) à cinq niveaux : HPE, HPE EnR, THPE, THPE EnR et BBC. Le niveau atteint par un bâtiment est évalué en fonction de sa consommation d'énergie primaire par

unité de surface par rapport à une consommation de référence, le calcul étant défini dans la RT2005. Ce calcul prend en compte le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation, l'éclairage et la ventilation. Le niveau HPE est obtenu lorsque la consommation est inférieure à 10% de la consommation de référence. Si au moins 50% de l'énergie utilisée pour le chauffage provient de la biomasse ou à 60% d'énergie renouvelable, alors le niveau HPE EnR est attribué. De la même façon, le niveau THPE (Très Haute Performance Énergétique) est accordé lorsque la consommation est inférieure à 20% de la consommation de référence. Le niveau THPE EnR est quant à lui attribué pour une consommation inférieure à 30% de la consommation de référence avec au moins 50% des besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire provenant d'énergies renouvelables. Le label BBC, qui a repris les valeurs définies par l'association Effinergie, est attribué à un bâtiment dont la consommation d'énergie primaire est inférieure à 50 kWh/m².an pondéré par deux coefficients dépendants du département et de l'altitude du site où se trouve ce bâtiment.

Ces labels sont principalement centrés sur la consommation liée aux besoins de chaleur. En effet, cela représente la plus grande part de la consommation, 70% pour un logement d'après l'ADEME. L'éclairage est généralement pris en compte mais ne représente pas un axe majeur d'économie d'énergie, il s'agit majoritairement d'utiliser des luminaires à basse consommation. De plus le confort des occupants est focalisé sur le confort thermique, mais pas sur le confort visuel. Dans le but de réduire la consommation électrique à tout prix, la qualité de l'environnement lumineux risque d'être dégradée. La première approche se révèle donc plus adaptée bien que plus difficile à mettre en œuvre. Néanmoins, toutes ces démarches se cantonnent à l'échelle du bâtiment seul, or certains points gagnent à être gérés à une plus grande échelle, un quartier par exemple, comme la gestion de l'eau et des déchets.

I.1.3. Écoquartiers

La prise en compte d'un groupe de bâtiments pourrait permettre d'obtenir des résultats de performance énergétique que les bâtiments pris individuellement ne pourraient pas obtenir. C'est l'objectif que vise la démarche d'écoquartier. Cela consiste à ne plus considérer les bâtiments seuls mais à prendre en compte leur intégration dans leur environnement urbain proche. L'exemple le plus poussé est celui de la ville de Masdar située dans les Émirats arabes unis (Nader, 2009). Ce projet en cours de réalisation (fin prévue en 2025) prévoit d'accueillir 40 000 habitants et 50 000 travailleurs sur une surface d'environ 7 km² entièrement alimentée à partir d'énergies renouvelables. Une centrale PV de 10 MW a été construite pour répondre à une partie de la demande. Les axes du développement durable concernent la gestion des déchets, de l'eau, de la nourriture et du transport ainsi que la consommation d'énergie des bâtiments. Ces derniers ont été conçus afin de minimiser la demande d'énergie, d'une part concernant les bâtiments seuls (isolation thermique, éclairage à faible consommation, taux de vitrage pour l'accès à la lumière du jour) et d'autre part en considérant leur environnement urbain proche. Par exemple, la largeur des rues permet de minimiser la pénétration du soleil pour le confort des passants. Ce projet est très coûteux (22 milliards de dollars) et n'est pas à la portée financière de tous les pays. Des initiatives sont pourtant mises en œuvres, par exemple le Programme des Nations Unies pour

l'environnement (UNEP) a mis en place SustainableCities (UNEP, 2012) qui permet de recueillir les bonnes pratiques des différents acteurs politiques à travers le monde, et de soulever les points importants à prendre en compte pour réduire l'empreinte écologique des villes.

I.1.3.1. Qu'est-ce qu'un écoquartier ?

Le concept d'écoquartiers répond en partie aux questions posées dans l'introduction de cette thèse et plus encore. Il s'agit de mettre en œuvre, au sein d'une ville, un ensemble d'habitations qui permet de prendre en compte les considérations de développement durable à une échelle supérieure au bâtiment seul. Une maison isolée peut être autonome, voire produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme, à un instant donné, mais un quartier doit être vu comme un groupe indissociable plutôt qu'un ensemble de maisons isolées. Cette vision holistique implique d'une part de mutualiser les ressources car la réalisation d'un seul bâtiment autosuffisant peut être difficile à mettre en œuvre alors que la gestion des ressources pourrait être rendue plus facile en passant à l'échelle du quartier. D'autre part cela permet de prendre en compte le facteur humain car il s'agit de créer des espaces de vie intimement liés. Cette collaboration entre architectes, urbanistes, sociologues, consultants en environnement et ingénieurs est à l'image de ce qu'un écoquartier représente : développement durable et mixité sociale. Ainsi, le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie en France énonce 5 grands principes (MEDDE, 2011) auxquels doit se soumettre un écoquartier :

- 1- Promouvoir une gestion responsable des ressources
- 2- S'intégrer dans la ville existante
- 3- Participer au dynamisme écologique
- 4- Proposer des logements favorisant la mixité sociale
- 5- Prendre en compte les attentes des habitants pour la conception du quartier

En pratique, il s'agit de minimiser l'empreinte écologique liée au quartier tant au niveau de la construction que dans l'utilisation des lieux. Les bâtiments sont conçus avec des matériaux écologiques dont l'exploitation est respectueuse de l'environnement et qui présentent le moins de risque possible de pollution une fois en place, et tant que faire se peut, soient facilement recyclables en fin de vie. Les bâtiments une fois habités doivent respecter des normes de consommation d'énergie exigeantes, le plus souvent atteintes grâce à l'utilisation de sources d'énergies renouvelables installées sur place. L'ensemble du quartier doit être conçu dans le but de maximiser la biodiversité et la mixité sociale, afin de créer des liens forts entre les habitants. Les habitants doivent adhérer au concept de développement durable : la gestion des déchets reste à leur charge et ils doivent faire l'effort de trier, ou de participer à la mutualisation des déchets verts dans un espace de compostage commun. De même, la mise en place d'infrastructures telles que des pistes cyclables pour favoriser les modes de transports doux n'a de sens que si elles sont empruntées au quotidien par les habitants.

Cet ensemble n'est pas une fin en soi et doit plutôt se voir comme un levier permettant de promouvoir les bonnes pratiques qui pourront être appliquées par la suite de manière systématique lors d'une conversion de la ville en un espace durable. De nombreux

projets ont vu le jour grâce auxquels les filières de conception et de mise en œuvre se mettent en place, cette phase d'apprentissage est nécessaire à l'application future des bonnes pratiques à une plus grande échelle. Le quartier Grenoblois de la zone d'aménagement concerté (ZAC) de Bonne illustre très bien cette idée (Enertech, 2011). Ce projet a eu pour but de réhabiliter une ancienne caserne militaire : 850 logements ont été créés autour de 15000 m² de commerces et 6000 m² de bureaux sur une surface totale de 8,5 hectares. Une étude des performances énergétiques de 8 bâtiments de ce quartier a été menée après leur construction, et 3 ans d'occupation. La consommation énergétique liée au chauffage a dépassé de 5% à 70% le seuil prévu lors de la conception. L'étude met en évidence des avaries concernant l'isolation, voire des défauts d'isolation des conduits d'air pour la ventilation. L'analyse de la consommation d'eau chaude sanitaire révèle que les installations ont été surdimensionnées. Le réglage de certains détecteurs de présence associés à des systèmes d'éclairages étant trop long, ils entraînent une consommation inutile d'électricité. De nombreux enseignements ont été tirés de cette étude. Par exemple, des ouvriers du bâtiment étrangers ont été embauchés pour leur salaire bon marché, cependant leur manque de formation a été à l'origine d'erreurs graves. Il est donc nécessaire de mettre un point d'honneur à former les ouvriers avant de les mettre à l'œuvre, afin de garantir que le travail effectué en amont par les cabinets d'architectes en action conjointe avec les bureaux d'études soit respecté. D'autres leçons ont été tirées de ce grand projet, telles qu'une meilleure compréhension des attentes des futurs habitants. Dans ce cas, un écart de quelques degrés concernant les préférences de température des locaux par rapport au dimensionnement des installations a entraîné l'inconfort des utilisateurs qui ont eu tendance à surchauffer par rapport aux simulations. Le dernier point intéressant concerne les prévisions climatiques qui ont servi à fixer les paramètres d'isolation et de chauffage. Ces dernières ont été basées sur des mesures effectuées en dehors de la ville, or l'îlot de chaleur urbain, qui est un phénomène bien connu (cf. section I.3.3), est à l'origine de températures plus élevées en milieu urbain. N'ayant pas été pris en compte, la consommation de chauffage a été surestimée et la surchauffe d'été sous-estimée. En effet, dans 67% des logements, la température intérieure dépasse 28°C plus de 40 h/an (limite conventionnelle) jusqu'à un maximum de 600 h/an. La première raison principale est liée à l'inoccupation des appartements qui, n'étant pas ventilés, n'évacuent pas la nuit la chaleur accumulée durant la journée. La deuxième raison concerne l'orientation des bâtiments, en effet, un appartement exposé plein sud accumule plus d'énergie provenant du soleil qu'un autre exposé au nord. Cela montre bien l'importance de prendre en compte l'environnement proche et l'accès au soleil afin d'éviter d'obtenir des appartements dans lesquels le confort varie fortement en fonction de l'appartement. La ZAC de Bonne est donc un exemple intéressant qui doit être considéré par les nouveaux projets au même titre que tous les écoquartiers existants. Ces derniers constituent ainsi une base de connaissance internationale. Les nouveaux projets pourront bénéficier de ce retour sur expérience afin d'atteindre les objectifs toujours plus exigeants du développement durable. Les règles de construction sont en constante évolution pour prendre en compte les objectifs de gestion de l'énergie à l'échelle nationale mais peuvent encore être améliorées (Prévost, Rodríguez, Molines, et Beckers, 2011). L'expérience des écoquartiers est donc nécessaire pour définir des règles pertinentes qui ne se focalisent plus uniquement sur le bâtiment isolé.

I.1.3.2. Quelques exemples en France et dans le Monde

De tels quartiers ont déjà été mis en œuvre depuis le début des années 1990 suite à la montée des préoccupations pour le développement durable. Ils sont souvent nés du besoin de rénovation de certaines zones urbaines, voire des friches. Quelques-uns des projets les plus remarquables sont présentés ici.

En France

La ZAC de Bonne mentionnée précédemment est un bon exemple de ce type de démarche. D'autres projets ont été menés à bien comme le quartier des Brichères à Auxerre qui est toujours en rénovation. Le but de ce projet était de convertir un quartier avec l'étiquette d'habitat social en un lieu mixte, par l'accès à l'achat de propriétés et en supprimant les grandes tours qui accueillait près de 500 personnes. Un second exemple parmi de nombreux est l'écoquartier Wagner près de Mulhouse, ce dernier étant terminé. Une fois de plus, des logements datant des années 60 ont été remplacés par des habitations de taille plus modeste, 30% de l'ancien quartier a été détruit. Ce projet a été récompensé par le "palmarès national écoquartier" en 2011. Cet appel à projet du ministère de l'écologie a réuni 393 dossiers provenant de toutes les régions de France soit deux fois plus que la première démarche du même type en 2009. La moitié de ces projets concernent une réhabilitation de friches urbaines au lieu de créer directement un quartier durable. Ces chiffres sont optimistes quant à l'avenir écologique des villes.

En Europe

Le quartier BedZED (Beddington Zero Energy Development) se trouve au sud de Londres, il s'agit d'un ensemble de 82 logements avec des commerces et des bureaux agencés autour d'espaces verts et d'espaces de rencontre sociales (salle de spectacle, complexe sportif). C'est un exemple de réussite pour la mixité sociale avec plus de 50% de logements réservés à des familles aux revenus modestes. Ce projet fait partie de l'Agenda 21 de Sutton, sa construction a commencé en 2001 et les premiers habitants sont arrivés en 2002. Les bâtiments ont été conçus avec une forte considération du rayonnement solaire, avec des serres privatives au sud et des bâtiments conçus pour minimiser l'obstruction mutuelle au soleil (cf. Figure I-6). De plus, le revêtement des serres est équipé de modules photovoltaïques contribuant à la réduction du coût énergétique des logements.



Figure I-6 : Vue des façades sud de l'écoquartier BedZED

Le quartier Bo01 en Suède présente, quant à lui, la particularité de produire 100% de l'énergie qu'il consomme sur place. Cette production est répartie entre des éoliennes, des modules photovoltaïques et de la géothermie pour le chauffage. Le quartier Vauban en Allemagne reprend le concept de maisons passives, de maisons positives qui produisent plus d'énergie qu'elles n'en consomment. Une fois de plus, l'énergie solaire est exploitée au maximum, avec 2500 m² de panneaux photovoltaïques installés sur les toits. D'autres projets peuvent être cités comme Vesterbro au Danemark, Kronsberg en Allemagne et Hammarby en Suède. Tous prennent en compte l'énergie solaire dans la conception des bâtiments mais aussi dans le but de réduire le bilan énergétique lié à la consommation que ce soit pour le chauffage ou l'électricité.

Dans le monde

La ville de Dongtan en Chine est un exemple intéressant car il s'agit plus ou moins d'un échec. Il s'agit d'un projet censé être présenté à l'exposition universelle de Shanghai en 2010. Contrairement à la plupart des projets dans le monde, il ne s'agissait pas de transformer une ville existante pour respecter certains critères permettant d'obtenir l'appellation de ville durable. Il s'agissait de construire une ville nouvelle entièrement écologique. Le projet n'a jamais vu le jour, les raisons invoquées dans les articles de presse sont la plupart du temps le coût élevé d'un projet trop ambitieux.

I.2. Domaine d'utilisation

Ce chapitre traite des utilisations possibles de l'énergie solaire. Dans un premier temps, la relation entre le soleil et le bâti est introduite. En effet, cette thèse s'intéresse à la disponibilité du rayonnement solaire sur l'enveloppe de bâtiments situés en milieu urbain. Dans un second temps, deux domaines d'exploitation du rayonnement solaire sont présentés : production d'énergie et apport de lumière naturelle. La description des phénomènes physiques intervenant dans la propagation du rayonnement solaire en milieu urbain sera faite plus tard, dans la section II.3.1.

I.2.1. L'enveloppe du bâtiment : un collecteur solaire

L'enveloppe du bâtiment est la surface qui se trouve à la limite entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Appelée "peau" par les architectes, à l'instar de l'enveloppe des êtres vivants elle possède deux fonctions majeures. La première est fonctionnelle, la seconde est esthétique. Nous nous intéressons uniquement à l'aspect fonctionnel de l'enveloppe qui est de contrôler/filtrer les échanges entre les environnements extérieur et intérieur. Hutcheon les résume ainsi (Hutcheon, 1968) :

- Différence de températures
- Apport d'air
- Migration de vapeur d'eau
- Ruissellement de l'eau de pluie
- Lumière naturelle ou artificielle
- Chaleur du rayonnement solaire
- Autres rayonnements (radio, radar...)
- Bruit
- Incendie

L'enveloppe est constituée d'une succession de couches ayant pour but de contrôler ces échanges, parfois dynamiquement. La pléthore de matériaux du bâtiment apporte un grand choix permettant d'optimiser ses performances, mais augmente la difficulté de la concevoir de façon optimale. La qualité de sa mise en œuvre ne doit pas être négligée comme l'a montré l'exemple de l'écoquartier de la ZAC de Bonne cité précédemment. Un outil (BEADS) a été développé (Fazio, Bedard, et Gowri, 1989) afin de guider le concepteur en partant des performances requises et en utilisant des bases de données de matériaux et de climats. Il s'agit d'un outil visant à déterminer des paramètres permettant d'atteindre des objectifs fixés. Par exemple, le choix des matériaux d'un bâtiment peut être fait en fonction du budget, de la consommation maximale souhaitée parmi d'autres paramètres.

Cependant la consommation d'énergie d'un bâtiment est fortement liée à son exposition au soleil et à la lumière naturelle. Le soleil apporte lumière et chaleur au bâtiment (cf. section I.2.2), pour autant que les constructions environnantes ne le masquent pas. Le concept d'enveloppe solaire s'est donc développé (Knowles, 2003) pour permettre de concevoir des bâtiments dont la forme permet d'optimiser les performances thermiques

et énergétiques par rapport à la contrainte qui a le plus d'effet sur ces paramètres : le soleil. La Figure I-7 représente une maquette d'un projet ayant été conçu en suivant ce concept.



Figure I-7 : Schéma d'un projet d'habitations conçues selon le concept d'enveloppe solaire (Knowles, 2003)

Cette idée basée sur les constructions des indiens d'Amérique du nord (cf. Figure I-8) permet de réduire l'ombre d'un bâtiment sur les constructions alentours à une période de l'année où le soleil est fortement souhaité. Les bâtiments ont une forme adaptée à la trajectoire apparente du soleil. Grâce à ce type de construction, un accès équitable peut être garanti pour chaque bâtiment, permettant ainsi au plus grand nombre de bénéficier des bienfaits du soleil.

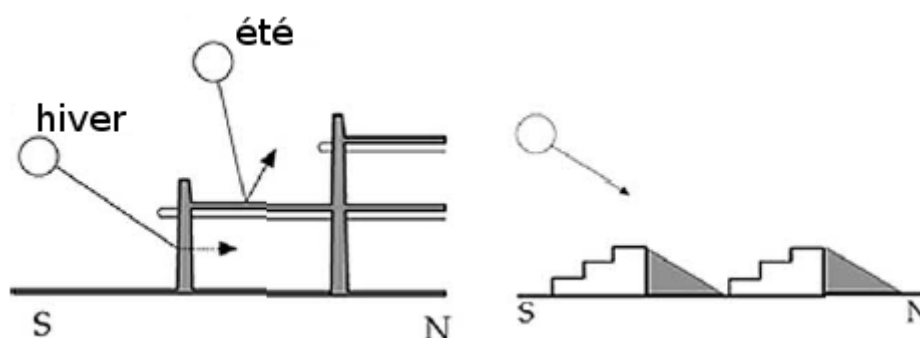


Figure I-8 : Habitations à Acoma Pueblo adaptées au soleil d'été et d'hiver (à gauche), et agencées de façon à limiter leur ombrage mutuel durant l'hiver (à droite)

S'il est reconnu que l'exposition au soleil est liée à des problématiques sanitaires, peu de lois ont été établies pour en garantir l'accès. Le droit au soleil est une notion juridique reconnue dans certains pays comme le Royaume Uni. Cependant il s'agit d'un ancien article

datant de 1832, donnant le droit à un habitant de s'opposer à toute construction nuisant à son accès à la lumière, s'il en a joui pendant une période de 20 ans. Néanmoins cet article a été rédigé bien avant que ce type de considération ne soit mesurable, ce qui n'est plus le cas à notre époque. Même s'il est toujours utilisable à l'heure actuelle, la jurisprudence britannique montre que faire valoir ce droit est une tâche difficile, car l'article de loi n'est pas adapté aux considérations actuelles. En France, il n'existe pas de loi équivalente. Il existe des contraintes par rapport à la hauteur maximale des constructions dans le code de l'urbanisme (Article R123-9) et une interdiction de construire un édifice qui pourrait "porter atteinte au caractère ou à l'intérêt des lieux avoisinants" (Article R111-21). Or la jurisprudence ne considère pas la perte d'ensoleillement comme un trouble anormal du voisinage dès lors qu'elle est la conséquence naturelle d'une urbanisation constante. Il est donc difficile de revendiquer un tel droit.

Le type de démarche axé sur l'ombrage du bâti en fonction de la position du soleil peut être poussé à l'extrême avec un bâtiment se faisant de l'ombre à lui-même (Capeluto, 2003a). Capeluto évalue la consommation d'énergie d'un tel bâtiment dont un exemple est visible sur la Figure I-9. Il montre ainsi que sous certaines conditions, ce type d'architecture peut permettre d'obtenir une meilleure performance énergétique qu'un bâtiment standard, du fait de l'ombrage mutuel que se procurent les éléments extérieurs. Notons qu'il existe une connotation architecturale à ce concept, car il est possible de masquer le soleil en utilisant des protections extérieures situées au niveau de chaque étage.



Figure I-9 : Exemple de "self-shading building" : la banque d'Israel, Jerusalem

La conception de l'enveloppe du bâtiment est donc un point crucial pour la gestion de l'énergie consommée par ce bâtiment. Différentes méthodes peuvent alors être utilisées au moment de la conception pour déterminer les formes les plus performantes. L'enveloppe peut être optimisée par exemple à l'aide d'un algorithme génétique et d'un programme de simulation (Tuhus-Dubrow et Krarti, 2010). Cette étude montre qu'en considérant de nombreux paramètres tels que l'orientation, l'isolation thermique des fenêtres, murs, fondations et toit, le taux de vitrage et le type de verre utilisé, le bâtiment dont la base est

un carré présente le coût de cycle de vie le plus faible pour 5 climats différents. Cependant le coût du cycle de vie ne varie pas de plus de 0,5% lorsqu'on modifie la forme du bâtiment (rectangle, trapézoïde, forme de U, H, L, T ou croix), pour autant que l'orientation et les dimensions de base de chaque forme puissent varier. Cela laisse donc de la liberté aux architectes, cependant ce résultat implique que ce sont les autres paramètres qui ont une influence réelle sur la consommation du bâtiment. Le taux de vitrage, soit le rapport entre la surface vitrée d'une façade et sa surface totale, est l'un de ces paramètres (cf. section III.1.5.2). Pour finir, l'étude de Tuhus *et al.* n'a pas pris en compte le bâtiment au sein d'un environnement urbain. Or, un bâtiment résidentiel a toutes les chances d'être situé dans ce type d'environnement et donc recevoir des ombrages de la part d'autres constructions, ce qui risquerait d'invalider les résultats obtenus.

L'enveloppe du bâtiment peut aussi être conçue en fonction des paramètres de performance souhaités pour ce bâtiment (Grobman, Yezioro, et Capeluto, 2008). Contrairement à la méthode habituelle : c'est-à-dire concevoir le bâtiment et simuler ensuite ses performances, ce procédé permet de gagner du temps lors de la phase de conception. En effet, il n'y a théoriquement pas besoin de modifier le bâtiment une fois qu'il a été généré, car il possède déjà les caractéristiques voulues. La démarche habituelle est coûteuse alors que le modèle proposé (nommé GenPOD) permet de choisir parmi différentes formes d'enveloppe respectant les paramètres d'entrée. De plus, il est possible à tout moment de modifier les paramètres et d'apprécier rapidement le résultat. Non seulement cet outil est utile pour créer des bâtiments mais il permet aussi à l'utilisateur d'apprendre l'influence de différents paramètres sur la forme d'un bâtiment. Enfin l'un des intérêts majeurs est de pouvoir prendre en compte l'influence du tissu urbain pour concevoir l'enveloppe, dans le but d'optimiser les performances du bâtiment tout en limitant son influence négative sur les bâtiments voisins. Néanmoins, il ne permet en l'état que de générer des formes de bâtiments à partir de critères géométriques en tenant compte de l'ombrage causé aux bâtiments alentours et de la vitesse d'écoulement de l'air sur les parois. Pour obtenir des valeurs de performance énergétique, il est nécessaire de charger la géométrie obtenue dans un autre outil dédié à cette tâche. Ainsi des solutions existent, des outils et des algorithmes ont été mis en œuvre pour promouvoir une conception des enveloppes de bâtiments permettant d'obtenir des performances énergétiques optimales.

La végétation intégrée aux bâtiments a un rôle important à jouer dans la ville durable. Il existe de nombreuses études sur les toits verts et leurs propriétés acoustiques (Van Renterghem et Botteldooren, 2009), ou leur effet sur l'augmentation de la dispersion des polluants au sein du canyon urbain (Baik, Kwak, Park, et Ryu, 2012). De même les toits verts permettent : de réduire les écoulements d'eaux pluviales (Mentens, Raes, et Hermy, 2006), de réduire la consommation électrique en réduisant la charge thermique grâce au rayonnement solaire absorbé pour la photosynthèse, de réduire le phénomène d'îlot de chaleur urbain (cf. section I.3.3) grâce à l'évaporation de l'eau (Barnes, Morgan, et Roberge, 2001). L'albédo est le rapport de l'énergie solaire reçue par une surface et de l'énergie réfléchi par cette dernière, sa valeur est donc comprise entre 0 et 1. L'albédo d'un toit végétal se trouve entre 0,7 et 0,85 alors qu'il est se trouve plutôt entre 0,05 et 0,25 pour un toit classique en milieu urbain (Getter et Rowe, 2006). Un toit végétal absorbe donc moins de rayonnement solaire qu'un toit de bâtiment. L'énergie collectée par un ensemble de bâtiments (un quartier, une ville) participe donc au réchauffement global de cet

ensemble. Une étude a montré qu'en passant d'un albédo de toit de 0,25 à 0,4, la température de l'air ambiant pouvait être réduite de 4°C (Taha, 1997). Les toits verts sont particulièrement intéressants pour améliorer la performance des bâtiments anciens qui souffrent très souvent d'une isolation peu efficace, voire inexistante, (Niachou, Papakonstantinou, Santamouris, Tsangrassoulis, et Mihalakakou, 2001), les auteurs montrent qu'une végétalisation des toits apporte une réduction de la consommation d'énergie d'environ 7% pour des toits moyennement isolés et de moins de 2% pour des toits bien isolés. Autre avantage : en tapissant de végétaux les toits des bâtiments, on remplace ceux qui ont été détruits lors de sa construction.

De la même façon que les toits, les façades peuvent être recouvertes de végétation et en tirer les mêmes avantages (Green, 2004) : la charge thermique est réduite, l'isolation augmentée, la résistance aux intempéries améliorée, la qualité de l'air est améliorée grâce à la production d'oxygène et à l'absorption de polluants.

L'enveloppe est l'interface du bâtiment avec son environnement extérieur, nous nous intéressons ici particulièrement au fait qu'elle collecte l'énergie solaire. Sa forme doit être prise en compte pour optimiser les performances énergétiques des bâtiments et pour améliorer le confort des occupants. Dans les sections suivantes, nous allons étudier les deux domaines d'utilisation possible du rayonnement solaire, notamment par les BEPOS faisant partie d'écoquartiers.

I.2.2. Le solaire pour l'énergie

Le rayonnement solaire est considéré tout d'abord selon sa capacité à produire de l'électricité à l'aide de la technologie photovoltaïque ou à générer de la chaleur qui peut être utilisée directement dans des applications thermiques voire aussi pour générer de l'électricité.

I.2.2.1. Solaire thermique

La première trace d'un appareil capable de collecter l'énergie produite par le soleil sous forme de chaleur remonte à 1774 à travers l'invention de H. B. De Saussure. Il s'agissait d'une boîte en bois avec une partie en verre permettant de capturer les rayons du soleil. L'idée était d'évaluer si les rayons étaient aussi efficaces en altitude qu'en plaine. La boîte était maintenue perpendiculaire aux rayons du soleil tout au long de la journée, H. B. De Saussure mesurait la température à l'intérieur de la boîte. Le premier chauffe-eau solaire, le *Climax*, mis au point par C. Kemp a été commercialisé à partir de 1891. Depuis lors, ce type d'appareil a commencé à être utilisé pour bénéficier de la ressource locale et gratuite qu'apporte le soleil pour le chauffage de l'eau. En France, ce type d'installation est utilisé principalement pour les chauffe-eau solaire individuels (CESI) qui permettent de couvrir environ 60% des besoins annuels d'une famille, les systèmes solaires combinés (SSC) qui apportent eau chaude sanitaire et chauffage afin de réduire aussi la facture d'électricité, enfin les systèmes de production d'eau chaude collective (ESC) visant à être intégrés à des bâtiments plus conséquents comme des immeubles d'habitation, des maisons

de retraite ou hôpitaux par exemple. Ces applications peuvent être utilisées en milieu urbain moyennant une installation permettant d'optimiser le gain solaire en adaptant l'inclinaison des collecteurs par exemple. Il existe aussi d'autres applications plus rurales comme le chauffage des fourrages ou le chauffage de l'eau de piscine.

Il est aussi possible de produire de l'électricité à grande échelle dans des centrales solaires thermodynamiques à concentration. Il en existe plusieurs types, comme la centrale à tour ou la centrale à miroirs cylindro-paraboliques (cf. Figure I-10). Le principe reste le même : il s'agit de concentrer fortement le rayonnement du soleil sur des tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur. À l'instar des centrales nucléaires, ce fluide à haute température sert à transformer de l'eau en vapeur pour entraîner des turbines permettant de générer un courant électrique. Ce type de centrale ne peut être installé que sur de grandes surfaces de terrain, le milieu urbain n'est pas un candidat pour ce type d'exploitation de l'énergie solaire.

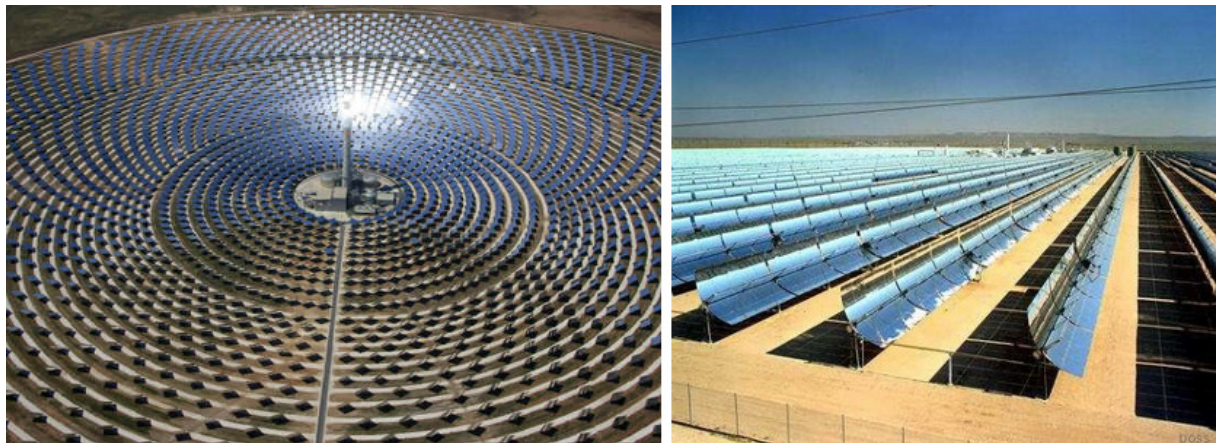


Figure I-10 : Centrales solaires thermodynamiques à concentration à tour (à gauche) et à miroirs cylindro-paraboliques (à droite)

I.2.2.2. Photovoltaïque

L'effet photoélectrique découvert par Becquerel en 1839 et expliqué par Einstein en 1905 est défini comme l'émission d'un électron de la part d'un matériau exposé à un rayonnement électromagnétique. Ce phénomène dépend du matériau et de la fréquence du rayonnement. Nous nous concentrerons sur l'effet photovoltaïque qui se produit au sein d'une cellule PV.

Une cellule PV est un composant électronique actif de type semi-conducteur dont la Figure I-11 schématise une vue en coupe. Un courant électrique est produit lorsqu'un photon, capté par la surface sensible (en bleu foncé), apporte suffisamment d'énergie à un électron pour pouvoir le rendre mobile. La grille de contacts électriques (en blanc) à la surface doit laisser passer la lumière tout en permettant de laisser circuler les électrons dans le circuit électrique qui contient la charge. Étant donné que le dos de la cellule n'a pas besoin d'être exposé à la lumière, le contact peut se faire sur toute la surface au lieu d'une simple grille.

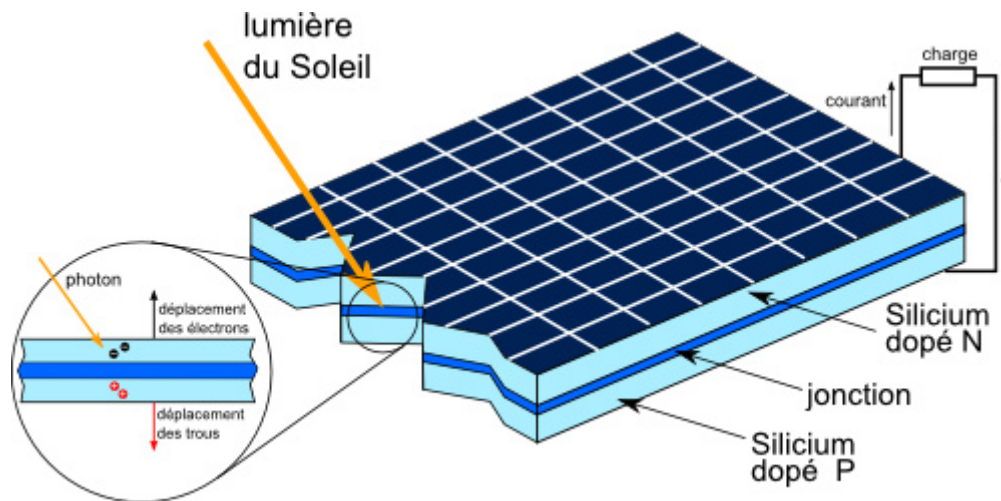


Figure I-11 : Schéma de fonctionnement d'une cellule PV

Il existe deux technologies de cellules, l'une à base de silicium cristallin et l'autre à base de silicium non cristallin. La première utilise du silicium mono cristallin (rendement de 13%) ou multi cristallin (rendement de 15%). L'autre, dite à couches minces, utilise du silicium non cristallin (amorphe), son intérêt réside dans un procédé de fabrication moins coûteux mais elle offre des rendements plus faibles (autour de 7%). Pour la technologie à "couches minces", d'autres matériaux que le silicium existent tels que le tellure de cadmium (CdTe), le di-séléniure de cuivre et indium (CIGS) ou l'arséniure de gallium (GaAs). Ces technologies permettent par exemple de produire des panneaux solaires flexibles et semi-transparents. Le choix de la technologie peut aussi s'effectuer en fonction de la surface disponible, si la surface n'est pas un problème, une technologie peu coûteuse avec un rendement peu élevé peut être choisie plus facilement. Parmi les pistes d'amélioration des rendements, on peut citer l'utilisation de plusieurs jonctions permettant d'étendre la bande utile du spectre électromagnétique au-delà du domaine visible. La tension aux bornes d'une cellule est de l'ordre du volt, ainsi pour obtenir des puissances élevées, plusieurs cellules sont reliées en série et sont intégrées dans un module étanche qui protège les cellules avec une plaque de verre afin de laisser passer les rayons du soleil. Ces modules sont fabriqués et commercialisés dans le monde entier, il en existe donc de nombreux modèles différents.

Les modules peuvent être assemblés pour former des panneaux. Ces panneaux représentent ainsi une grande surface permettant de collecter l'énergie solaire. Afin de produire de grandes quantités d'électricité, les panneaux peuvent être agencés sur un grand terrain comme le montre la Figure I-12, il s'agit donc d'applications en dehors de la ville. Ces centrales peuvent produire de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mégawatts. Actuellement, la centrale la plus grande de France (Toul-Rosières) se trouve en Lorraine, elle s'étend sur une surface de 367 hectares et possède une puissance crête de 115 MWc (cette unité est expliquée en annexe G). La centrale la plus grande du monde se trouve aux États-Unis et s'étend sur une surface de 960 ha pour une puissance crête de 247 MWc.



Figure I-12 : Centrale PV "Copper Mountain Solar Facility" dans le Nevada (150 MWc)

À une plus petite échelle, il est possible d'installer des centrales PV sur les toits des bâtiments qu'ils soient plats ou en pente (cf. Figure I-13 à gauche). Ce mode de mise en œuvre a l'avantage de décentraliser la production d'électricité à l'échelle nationale. Ces centrales de grande taille nécessitent une surface importante, c'est pourquoi elles sont majoritairement installées sur des entrepôts par exemple. Il est possible d'installer des centrales plus modestes sur les toitures de particuliers (cf. Figure I-13 à droite). Ces derniers bénéficient d'avantages fiscaux pour promouvoir ce type d'installation car elles participent à la course aux objectifs de production d'énergie renouvelable imposés par la commission européenne.



Figure I-13 : Centrale PV en toiture de 694 kWc sur un entrepôt (à gauche) et sur le toit d'un particulier avec 2 kWc (à droite)

Les centrales au sol et en toiture sont des formes courantes qui représentent la majorité des installations mises en œuvre. Toutefois il existe d'autres types d'intégration des modules voire des cellules qui ouvrent la voie à l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque en

milieu urbain. En effet, cet environnement n'est pas propice au développement à grande échelle des centrales en toiture du fait du fort ombrage et de la difficulté d'installation occasionnée par les petites surfaces disponibles.

Les centrales au sol sont évidemment inenvisageables en milieu urbain. L'intégration de modules en façade est une pratique qui se répand. Les modules sont donc placés verticalement, ce qui implique dans le principe une limitation de l'énergie qu'il est possible de collecter : ce type de projet est donc moins rentable économiquement. Or les centrales PV doivent généralement leur existence au retour sur investissement qu'elles occasionnent plus qu'à l'intérêt écologique qu'elles représentent. Toutefois, l'image positive que renvoie l'utilisation de cette technologie dans des projets architecturaux en favorise l'essor. Ces installations intégrées qu'elles soient sur le toit ou en façade sont regroupées sous l'acronyme BIPV (Building Integrated Photovoltaics), elles peuvent contribuer à l'amélioration de la thermique et de l'étanchéité du bâtiment (cf. section I.3.6). Il est possible enfin de trouver des intégrations avec une forte considération architecturale. Dans ce type d'application les cellules peuvent être intégrées dans une structure en verre permettant de laisser passer la lumière tout en produisant de l'électricité comme le montre la Figure I-14.



Figure I-14 : Intégration de cellules PV dans une structure transparente, dans la gare principale de Berlin

À l'échelle mondiale, l'agence internationale de l'énergie (IEA) a mis en place un programme (PVPS) qui concerne l'utilisation du gisement solaire dans la production d'électricité grâce à la technologie photovoltaïque. Les tâches 7 et 10 ont des applications directes au milieu urbain, elles ont toutes les deux été complétées. La tâche 10 concernait l'utilisation de la technologie PV à l'échelle de la ville alors que la tâche 7 était centrée sur l'amélioration de l'intégration architecturale des modules afin d'en faire un produit économiquement viable. Le rapport annuel du programme PVPS pour l'année 2012 (IEA, 2013) montre que les tarifs de rachat de l'énergie provenant de centrales PV pour la France favorisent l'installation de modules intégrés aux bâtiments résidentiels avec un tarif de rachat 4 fois supérieur à celui des installations au sol (soit 0,34€).

Des initiatives existent aussi à une plus petite échelle. Le projet POLIS est une initiative européenne pour la prise en compte du potentiel des villes en matière d'exploitation de l'énergie solaire. Il s'agit de recenser les politiques qui ont pu être mises en œuvre dans les villes afin de créer un cadre cohérent permettant de promouvoir les bonnes pratiques au niveau de l'urbanisme et de mettre en place des lois afin de développer la prise en compte du potentiel solaire des bâtiments (Grauthoff, Janssen, et Fernandes, 2012). La communauté urbaine de Lyon a fait partie des villes pilotes. Dans son rapport, le projet POLIS émet dix recommandations permettant de mettre en œuvre "une politique de planification cohérente en faveur de l'énergie solaire". Parmi les dix, se trouvent des recommandations techniques comme l'accès à des données sur la quantité d'énergie solaire disponible, mais aussi des recommandations moins techniques liées à la formation des urbanistes et à l'implication des citoyens ainsi qu'à la gestion financière et juridique d'un projet.

I.2.3. Le solaire pour l'éclairage

Les paragraphes suivants ne traitent plus de la chaleur ou de l'énergie brute que peut fournir le rayonnement solaire mais de la lumière qu'il peut apporter. L'enveloppe du bâtiment doit pouvoir s'adapter pour apporter à l'occupant la quantité de lumière qui lui est nécessaire tout en évitant les surchauffes.

I.2.3.1. Notions d'éclairagisme

La Figure I-15 représente le spectre solaire tel qu'il peut être mesuré avant l'entrée du rayonnement dans l'atmosphère terrestre et qu'il n'y soit modifié.

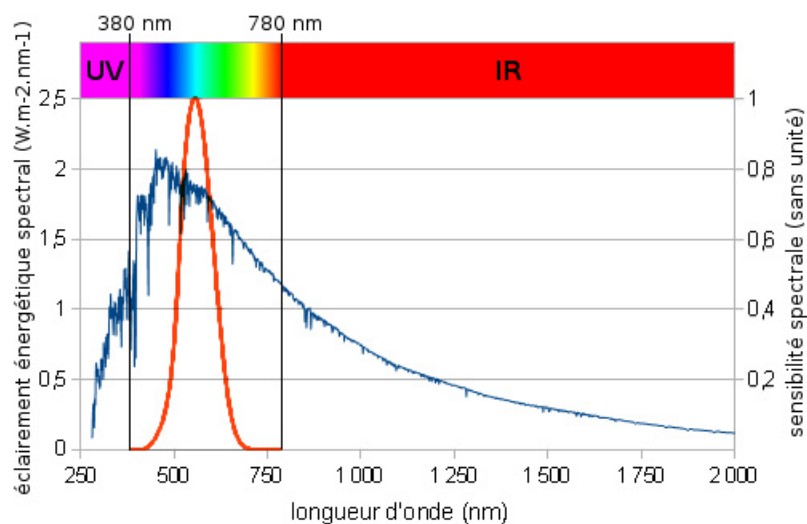


Figure I-15 : Spectre solaire extraterrestre (en bleu), sensibilité spectrale (en rouge), et principaux domaines de longueur d'onde

Alors que pour les considérations thermique et photovoltaïque, la totalité du spectre pouvait être prise en compte, le domaine d'étude de la lumière visible ne se situe qu'entre 380 nm et 780 nm. En effet, c'est le domaine de longueurs d'onde sur lequel l'œil humain est sensible. Au-delà se trouve l'infrarouge et en deçà l'ultraviolet. L'éclairage étant lié à la vision humaine, ce domaine relève de la photométrie plutôt que de la radiométrie.

Afin de pouvoir différencier ces deux domaines d'application, il est nécessaire de décrire les domaines photométrique et radiométrique dans lesquels ils s'inscrivent. La radiométrie se rapporte aux mesures du rayonnement produit par une source. La photométrie se rapporte aux mesures de rayonnement produit par une source en prenant en compte son impact sur l'œil humain. La différence entre les deux, repose dès lors sur l'utilisation d'une fonction qui définit la sensibilité de l'œil au rayonnement, il s'agit de l'efficacité lumineuse relative spectrale notée $V(\lambda)$. Cette fonction est représentée dans la Figure I-16 : les valeurs sont comprises entre 0 et 1 et atteignent un maximum pour une longueur d'onde de 555 nm qui correspond à la couleur jaune-vert pour laquelle l'œil humain est donc le plus sensible. Cela est valable pour la vision diurne, dite photopique. La sensibilité spectrale de l'œil dépend en effet des photorécepteurs qui interviennent : en vision diurne, ce sont les cônes RVB de la rétine ; en vision nocturne, dite scotopique, ce sont les bâtonnets. Cela se traduit par un décalage de la sensibilité de l'œil vers le bleu avec un maximum à 505 nm (effet Purkinje).

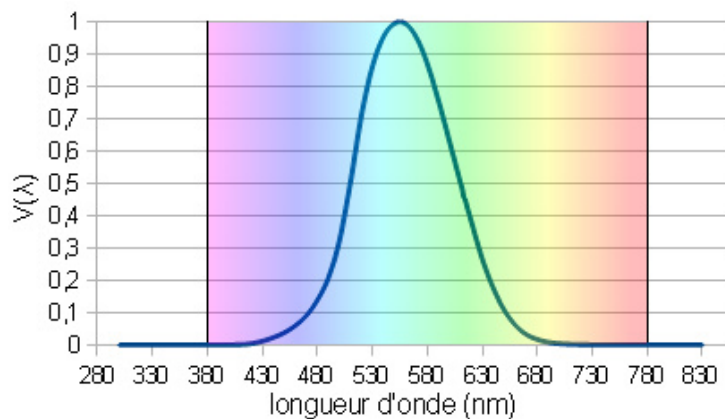


Figure I-16 : Efficacité lumineuse relative spectrale (CIE, 1988)

Cette fonction est utilisée pour convertir les unités radiométriques en unités lumineuses en appliquant une constante d'efficacité lumineuse maximale dont la valeur de 683 lumens par watt a été déterminée à partir de mesures. Le lumen est l'une des unités propres à l'éclairagisme, la sous-section suivante en présente les principales.

Unités de mesure de la lumière

Le flux énergétique monochromatique Φ_λ correspond à la puissance rayonnée par une source pour une longueur d'onde donnée et s'exprime en watt/m. Le flux lumineux F émis par une source traduit l'impact de ce flux sur notre système visuel. Il est défini par l'équation (I-1) et se mesure en lumen (lm).

$$F = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (I-1)$$

L'éclairement énergétique correspond au flux reçu par unité de surface, il est obtenu par intégration sur toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique comme le montre l'équation (I-2) et son unité est le watt par mètre carré.

$$Ee = \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_{\lambda}}{dS} d\lambda \quad (I-2)$$

En intégrant sur le domaine visible uniquement, on obtient l'éclairement lumineux (équation (I-3)) qui s'exprime en lux (lx).

$$Ev = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) \frac{d\Phi_{\lambda}}{dS} d\lambda = \frac{dF}{dS} \quad (I-3)$$

L'éclairement lumineux est utilisé pour effectuer les comparaisons entre les différentes méthodes utilisées dans notre étude car il s'agit de déterminer des quantités de lumière reçues sur les façades des bâtiments.

Lorsque qu'une source lumineuse est dite ponctuelle, c'est-à-dire qu'elle est si petite qu'elle peut être assimilée à un point, son intensité lumineuse dans une direction donnée O_x correspond au flux qu'elle émet dans cette direction, par unité d'angle solide (cf. équation (I-4)) et s'exprime en candela (cd).

$$Iv_{O_x} = \frac{dF_{O_x}}{d\Omega} \quad (I-4)$$

Pour une source de grande dimension, la luminance est utilisée. Il s'agit du flux lumineux émis dans une direction donnée O_x par une surface élémentaire dS de la source. Dans l'étude de la lumière naturelle, le ciel représente une source lumineuse de grande dimension. L'équivalent de la luminance dans le domaine énergétique s'appelle la radiance. La luminance se calcule à partir de l'intensité (cf équation (I-5)), son unité est la candela par mètre carré. Dans l'équation (I-5), le dénominateur représente la surface apparente de la source lumineuse.

$$Lv_{O_x} = \frac{dIv_{O_x}}{dS \cos \theta} \quad (I-5)$$

Parmi les unités présentées, l'éclairement lumineux sera la plus utilisée pour décrire le comportement de la lumière dans un canyon urbain. La sous-section suivante présente une

autre notion importante que nous utiliserons : le comportement de la lumière vis-à-vis d'un matériau.

Réflexion de la lumière

Un flux reçu par un matériau peut être à la fois absorbé, transmis et réfléchi. La fraction du flux incident absorbé par le matériau est appelé le facteur d'absorption, noté α . La fraction du flux incident transmis par le matériau est appelé le facteur de transmission, noté τ . Enfin, la fraction du flux incident réfléchi par le matériau est appelé le facteur de réflexion, noté ρ . Ces facteurs ont une valeur comprise entre 0 et 1 et leur somme est égale à 1.

L'absorption est un phénomène pris en compte dans le domaine de la thermique car l'énergie absorbée par le matériau contribue à augmenter sa température. Dans le domaine de l'éclairagisme, parce que l'on travaille sur le domaine visible du rayonnement, c'est davantage aux phénomènes de transmission et/ou de réflexion que l'on s'intéresse. Dans cette section, nous nous concentrons essentiellement sur les propriétés de réflexion des matériaux. Notre intérêt est de pouvoir caractériser les réflexions multiples à l'intérieur du canyon urbain.

Une surface peut présenter deux types de réflexions. La réflexion spéculaire (Figure I-17, à gauche) correspond à l'application directe de la première loi de Snell-Descartes. L'angle i_1 entre le rayonnement incident concentré sur un seul rayon et la normale à la surface réfléchissante est nommé angle d'incidence. Le plan d'incidence est le plan qui contient ces deux droites. Le rayonnement réfléchi est lui aussi concentré sur un seul rayon qui se trouve dans le plan d'incidence et qui possède un angle de réflexion i_2 égal à i_1 . Si le rayonnement est réfléchi dans plusieurs directions, il existe alors une partie diffuse comme le montre la Figure I-17 à droite. En réalité, la majorité des surfaces possèdent une part de réflexion spéculaire et une part de réflexion diffuse.

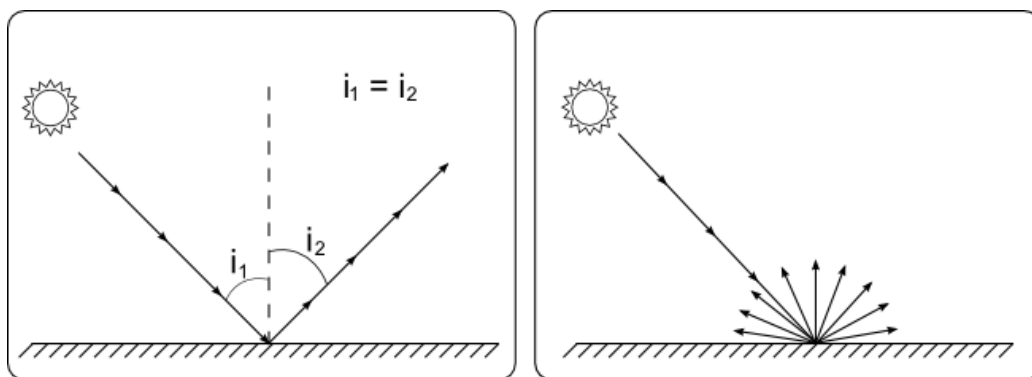


Figure I-17 : Réflexion spéculaire (à gauche) et réflexion diffuse (à droite)

On dit que la réflexion suit la loi de Lambert lorsque la luminance de la surface est la même depuis toutes les directions d'observation. Cette dernière caractéristique est souvent utilisée pour permettre de simplifier les calculs.

Effets de la lumière sur l'homme

La lumière naturelle s'oppose à la lumière artificielle qui provient d'appareils fabriqués par l'homme. Ces deux sources diffèrent sur plusieurs points comme la disponibilité, la qualité et le coût. L'éclairage naturel dépend des conditions climatiques et il peut être nécessaire de recourir à de l'éclairage artificiel durant la journée par temps nuageux. La lumière naturelle est gratuite alors que la lumière artificielle représente une part non négligeable de la consommation d'un bâtiment, par exemple, près de 10% dans le secteur résidentiel en 2007, en Europe (Global Chance, 2010). Enfin, la lumière naturelle varie tout au long de la journée et possède un spectre particulier auquel notre organisme s'est adapté.

L'homme est fortement réceptif (physiologiquement et psychologiquement) aux longueurs d'ondes situées sur le spectre visible dont l'éclairement énergétique spectral est le plus élevé du spectre solaire. Le rythme circadien est un rythme biologique d'environ 24 heures présent chez l'être humain qui agit sur de nombreux mécanismes biologiques tels que l'éveil, la régulation de la température et la production de différentes hormones (Huang, Ramsey, Marche, et Bass, 2011). Ces mécanismes sont le fruit de l'adaptation de l'espèce humaine aux conditions de vie sur terre. Notre rétine est tapissée de photorécepteurs utiles à la vision (les cônes et les bâtonnets) mais aussi de photorécepteurs utiles à notre horloge biologique (les cellules ganglionnaires à mélanopsine dites aussi mRGCs). Les mRGCs ont une influence sur nos performances cognitives, notre stress, notre vigilance (Chellappa *et al.*, 2011). La lumière naturelle est donc essentielle à l'homme, l'enveloppe des bâtiments doit être conçue pour en apporter. L'augmentation de la taille des fenêtres dans un bureau permet d'augmenter aussi bien la possibilité de vue vers l'extérieur que la pénétration de la lumière naturelle. Il a été montré que ces deux paramètres sont liés au confort visuel : une augmentation de la vue vers l'extérieur et de la quantité de lumière pénétrant dans le bureau impliquent tous les deux une augmentation du ressenti positif des occupants (Cetegen, Veitch, et Newsham, 2008).

Le niveau d'éclairement réel à l'intérieur d'un bâtiment dépend de la localisation géographique de ce dernier, du climat du lieu, de l'heure et de la période de l'année, de la taille et de l'orientation des ouvertures, de la position de l'occupant dans la pièce et des masques éventuels liés aux constructions alentours. Pour que les occupants du bâtiment puissent effectuer leurs activités dans des conditions adéquates, il faut que l'éclairage (naturel et/ou artificiel) soit suffisant. Les normes (NF EN 12464-1, 2011) fournissent l'éclairement qui doit être atteint pour effectuer une activité donnée sans fatigue visuelle (500 lux sur une feuille de papier pour une activité de lecture ou d'écriture). Cet éclairement doit être augmenté pour tenir compte de la dégradation du système visuel avec l'âge. À ces considérations se rajoutent la contrainte de la consommation énergétique. En effet, il est possible grâce aux technologies actuelles de mettre en place des systèmes d'éclairage artificiel assez bien adaptés à la vision humaine pour maximiser le confort et la productivité, or nous avons vu que pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de bénéficier d'un certain niveau d'éclairement. Toutefois, l'augmentation du nombre de sources lumineuses et de leur puissance implique une augmentation des coûts d'achat et de maintenance. Ainsi l'utilisation de logiciels de simulation d'éclairage permet de tirer profit au maximum de la lumière naturelle lors de la conception de bâtiments, et éventuellement d'optimiser l'installation d'éclairage artificiel, afin de réduire les coûts d'éclairages (De Carli et De

Giuli, 2009). Ces logiciels doivent pour cela être capables de décrire la disponibilité de la lumière naturelle dans le bâtiment au cours de l'année en prenant en compte le climat local et l'environnement urbain. L'un des paramètres clefs qui doit être pris en compte pour effectuer cette estimation, est la surface des ouvertures du bâtiment.

I.2.3.2. Dimensionnement des surfaces vitrées

Pour un bâtiment isolé, des simulations menées à partir des plans d'un bâtiment de grande hauteur (Cheung *et al.*, 2005) ont montré qu'une augmentation de 30% de la réflectance des façades permet d'obtenir une réduction de 13% de la consommation annuelle d'énergie liée au refroidissement. De même, en augmentant de 30% le rapport de la surface de vitrage par rapport à la surface au sol d'une pièce, la même consommation énergétique augmente de 12,8%. Donc d'après cette étude, la réduction de la consommation d'énergie pour la climatisation d'un bâtiment se fait en réduisant la taille des fenêtres et en éclaircissant le revêtement des façades. Dans un canyon urbain, ce type de conclusion basée sur un bâtiment isolé ne suffit pas. En effet, si des façades plus claires permettent d'augmenter la luminosité globale du canyon, la réduction de la taille des fenêtres entraîne une réduction de la pénétration de la lumière dans les pièces alors que l'accès à la lumière est un paramètre critique du fait des fortes obstructions. Ainsi, cela peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie pour l'éclairage. Ce phénomène est d'autant plus important en hiver car la topographie du canyon urbain réduit alors fortement l'accès à la lumière naturelle. Il existe donc une dualité concernant la taille des fenêtres.

Du point de vue de l'éclairagiste, il est préférable de concevoir des fenêtres les plus grandes possibles pour pouvoir bénéficier d'un maximum de lumière du jour permettant ainsi de réduire la facture concernant l'éclairage artificiel. Du point de vue thermique, plus les fenêtres sont grandes, plus la charge thermique du bâtiment va être sensible à l'ensoleillement. En fonction de la période de l'année et du climat, cette charge thermique peut être souhaitable ou non. L'une des solutions consiste à utiliser des fenêtres dont le facteur de transmission peut être modifié à volonté (Persson, 2006). Il existe plusieurs approches : on parle de verre électrochrome, photochrome ou thermochrome. Cela apporte une approche différente de l'utilisation de stores extérieurs éventuellement intéressante pour les architectes. Le concept de taille de fenêtre idéale (Ghisi et Tinker, 2005) représente une solution plus réaliste à court terme. En effet, Ghisi et Tinker démontrent que la taille de fenêtre qui maximise l'efficacité énergétique croît avec la taille de la pièce pour un bâtiment isolé. Une pièce plus grande nécessite une plus grande ouverture pour faire pénétrer plus de lumière et réduire la consommation d'énergie pour l'éclairage. Les simulations prennent aussi en compte la consommation pour le maintien d'une température adaptée aux activités des occupants, le tout pour des orientations de façade Nord, Sud, Est et Ouest. Cette méthode permet donc de trouver le meilleur compromis entre les deux contraintes. Cependant, dans cette étude, aucune obstruction provoquée par la présence d'autres bâtiments n'a été prise en compte, de plus la contribution de la voûte céleste est réduite à l'utilisation d'un ciel uniforme et les économies d'énergie sont basées sur le facteur de lumière du jour dont la pertinence est discutable (cf. section I.3.5). Le taux de vitrage (WWR de l'anglais Window to Wall Ratio) représente le rapport entre la surface de fenêtres et la surface totale de la façade. Un mur avec WWR=0 ne possède donc aucune ouverture,

l'extrême inverse est une façade entièrement vitrée ($WWR=1$). Le taux de vitrage est une caractéristique importante dans la conception d'un bâtiment. Il doit être choisi en fonction de son implantation. Par exemple, le nouveau bâtiment de génie civil de l'université Concordia à Montréal a bénéficié d'une étude paramétrique (Tzempelikos, Athienitis, et Karava, 2007) qui a déterminé qu'un taux de vitrage de 60% permettait de maintenir une température opérative de 20°C. Cependant aucune obstruction causée par l'environnement du bâtiment n'est mentionné dans l'article, ce qui porte à croire qu'elle n'a pas été considérée. Le taux de vitrage aurait-il été le même dans ce cas ? Un taux identique pour toute la façade est-il un choix pertinent ?

Nous avons vu que l'enveloppe du bâtiment offre la possibilité de collecter l'énergie solaire. Cette énergie peut être utilisée pour générer de l'électricité et pour apporter de la chaleur ou de la lumière. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier l'influence de la géométrie urbaine sur l'accès à la ressource solaire du bâtiment.

I.3. Études menées sur l'énergie solaire en milieu urbain

En France le taux d'urbanisation avoisinait les 78% en 2010 sur une surface occupée par les villes représentant 22% du territoire (Grenier, 2007). La consommation de l'énergie finale pour le secteur résidentiel et tertiaire était d'environ 44% en 2011 devant le transport qui représente 32% de la consommation finale (SOeS, 2012). Le milieu urbain est donc un lieu majeur de réduction de la consommation d'énergie et de l'émission de GES. L'étude de l'influence des différents paramètres de cet environnement sur ces phénomènes peut se faire par l'analyse de mesures sur site ou de simulations. L'avantage des simulations est qu'elles permettent d'obtenir des données rapidement et pour des configurations qui n'existent pas encore (nouvelles formes de bâtiments, agencement des rues) afin d'optimiser les nouvelles constructions. Cependant l'environnement urbain est complexe, c'est pourquoi il est nécessaire de disposer de représentations simplifiées de sa géométrie. Le canyon urbain est la plus simple représentation (cf. Figure I-18).

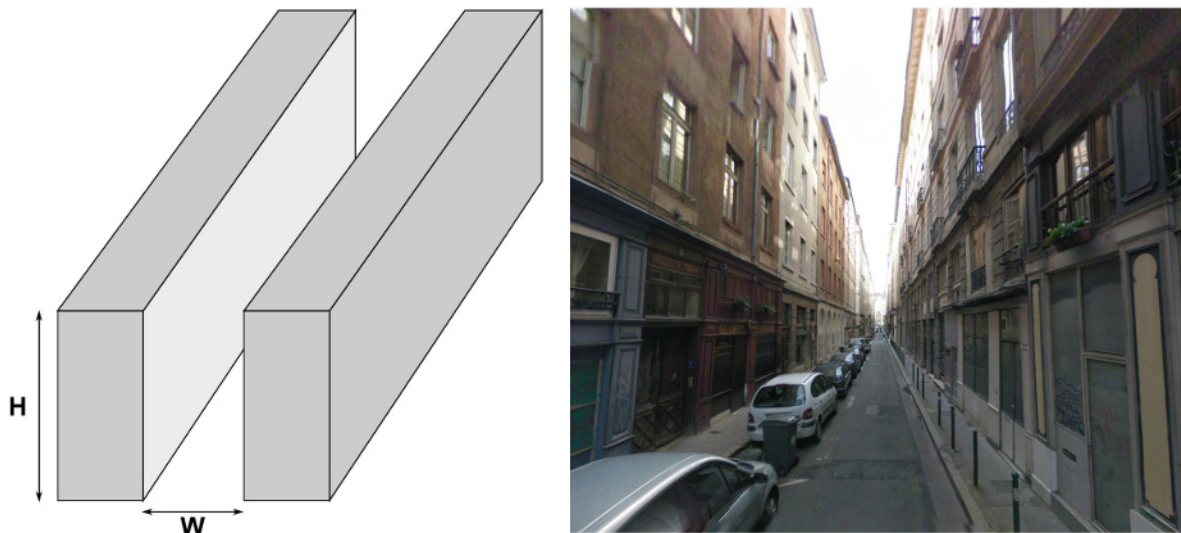


Figure I-18 : Schéma et photographie d'un canyon urbain (rue Royale à Lyon)

Le schéma de gauche sur la Figure I-18 décrit le concept de canyon. Il s'agit de deux rangées de bâtiments se faisant face. La hauteur des bâtiments H et la largeur de la rue W sont constantes tout au long de la rue. Lorsqu'il s'agit d'études dans le domaine thermique ou aérodynamique, la profondeur des bâtiments doit aussi être définie. Étant donné que ce travail s'intéresse à la disponibilité du rayonnement solaire sur l'enveloppe de bâtiments situés en milieu urbain, cette dimension n'a pas besoin d'être considérée car elle n'a aucune influence sur le comportement du rayonnement solaire au sein du canyon. À droite du schéma, se trouve une photographie de la rue Royale située dans le centre de la ville de Lyon. Il s'agit d'un exemple typique de canyon urbain. En utilisant cette simplification, il est possible de trouver des modèles mathématiques du comportement de la lumière dans la rue, mais aussi d'effectuer des simulations ou encore de construire et d'instrumenter des maquettes afin d'analyser le comportement de nombreux paramètres. De nombreuses études utilisent cette

géométrie simplifiée pour des domaines qui ne sont pas obligatoirement liés à l'énergie solaire, par exemple la répartition des polluants sur les façades des bâtiments dans un canyon (Nazridoust et Ahmadi, 2006).

La prise en compte de la géométrie des bâtiments alentours doit être effectuée au stade de la conception des bâtiments. Cette considération peut être faite à l'échelle de la ville, qui utilise des simplifications concernant la forme des bâtiments et leur répartition. La considération à l'échelle de la rue est plus précise concernant ces points bien que d'autres approximations soient souvent effectuées.

I.3.1. Études menées à l'échelle de la ville

Les villes occupent une place de plus en plus importante, elles occupent des milieux autrefois naturels qui possédaient une certaine capacité à absorber le rayonnement solaire. Dans la ville, le rayonnement solaire est "capturé" à l'intérieur des rues et contribue à l'augmentation de sa température. Ainsi la morphologie de la ville a une influence directe sur le confort et la consommation d'énergie. Par exemple, en faisant varier les paramètres géométriques du canyon, Aida et Gotoh montrent que plus la surface intérieure du canyon (façade et sol) est grande, plus l'albédo moyen global de la ville est faible (Aida et Gotoh, 1982). Ces résultats dépendent aussi de l'angle d'incidence du soleil, un minimum est atteint pour les angles intermédiaires, mais cela peut être différent en fonction des propriétés des revêtements des bâtiments. Les auteurs montrent aussi qu'une rue dont la largeur représente deux fois la hauteur des bâtiments (rapport d'aspect du canyon $H/W=0,5$) implique une absorption maximale de rayonnement solaire à l'échelle de la ville. Ce type de morphologie ne devrait donc pas être appliqué pour les climats chauds. Ces résultats sont intéressants de même que la démarche, cependant il existe de nombreux facteurs qui n'ont pas été pris en compte et qui pourraient mener à des conclusions différentes, comme la présence de fenêtres ou l'hétérogénéité des hauteurs de bâtiments.

L'article présenté précédemment utilise un modèle géométrique simple, or une ville peut difficilement être associée à un tel modèle. L'agencement des bâtiments ne suit pas un schéma constant, c'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte la géométrie réelle et de manipuler ces modèles simplifiés avec précaution. Il est difficile d'instrumenter une ville entière pour obtenir des informations sur l'éclairement reçu par les bâtiments, c'est pourquoi des logiciels de simulation sont utilisés dans ce but (cf. section II.5 page 124). Grâce à de tels outils capables d'effectuer des calculs pour des géométries de complexité variée, il est possible d'analyser la consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage et la climatisation (D. Li, Rao, et Liao, 2012). L'étude de Li a permis ainsi de quantifier la consommation énergétique d'un ensemble de bâtiments en fonction de leur densité de répartition. Les calculs étaient basés sur des modèles de consommation ainsi que sur la quantité d'énergie solaire reçue par les bâtiments tout au long de l'année.

Les obstructions que se créent mutuellement les bâtiments ont une influence directe sur la quantité de lumière disponible à l'intérieur des rues. Par exemple, une étude a mis en avant l'avantage de la répartition aléatoire des bâtiments pour maximiser la quantité de rayonnement solaire disponible sur les façades, mais aussi à l'intérieur des bâtiments

(Cheng, Steemers, Montavon, et Compagnon, 2006). La Figure I-19 montre les 4 types de répartition des bâtiments considérés par les auteurs (H=horizontal, V=vertical, A=aléatoire, U=uniforme).

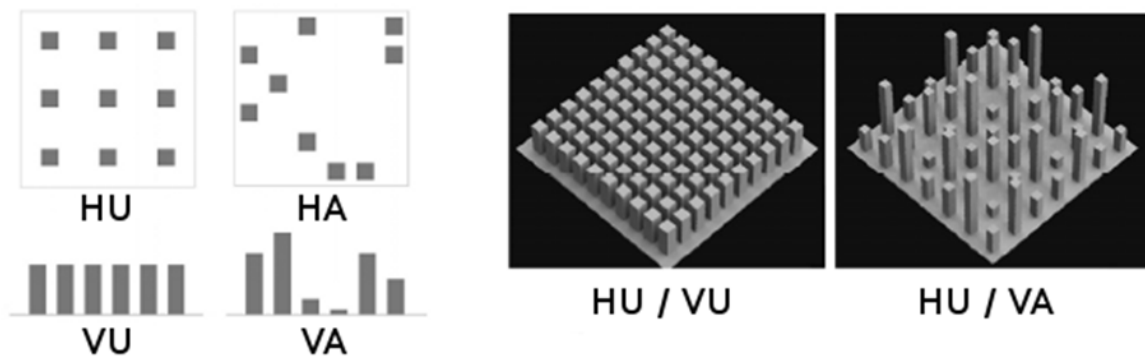


Figure I-19 : Schéma des 4 typologies urbaines (à gauche) et exemples en 3D (à droite)

Le rapport entre la surface au sol du bâti et la surface totale du site, ainsi que le rapport entre la surface totale des bâtiments (somme de la surface de chaque étage) et la surface totale du site ont aussi été étudiés. Les résultats montrent que le caractère aléatoire horizontal (HA) est d'autant plus important que l'occupation du sol est grande. Le caractère aléatoire vertical (VA) apporte un gain de lumière plus grand pour les hautes densités de bâtiments.

Les simulations informatiques permettent donc d'obtenir des données concernant le comportement de la lumière pour des géométries quelconques. Cependant, il est toujours intéressant de comparer les données obtenues à partir de modèles avec des mesures sous des conditions réelles. Ce type de démarche a déjà été réalisé, sur un modèle réduit, pour une répartition uniforme de bâtiments de mêmes dimensions (Kanda, Kawai, et Nakagawa, 2005). L'avantage d'une géométrie simple est qu'il est facile de déterminer un modèle mathématique qui correspond à la réalité, d'ailleurs cette étude qui se focalise sur la mesure de l'albédo de l'ensemble de bâtiments donne des écarts rarement supérieurs à 10% entre les valeurs mesurées et calculées à partir de différents modèles.

Une autre méthode nommée "iso-shadow" permet d'évaluer l'impact d'un bâtiment sur la quantité de rayonnement reçu en un point (Kristl et Krainer, 2001). Cette dernière permet d'obtenir un pourcentage d'éclairement reçu aux environs d'un bâtiment par rapport à l'éclairement reçu au même endroit de la même scène, sans ce bâtiment. Cela traduit très clairement l'influence de la construction d'un bâtiment sur le rayonnement solaire disponible aux alentours. La Figure I-20 donne un exemple des résultats générés par la méthode. Cette notion d'éclairement exprimé relativement à l'éclairement sans obstruction sera utilisée dans l'analyse des résultats de cette thèse sous le nom d'éclairement relatif.

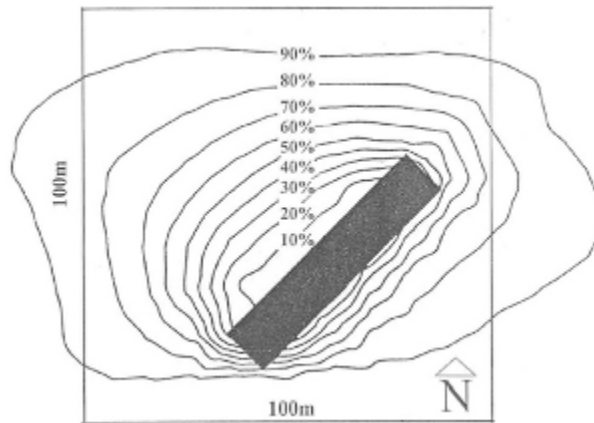


Figure I-20 : Illustration du résultat de la méthode iso-shadow

L'étude menée par Kristl & Krainer a montré que la hauteur des bâtiments a une influence supérieure à leur largeur sur la quantité de rayonnement disponible au sol pour un ensemble de quatre bâtiments. C'est en effet en augmentant la hauteur des bâtiments qu'il est possible de réduire la taille de la zone d'éclairages relatifs inférieurs à 80%. Ceci est intéressant car plus cette zone est petite, plus il est possible d'augmenter la densité de répartition des bâtiments. Enfin, cette étude montre que pour un ensemble de quatre bâtiments de géométrie identique, l'orientation nord/sud donne toujours les ensembles les plus compacts, l'influence de l'orientation étant d'autant plus grande que les bâtiments sont petits. Cette étude est donc intéressante, mais il n'est pas fait mention de la contribution du ciel, ainsi on peut penser que seul le rayonnement solaire direct a été pris en compte. Cela peut mener à une erreur conséquente de l'éclairage reçu au sol et cela rend l'étude fragile du fait qu'elle ne prend pas en compte les conditions météo locales. Malgré les simplifications généralement effectuées, nous avons vu que l'influence d'un bâtiment sur son entourage avait déjà été étudiée à grande échelle, nous allons maintenant effectuer un zoom au niveau de la rue pour décrire quelques analyses qui ont pu être menées à cette échelle.

I.3.2. Études menées à l'échelle de la rue

Au sein d'une rue, le revêtement des façades a une influence importante sur la réflexion du rayonnement solaire (Tsangrassoulis et Santamouris, 2003). Dans cette étude, un modèle mathématique a été développé pour estimer l'influence de façades entièrement vitrées dans un canyon urbain sur l'albédo de ce dernier. Ce modèle permet de quantifier l'influence du taux de vitrage pour différents angles d'incidence du soleil. Ce type de démarche permet d'obtenir des tendances concernant le comportement réel de la lumière mais l'absence de considération de la véritable nature du revêtement (forme des fenêtres, présence de balcons, revêtement différent d'un bâtiment à l'autre) peut être une source d'erreur lorsqu'il s'agit de concevoir un bâtiment et d'évaluer sa future consommation d'énergie. La réflexion de la lumière entre les façades est donc un facteur important, d'ailleurs, la façade d'en face peut être considérée comme une source au moins aussi importante que la voûte céleste sous des conditions de ciel clair (Wa-Gichia, 1998). L'étude de Wa-Gichia a été réalisée à l'aide

d'une simulation informatique, notons que les façades ne comportaient pas de parties vitrées ce qui représente une simplification qui mérite d'être approfondie.

Une relation linéaire a été observée dans un canyon urbain, entre l'éclairement global horizontal et l'éclairement vertical mesuré sur une façade de bâtiment orientée vers le nord, lorsque la façade ne reçoit pas de rayonnement direct (Brotas et Wilson, 2006). Pour cette façade, la lumière provient donc du ciel et des rayons réfléchis par le sol et la façade opposée. Cette notion d'éclairement vertical par rapport à l'éclairement horizontal en l'absence d'obstruction, correspond exactement à la définition de l'éclairement relatif qui sera utilisé pour présenter les résultats de cette thèse dans la partie IV. D'après Brotas et Wilson, cette relation varie peu avec : la latitude du lieu considéré (entre 35° et 55°), l'orientation de la rue (tant que la façade en question ne reçoit pas de rayonnement solaire direct) et la géométrie du canyon décrite par le rapport H/W. En revanche, la hauteur du point considéré sur la façade modifie la constante de l'équation de la droite. Le facteur de réflexion des façades est donné comme le paramètre le plus influent sur cette relation. En effet, la contribution de la façade d'en face et du sol est plus importante que celle du ciel dans cette configuration. Ces résultats indiquent que le revêtement des façades est un paramètre critique dans le bilan lumineux d'un canyon urbain.

L'influence de l'orientation et de la largeur de la rue a été prise en compte pour un climat typique des Pays-Bas avec différents types de toit pour un canyon de longueur infinie (van Esch, Looman, et de Bruin-Hordijk, 2011). Les résultats montrent qu'une augmentation de la largeur de la rue, avec une hauteur de bâtiments fixe, entraîne une augmentation moyenne de 19% de l'énergie reçue par les surfaces du canyon. Cette énergie est déterminée à partir de calculs géométriques prenant en compte la position du soleil. Toutefois, une augmentation de 19% en été correspond à une plus grande quantité d'énergie qu'en hiver. L'orientation de la rue et la forme des toits ont une influence moindre sur la quantité totale d'énergie reçue (façades et sol) par rapport à la largeur de la rue, en revanche ils modifient la répartition de l'énergie sur les différentes surfaces. Cela est important lorsqu'il s'agit de considérer les performances énergétiques de bâtiments plutôt qu'un bilan total pour le canyon. Il aurait été intéressant d'utiliser le rapport d'aspect pour caractériser la géométrie de la rue. En effet, ces résultats ne sont valables que pour une hauteur de bâtiment donnée ce qui ne permet pas de tirer des conclusions à plus large échelle. Les rapports d'aspect utilisés dans cette étude sont tous inférieurs à 1 (de 0,3 à 0,8) ce qui correspond bien à des zones résidentielles, mais pas à des canyons urbains comme il en existe dans un centre-ville (cf. Figure III-3 page 148).

L'influence du facteur de réflexion énergétique des façades des bâtiments dans un canyon urbain sur la température (d'air ambiant et de surface) a déjà été étudiée (Doya, 2010). Ce facteur agit sur l'absorption d'énergie par les bâtiments, ce qui a pour effet de modifier leur charge thermique. Ce type d'étude montre qu'il est possible de choisir des peintures appropriées au climat local, les peintures permettant d'absorber le plus d'énergie doivent être choisies pour des zones faiblement ensoleillées. Toutefois, ce type d'étude n'a pas été mené concernant la partie visible, cela pose un problème car un revêtement permettant d'absorber l'énergie aura tendance à être sombre. Or l'utilisation d'un revêtement sombre dans un canyon urbain implique naturellement une rue plus sombre, ce qui n'est pas souhaité dans ces mêmes zones où les ciels sont peu lumineux et

l'ensoleillement faible. Récemment, une étude a été conduite afin d'évaluer l'influence de certains paramètres clefs du canyon urbain, sur la consommation d'énergie pour l'éclairage naturel à l'intérieur des pièces ainsi que sur la quantité de lumière naturelle au sein du canyon (Strømman-Andersen et Sattrup, 2011). Elle met en évidence, à travers des simulations informatiques, l'importance de la prise en compte de la géométrie du canyon, du taux de vitrage et du facteur de réflexion des façades.

Le revêtement des façades a donc déjà été pris en compte dans des études précédentes, cependant ces travaux sont basés soit sur des modèles mathématiques, soit sur des simulations. Cela permet d'effectuer un grand nombre de comparaisons, mais il y a toujours des simplifications qui risquent de perturber les résultats obtenus, voire de limiter leur intérêt. Par exemple, il y a peu de bâtiments qui ne présentent aucune fenêtre et peu de rues dont les façades soient entièrement vitrées.

La morphologie des façades influe sur la quantité de lumière absorbée par la rue. Ainsi la taille des balcons influe sur les inter-réflexions (Tsangrassoulis, Santamouris, Asimakopoulos, et Tregenza, 1999). Cet article présente une méthode mathématique qui permet de calculer l'éclairement lumineux à différentes hauteurs d'une façade en fonction du nombre d'étages, chacun étant pourvu d'un balcon de forme identique. Cette méthode permet d'estimer l'impact de la longueur des balcons et du nombre d'étages de la rue sur sa réflectance moyenne.

La connaissance de l'exposition au rayonnement solaire du sol et des façades des bâtiments permet aussi d'analyser les phénomènes de circulation d'air dans un canyon urbain. En effet, l'énergie absorbée est réémise sous forme de chaleur. La température de ces surfaces agit à la fois sur la vitesse des vortex d'air et sur la forme de ces derniers (X. X. Li, Britter, Norford, Koh, et Entekhabi, 2012). Les travaux de Li *et al.* montrent aussi que la répartition des polluants à l'intérieur du canyon varie avec le rapport d'aspect. Par exemple, un canyon $H/W=0,5$ permet d'évacuer plus facilement les polluants que des canyons plus étroits. Une température plus élevée au sol augmente cet effet. Il est montré qu'un canyon $H/W=2$ a tendance à accumuler plus de pollution dans sa partie inférieure, ce qui pose des problèmes sanitaires car c'est là où circulent les piétons. De plus, cela risque aussi de créer une salissure plus importante des façades aux niveaux inférieurs.

L'orientation de la rue est aussi un facteur déterminant pour l'accès au rayonnement solaire du fait des variations de la position du soleil. Le rayonnement solaire direct par ciel clair peut être facilement modélisé, Bourbia s'est intéressé à l'accès au rayonnement solaire pour des rues de différentes largeurs (Bourbia et Awbi, 2004). Son étude utilise un indicateur nommé "shading fraction" (SF), décrit par l'équation (I-6) :

$$SF = 1 - \frac{EES_{obstr}}{EES_{surf}} \quad (I-6)$$

Avec EES_{surf} l'éclairement direct reçu par une surface en l'absence d'obstruction et EES_{obstr} l'éclairement direct horizontal reçu par cette même surface en prenant en compte les obstructions au soleil. Pour une surface donnée, plus la valeur de SF est élevée, plus l'accès

au soleil pour cette surface est réduit. Il s'agit d'un concept analogue à l'éclairage relatif, mentionné précédemment, mais uniquement basé sur le rayonnement solaire direct.

Pour un climat chaud (latitude 33°) l'orientation nord/sud est la plus adaptée car elle permet de minimiser l'énergie reçue par le soleil. Dès que l'orientation de la rue s'éloigne de cet axe, le gain d'énergie solaire au niveau du sol devient plus important pour les rues étroites durant l'hiver comme le montre la Figure I-21.

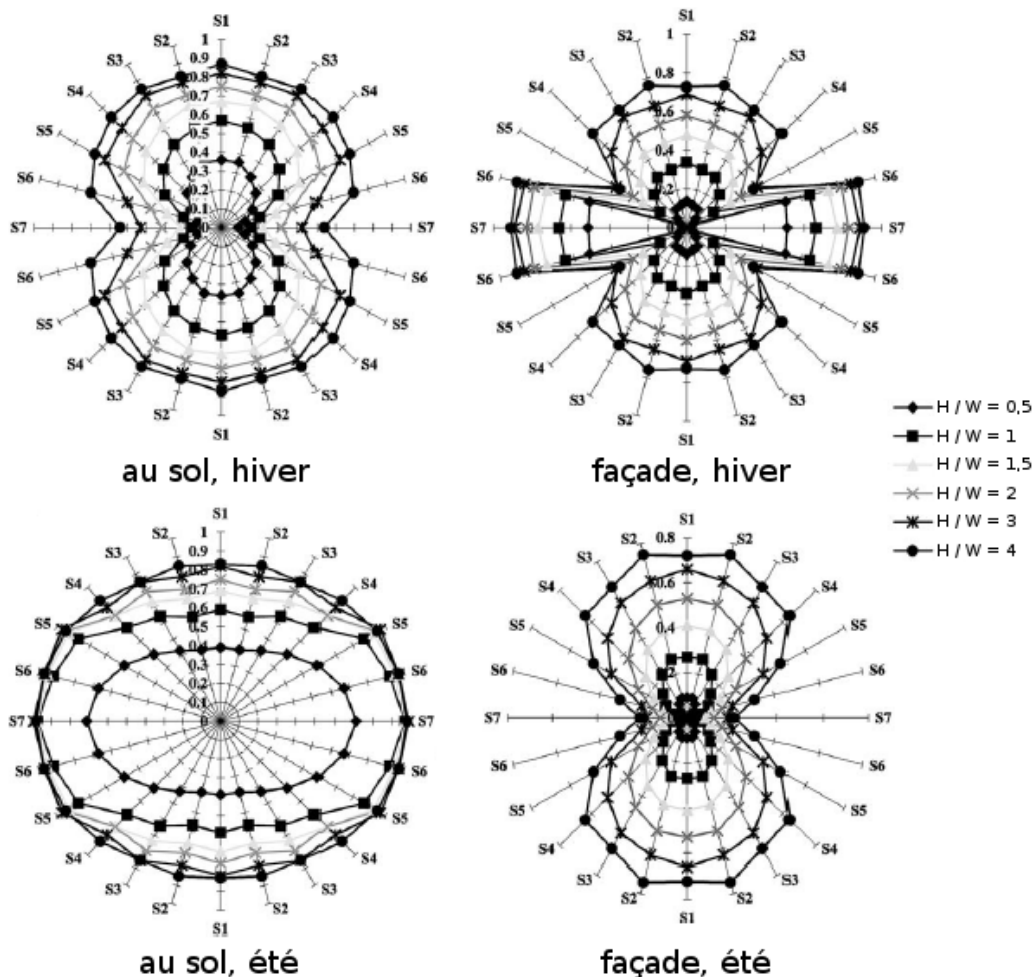


Figure I-21 : Valeurs de SF pour différentes orientations de rues, pour différents rapports d'aspect (H/W) l'été (juin/juillet), et l'hiver (décembre/janvier) au sol et pour les façades

Pour l'hiver, les valeurs présentées correspondent aux moyennes mensuelles de SF pour les mois de décembre et de janvier, les moyennes mensuelles pour les mois de juin et de juillet sont utilisées pour représenter les valeurs d'été. Le comportement inverse se produit durant l'été. Une rue étroite avec des bâtiments hauts permet de minimiser l'accès au rayonnement solaire direct. Ce type de conclusion pose plusieurs problèmes, par exemple, l'étroitesse de la rue est liée à une mauvaise circulation d'air et donc à une accumulation de pollution. De plus un compromis doit être trouvé entre le gain d'énergie pendant la journée et la capacité à perdre la chaleur pendant la nuit, ce qui est contradictoire avec le fait d'avoir des rues

étroites. Enfin ces solutions peuvent poser des problèmes sociaux du fait d'une limitation de l'accès au soleil.

L'influence d'un bâtiment sur la réduction de l'accès à la lumière naturelle des bâtiments alentours peut être prise en compte au moment de sa conception. Capeluto *et al.* (Capeluto et Shaviv, 1997) présentent ainsi une méthode (implémentée dans un modèle nommé SustArc) qui consiste à déterminer géométriquement la hauteur d'un bâtiment dont la surface de toit est donnée afin d'éviter l'obstruction de constructions ou de voies de circulation situées à proximité (cf. Figure I-22). Ce concept étend l'idée d'enveloppe solaire : le volume est déterminé en fonction de contraintes sur l'environnement urbain proche. Les auteurs définissent cette enveloppe (Solar Right Enveloppe) comme étant la limite maximale que peut remplir le volume du bâtiment. La méthode définit aussi l'enveloppe minimale qui permet au bâtiment de collecter suffisamment de rayonnement solaire direct à une période de l'année donnée (Solar Collection Enveloppe). Ces deux enveloppes permettent de définir une marge dans laquelle le volume du bâtiment doit se trouver pour bénéficier d'un apport suffisant d'énergie solaire tout en minimisant son impact sur les bâtiments existants.

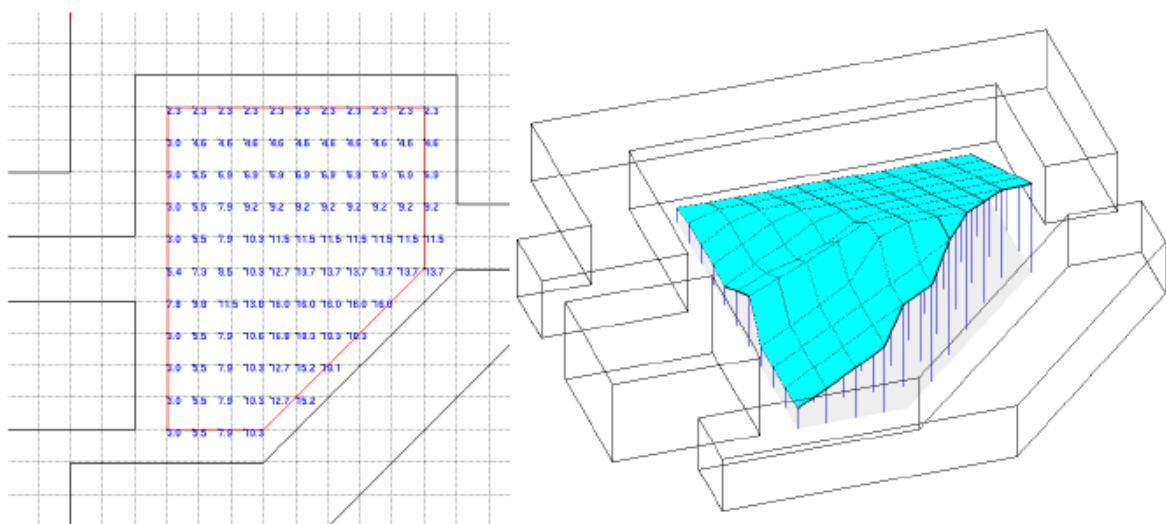


Figure I-22 : Enveloppe solaire ne nuisant pas au voisinage (Capeluto et Shaviv, 1997)

Une étude menée par Li *et al.* mérite d'être mentionnée ici, car elle correspond en partie à l'approche qui sera utilisée dans cette thèse et décrite plus tard dans le chapitre I.4 (D. H. Li, Cheung, Cheung, et Lam, 2010). Li *et al.* ont mis en place un modèle mathématique dont le but est de déterminer l'éclairement lumineux des façades d'un canyon urbain sous des conditions de ciel non uniformes. Afin de valider ce modèle, les auteurs ont procédé à des mesures sur une maquette de canyon urbain ainsi que dans une rue assimilable à un canyon. La maquette était en carton et mesurait 1,5 m avec un rapport d'aspect $H/W = 3$. L'écart quadratique moyen (EQM, indicateur statistique décrit et utilisé dans la section III.2.3.3) a été utilisé pour comparer les valeurs mesurées par une sonde située au milieu du canyon, à mi-hauteur des façades, avec les valeurs calculées. Une valeur de 12,4% a été obtenue entre les valeurs prédites par le modèle et les mesures sur la maquette. Un EQM de 16,7% a été obtenu en utilisant les mesures sur site. Ces résultats indiquent que le modèle prédit assez

bien les valeurs d'éclairement lumineux. Cependant, le facteur de réflexion lumineux des surfaces de la maquette a été obtenu à partir de la méthode utilisant un luminance-mètre et un luxmètre (cf. annexe C). Cette méthode a l'inconvénient d'être fortement dépendante de la précision du positionnement des appareils de mesure, ainsi que de l'obstruction (ou la contribution) provenant de la personne qui tient les appareils. Une valeur de 0,2 a été ainsi mesurée pour le sol, et 0,32 pour les façades. De plus, le facteur de réflexion lumineux de la façade de bâtiment n'a pas été obtenu à partir de mesures. Des simulations de la même géométrie ont été effectuées avec RADIANCE (cf. section II.4.1.1), en utilisant des facteurs de réflexion lumineux allant de 0,4 à 0,6 avec un pas de 0,01. La valeur retenue correspond à celle pour laquelle les éclairagements lumineux mesurés et ceux calculés par le logiciels donnent l'EQM le plus faible. Une valeur de 0,34 a été retenue pour les façades. Cette approche est discutable car il n'est pas possible de déterminer si le facteur de réflexion lumineux choisi correspond à la réalité. D'une part, une valeur de 0,2 a été fixée pour le sol, dans le but de prendre en compte sa contribution. Si cette valeur ne correspond pas à la valeur réelle, qui n'a pas été mesurée, cela implique un biais inconnu dans les valeurs calculées. D'autre part, la géométrie utilisée dans le logiciel ainsi que les conditions de ciels sont simplifiées par rapport à la réalité, introduisant un autre biais.

Nous venons de recenser quelques travaux de recherche permettant de mettre en évidence l'influence de différents paramètres de la morphologie urbaine sur l'accès à l'énergie provenant du ciel. La préoccupation majeure réside dans l'ombrage que se font les bâtiments entre eux. En effet, la disposition et la hauteur des bâtiments a une influence directe sur l'accès à la lumière et la chaleur du soleil dans la ville ou dans la rue. La section suivante décrit un phénomène bien connu qui résulte de cette disposition à l'échelle de la ville : l'influence de la morphologie urbaine sur l'accumulation de chaleur apportée par le soleil.

I.3.3. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

La couche limite atmosphérique est définie comme la partie de la troposphère qui subit directement l'influence de la terre. Son épaisseur varie en fonction du cycle diurne, le jour elle mesure entre 1 km et 3 km, la nuit cette grandeur tombe entre 100 m et 300 m en fonction du vent et de la surface plus ou moins apte à se refroidir. Cette couche est intéressante car c'est là que se trouvent l'humanité et ses constructions. Elle est caractérisée par une forte turbulence induite par les frottements avec le relief situé à la surface du globe. La température y varie tout au long de la journée (Stull, 1988) contrairement à l'atmosphère libre qui se trouve au-dessus. La pollution s'y déplace horizontalement avec le vent et verticalement avec les turbulences. En milieu urbain on trouve la couche limite urbaine caractérisée par la présence d'un îlot de chaleur.

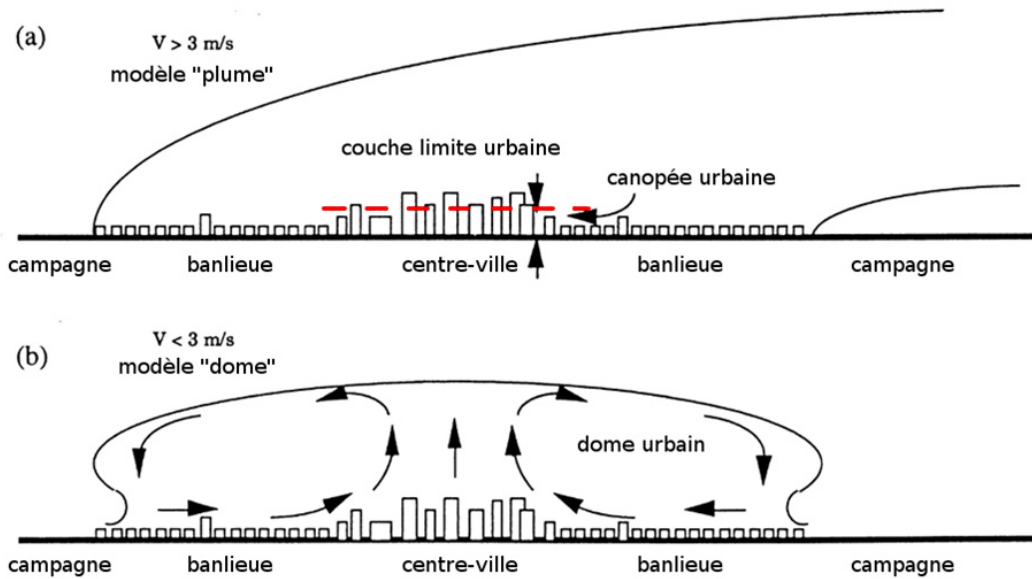


Figure I-23 : Caractérisation de la couche limite urbaine (Gyr et Rys, 1995)

L'îlot de chaleur urbain (UHI) est un phénomène qui se produit dans cette couche, il est induit par le regroupement des populations dans des agglomérations. Il est la conséquence des températures plus élevées en ville que dans les zones rurales situées à proximité, cette différence pouvant varier jusqu'à 12° comme le montre la Figure I-24, dont les données proviennent de 31 villes en Amérique du nord, Europe et d'Australasie. Cette augmentation de la température est due aux activités humaines (chauffage, pollution), à la réduction de l'apport d'air à cause des constructions empêchant la circulation du vent (Ng, 2009) et à une plus grande absorption du rayonnement solaire (Aida et Gotoh, 1982).

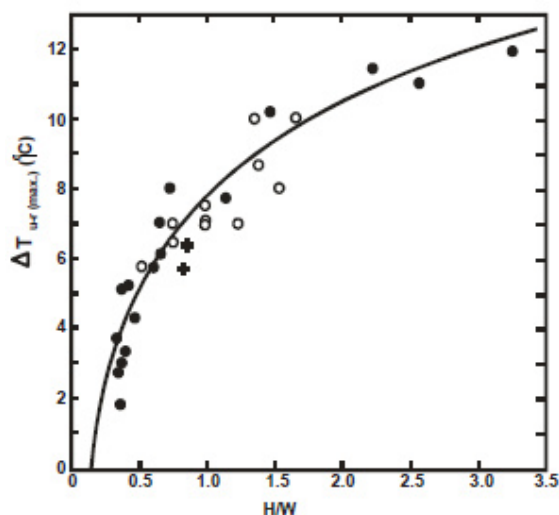


Figure I-24 : Écart de température entre une zone rurale et une zone urbaine en fonction du rapport H/W (T. R. Oke, 1988)

Les matériaux utilisés ainsi que le tissu urbain impliquent aussi une plus grande inertie par rapport à la campagne, la ville se refroidit plus lentement la nuit. Ce phénomène s'explique aussi par le manque de présence de végétation dont l'évapotranspiration permet de rafraîchir l'air. Oke a déterminé une relation empirique entre l'écart de température entre la ville et la campagne et la taille de la ville ainsi que le rapport d'aspect H/W (cf. section I.3.4). Sur le schéma du haut de la Figure I-23 on peut voir qu'il existe une limite définie par les toits des bâtiments (en rouge), sous cette limite se trouve la canopée urbaine, nommée ainsi en référence au vocabulaire utilisé pour une forêt.

Lors de ses travaux, Oke (T. Oke, 1981) a utilisé un indicateur permettant de décrire la géométrie d'une rue : le facteur de vue du ciel (SVF). Il a ainsi pu établir un lien entre ce dernier et la propension d'une ville à perdre sa chaleur durant la nuit. Nous allons décrire plusieurs indicateurs permettant de représenter la géométrie d'une rue dans le même but d'établir des relations entre des phénomènes climatiques et des morphologies de rues.

I.3.4. Les indicateurs de la géométrie urbaine

Par nature, le milieu urbain est complexe, ce qui le rend difficile à modéliser qu'il s'agisse d'une rue, d'un quartier ou d'une ville. C'est d'ailleurs sur un ensemble de tirages pseudo-aléatoires que repose le principe d'architecture procédurale : un concept utilisé pour générer des villes entières en 3D à partir du paramétrage des contraintes que doit suivre l'algorithme (Parish et Müller, 2001). Il est donc crucial de bénéficier d'outils permettant d'appliquer à n'importe quelle ville du monde des algorithmes mis au point dans des travaux de recherche. Ainsi, des indicateurs sont utilisés pour décrire le cadre géométrique dans lequel peuvent s'appliquer de telles méthodes. Ils permettent aussi de représenter plus simplement la géométrie réelle d'un ensemble de bâtiments. En effet, quelle que soit l'échelle considérée, lorsqu'il s'agit d'effectuer des simulations sur les échanges radiatifs en milieu urbain, la contrainte de temps de calcul est systématiquement considérée. Plus l'erreur souhaitée est faible, plus la taille des éléments de surface doit être petite et le nombre d'itérations des algorithmes important. Les indicateurs suivants ont été rencontrés dans des publications liées à des problématiques diverses comme la charge thermique d'un bâtiment, la capacité à utiliser la technologie PV ou l'éclairage naturel en milieu urbain. Notons que les acronymes anglais sont utilisés afin de faciliter la compréhension du document par un lecteur spécialiste qui a l'habitude de manipuler ces indicateurs.

L'un des indicateurs qui est le plus souvent utilisé pour décrire la géométrie d'un canyon urbain est le rapport de la hauteur moyenne des bâtiments H sur la largeur de la rue W (cf. Figure I-25). Il s'appelle le rapport d'aspect et se note H/W, il sera utilisé tout au long de ce document car il est mentionné dans une grande partie des références utilisées, de même les résultats seront présentés en fonction de ce dernier à l'échelle de la ville.

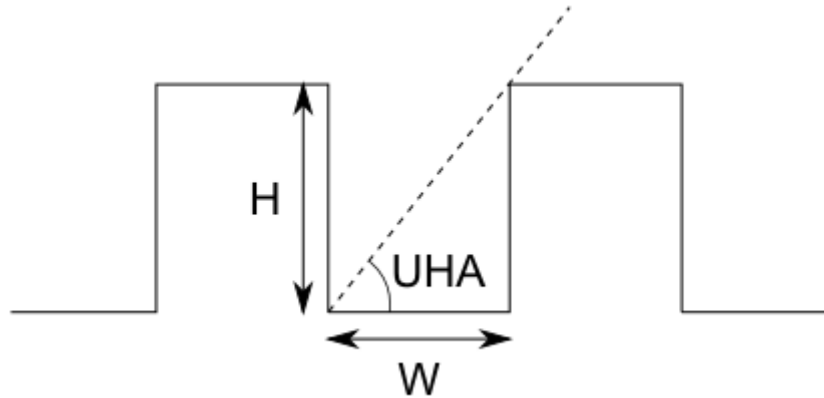


Figure I-25 : Schéma d'un canyon urbain vu de profil

Il existe un autre indicateur qui peut être lié au rapport d'aspect. Il s'agit de l'UHA pour "Urban Horizon Angle" (cf. Figure I-25). Il s'agit de la moyenne des angles sous-tendus entre l'arête horizontale supérieure des bâtiments visibles depuis un point situé sur une façade et le plan horizontal sur lequel celui-ci se trouve. Ce point peut être situé au sol (C. Ratti, Baker, et Steemers, 2005), dans ce cas la relation suivante est vérifiée :

$$\frac{H}{W} = \tan(UHA) \quad (I-7)$$

Un autre auteur utilise le même concept en considérant un point situé non pas au sol mais au milieu d'une fenêtre, l'angle est nommé OA pour "Obstruction Angle" (Yun et Steemers, 2009). Cette étude traite de l'influence de certains paramètres comme l'orientation de la rue et le type de technologie utilisée sur la production de modules PV intégrés à des façades de bâtiments.

L'indicateur suivant est lié à la position du soleil dans le ciel par rapport à la façade considérée. Le SFA pour "Solar Façade Azimuth" permet de décrire l'azimut du soleil non pas par rapport au nord comme il a déjà été mentionné dans ce document, mais par rapport au vecteur normal d'une façade donnée (Wa-Gichia, 1998). Ainsi pour SFA=180°, le soleil se trouve directement au dos de la façade, il est face à la façade pour un angle SFA de 0°. La Figure I-26 représente un schéma décrivant cet indicateur. L'auteur utilise le SFA pour évaluer l'influence de la façade d'en face pour différents rapports d'aspect. Pour ce faire, il décrit le rapport suivant :

$$\frac{-\tan(\gamma_s)}{\cos(SFA)} = \frac{H}{W} \quad (I-8)$$

Avec γ_s la hauteur angulaire du soleil. Cette relation permet de déterminer pour quelle position du soleil l'ombre projetée d'un bâtiment recouvre toute la rue.

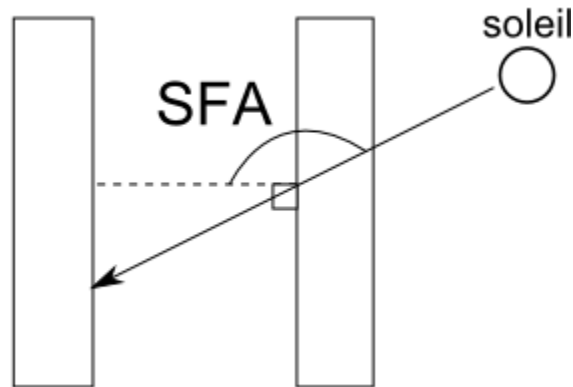


Figure I-26 : Schéma d'un canyon urbain vu de dessus permettant de définir le SFA

Le rapport de la surface d'un bâtiment par rapport à son volume (S/V) est un autre indicateur occasionnellement rencontré. Il est très utilisé dans un tout autre domaine : la biologie, car il est un facteur limitant de la croissance d'une cellule. Il est directement lié à l'effet d'échelle qui stipule que lorsque l'on multiplie la dimension d'un corps par un nombre n , sa surface est multipliée par n^2 et son volume par n^3 . Une valeur faible de S/V est caractéristique d'un grand bâtiment avec beaucoup de surface et peu de volume comme un gratte-ciel. Au contraire, un bâtiment très compact, moins étendu, comme un cube, possède une valeur de S/V plus élevée, la sphère étant la forme qui maximise le volume par rapport à la surface extérieure. Cet indicateur est intéressant car plus un corps possède un S/V élevé, plus ses pertes thermiques sont importantes du fait d'une grande surface d'échange avec l'extérieur. Cependant, ce principe n'est pas applicable à un bâtiment, en réduisant par exemple la surface d'échange d'un bâtiment, ses pertes thermiques durant l'hiver seront amoindries mais aussi sa capacité à bénéficier de la lumière du jour augmentant ainsi sa consommation d'énergie pour l'éclairage artificiel (C. Ratti *et al.*, 2005).

Le facteur de vue du ciel noté SVF (Sky View Factor) correspond au rapport de la surface de ciel visible depuis une surface plane par rapport à la surface totale du ciel. Cet indicateur est le plus souvent utilisé pour décrire les canyons urbains. Les paragraphes suivants traitent donc de ce dernier de façon plus détaillée que pour les précédents indicateurs. Il s'agit d'une valeur sans unité variant de 0 (vue du ciel totalement obstruée) à 1 (vue du ciel totalement dégagée). En l'absence d'obstruction, une surface plane verticale possède un SVF de 0,5, une surface plane horizontale possède un SVF de 1. Depuis les travaux de Oke pendant les années 80 (T. Oke, 1981), le SVF est toujours utilisé comme indicateur de référence du climat urbain. Par exemple, une relation entre l'éclairement global horizontal (EEG) au milieu d'une rue et le SVF a été observée à partir de simulations (Kakon et Nobuo, 2009), cette corrélation permet d'évaluer l'accès à la lumière naturelle en fonction des obstructions intrinsèques du milieu urbain. En effet, plus la valeur de SVF est élevée, plus l'accès au soleil et au ciel est important. Les résultats de cette étude suggèrent que pour un même mois, il existe une relation linéaire entre des valeurs ponctuelles de SVF et EEG, pour différentes conditions de ciel, avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,8. Nous allons décrire différentes méthodes qui permettent de calculer le SVF puis des comparaisons qui ont été effectuées entre celles-ci.

Le SVF a tout d'abord été déterminé pour des canyons de longueur infinie. En effet, cette configuration permet d'effectuer des simplifications mathématiques, par exemple il est possible de donner une relation entre le rapport d'aspect H/W et le SVF (Sparrow et Cess, 1970) :

$$SVF = \sqrt{1 + \left(\frac{H}{W}\right)^2} - \frac{H}{W} \quad (I-9)$$

Une autre approche (Leung et Steemers, 2008) a été mise en œuvre pour déterminer le SVF moyen pour un ensemble de bâtiments de forme identique alignés selon une grille. Ainsi il a été montré qu'il est possible d'utiliser la formule suivante avec un coefficient de corrélation de 0,942 et ce pour différentes formes :

$$SVF_{moy} = 1,342 \times \left(\frac{GA}{GA + WA}\right) \quad (I-10)$$

Avec GA (Ground Area) la surface au sol totale et WA (Wall Area) la surface totale de façades pour un seul bâtiment comme le montre la Figure I-27.

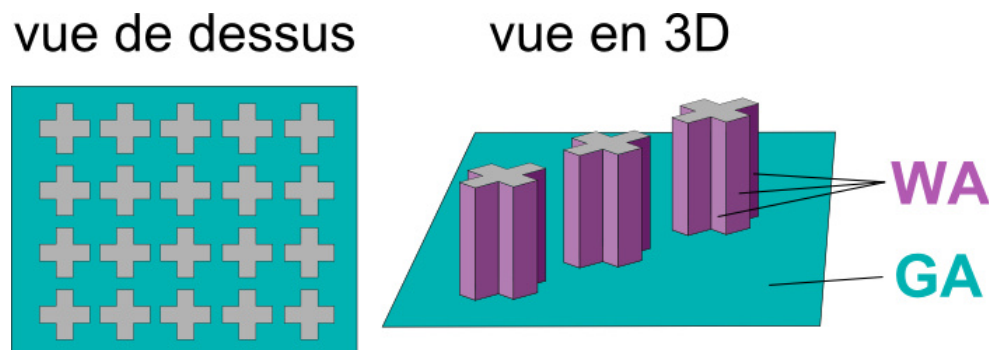


Figure I-27 : Schéma d'une grille de bâtiments en forme de croix (à gauche) et vue en 3D du profil de ces bâtiments (à droite)

Cependant, le SVF calculé à partir des méthodes précédemment décrites ne correspond qu'à un canyon idéal, une telle rue n'existe pas en réalité. Ainsi, il a été mis au point des formules généralisées pour pouvoir être utilisée avec un canyon de longueur finie et des bâtiments de hauteurs différentes (Johnson et Watson, 1984). À la fin de cet article est présentée une méthode alternative qui permet de calculer le SVF lorsque la hauteur et l'azimut des points les plus hauts des bâtiments sont connus. Une méthode graphique a été mise au point à partir de ces équations (Watson et Johnson, 1987). Cependant elle ne permet pas d'obtenir rapidement le SVF de toute une rue du fait de la nécessité d'effectuer un grand nombre de mesures. En effet, il est nécessaire de relever manuellement des longueurs et des angles sur le terrain.

C'est pour faciliter ce travail qu'a été mis au point le procédé à base de photographie fisheye (Steyn, 1980). Le concept repose sur un appareil photo équipé d'un

objectif fisheye offrant un angle de vue de 180 degrés et réalisant une projection de l'espace proche de la projection équidistante (cf. section III.2.2.2). L'appareil peut être placé horizontalement sur un véhicule mobile, orienté vers le ciel, afin de prendre de nombreuses photographies du ciel, depuis le milieu de la rue, à une hauteur idéalement la plus faible possible. Cela nécessite un traitement des images mais réduit le temps mis sur le terrain et offre la possibilité de calculer des SVF pour des quartiers entiers. Une fois la photo imprimée, un diagramme polaire lui est superposé. Ce dernier représente un découpage du disque qui contient l'image en 37 anneaux (cf. Figure I-28). Chaque anneau représente la même surface de l'hémisphère une fois projeté sur le plan. L'analyse est manuelle, il faut déterminer l'étendue de chaque anneau qui correspond au ciel et appliquer cette valeur dans une formule qui permet d'obtenir le facteur de vue pour cet anneau. La somme des facteurs de tous les anneaux donne le SVF. L'idée a été reprise en utilisant une tablette graphique pour améliorer le temps de traitement de l'image en ayant une précision au moins identique (Holmer, 1992). De nos jours, cette méthode pourrait être améliorée grâce aux nouveaux périphériques de saisie (tablette graphique tactile) et automatisée grâce à des algorithmes de traitement d'image. La méthode a d'ailleurs été reprise dans le cadre du développement du logiciel BMSky-View de calcul de SVF à partir de photos fisheye (Rzepa, 2009). L'automatisation permet ainsi d'obtenir une carte des SVF pour tout un centre-ville avec une mesure tous les mètres, de même, cela permet de traiter au grand nombre de données dans le temps, permettant ainsi d'évaluer l'influence de la modification de la végétation en fonction des saisons. L'étude de Rzepa a permis d'observer un écart entre les valeurs maximales et minimales allant de 0,3 à 0,5 sur une année complète, les valeurs maximales étant observées durant l'hiver et les valeurs minimales durant l'été.

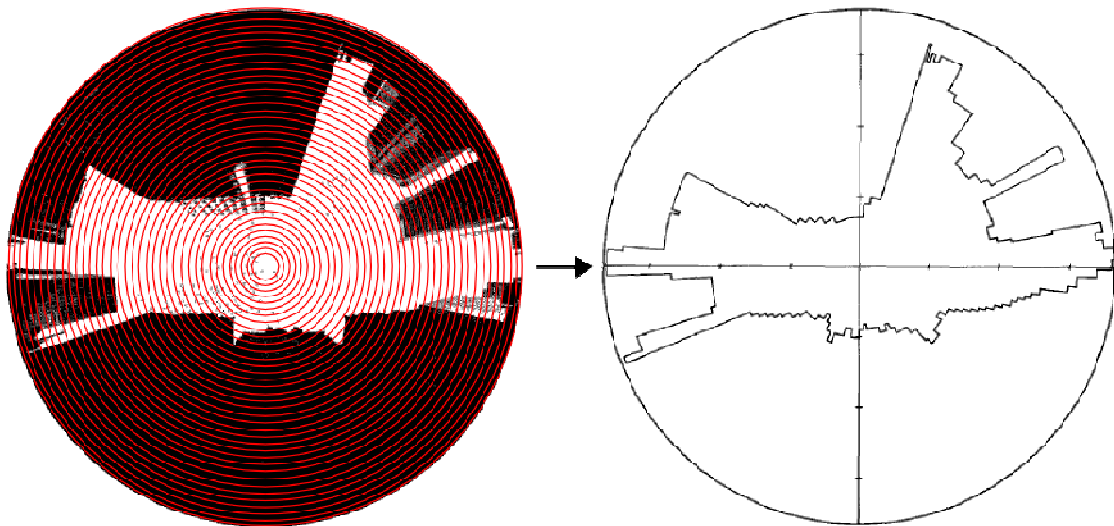


Figure I-28 : Découpage d'une photo fisheye en anneaux pour estimer le SVF

L'utilisation d'un objectif fisheye donne les meilleurs résultats d'après une comparaison entre différentes méthodes d'estimation du SVF (Grimmond, Potter, Zutter, et Souch, 2001). En effet, ce dernier permet d'obtenir de l'information sur l'obstruction réelle alors que ce n'est pas possible avec les méthodes analytiques. De plus cette méthode permet d'obtenir des résultats très rapidement avec éventuellement un léger traitement d'image visant à éliminer les sources d'erreur.

Une autre méthode a été mise au point pour pouvoir fonctionner avec une caméra vidéo (Steyn, Hay, Watson, et Johnson, 1986). Bien que l'acquisition des images en utilisant ce procédé puisse être utile pour améliorer la vitesse de captation des données, le traitement des images reste un point sensible. Une technique triviale consiste à définir une valeur seuil qui permet de délimiter les pixels appartenant au ciel de ceux qui représentent des obstructions. Cette méthode a permis d'obtenir une erreur inférieure à 5% dans le cas de l'étude menée par l'auteur par rapport à la méthode géométrique précédemment décrite. Cette valeur de seuil est représentative de l'écart entre la luminosité du ciel et la luminosité du reste, c'est pourquoi ces images doivent être prises en condition de ciel couvert afin d'éviter toute réflexion spéculaire qui pourrait se produire à la surface des bâtiments à cause d'un ciel trop lumineux.

Une méthode a été développée pour estimer le SVF à partir d'un récepteur GPS (Chapman, Thornes, et Bradley, 2002). Il s'agit d'utiliser le rapport entre le signal et le bruit captés par l'antenne de l'appareil. Le système GPS comprend une constellation de 24 satellites, si un minimum de 3 est nécessaire pour obtenir sa position (4 avec l'altitude) il est possible de recevoir jusqu'à 9 signaux simultanément. En milieu urbain, les satellites cachés par les bâtiments ont un rapport signal/bruit plus faible que ceux qui ne sont pas cachés. Avec ce concept, l'auteur a réussi à obtenir un coefficient de corrélation de R^2 de 88% pour 28 points de mesure par rapport à la méthode basée sur des photographies avec un objectif fisheye. Suite à cette réussite, un réseau de neurones a été généré pour améliorer les performances du calcul à partir de données GPS (Chapman et Thornes, 2004). Les résultats se sont avérés moins bons mais ouvrent des perspectives intéressantes.

D'autres auteurs ont réutilisé une méthode existante de traitement d'images (Richens, 1997) pour calculer le SVF pour une grande surface urbaine tout en conservant un temps de calcul très réduit (C. Ratti et Richens, 1999). Cette méthode ne dépend pas de la complexité de la géométrie mais uniquement de la surface de l'image à traiter. L'image utilisée représente un modèle numérique d'élévation (MNE) du milieu urbain à étudier en niveaux de gris comme le montre la Figure I-29.

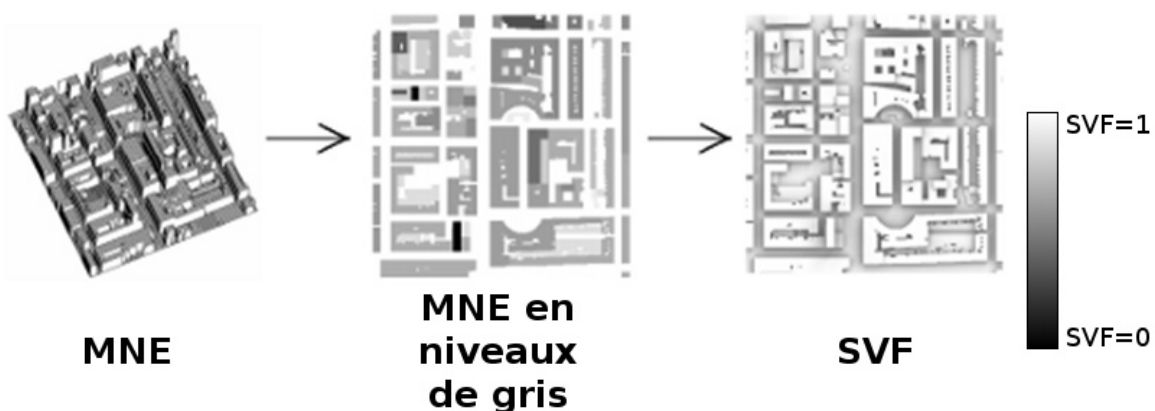


Figure I-29 : Calcul du SVF à l'aide d'un traitement d'image

L'image résultante en niveaux de gris donne le SVF en chaque point. Pour l'obtenir, un nombre donné de sources lumineuses représentant un maillage du ciel est choisi, la visibilité

de chaque source est comptabilisée pour chaque point, le poids des points représente le SVF. Pour obtenir un résultat correct, le maillage des sources doit être régulier, de plus, un nombre de points élevé garantit une meilleure précision. Cette même méthode a été utilisée pour calculer l'enveloppe solaire d'un bâtiment en milieu urbain dans le cadre du développement du logiciel Sunscape (Morello et Ratti, 2009).

Une méthode de calcul du SVF depuis une photographie fisheye a été comparée au calcul de ce dernier à partir d'une base de données 3D de bâtiments (Gal, Rzepa, Gromek, et Unger, 2007). La méthode photographique de Steyn précédemment citée est utilisée. La méthode 3D consiste à projeter les bâtiments vus depuis le point dont on veut connaître le SVF sur l'hémisphère, puis à calculer la surface occupée sur cet hémisphère par les formes projetées. La méthode photographique s'avère de meilleure qualité à cause de la présence de végétation qui n'est pas définie dans la base de données 3D, ainsi la méthode 3D surestime le SVF réel de 10% en moyenne. L'auteur conclut que la méthode photographique est très adaptée aux mesures en milieu urbain et qu'il s'agit donc d'une bonne source de référence pour tester les modèles informatiques.

La même comparaison entre une méthode basée sur des photos fisheye et des calculs en 3D avait été effectuée antérieurement (Brown, Grimmond, et Ratti, 2001), l'écart moyen mesuré entre les deux méthodes est de moins de 7%, cependant ces résultats montrent que la méthode photographique donne des résultats supérieurs à la méthode 3D. Les auteurs estiment que la résolution de la base de données 3D (2 m/px) risque d'être à l'origine d'erreurs, de plus les toits des bâtiments sont supposés plats, sachant que la hauteur des bâtiments mitoyens est une valeur moyenne de la hauteur de chacun, ce qui pourrait expliquer l'infériorité de la méthode 3D. Quoiqu'il en soit, ces résultats expriment l'importance de disposer d'une base de données de bonne qualité, tant au niveau de la résolution que de la fidélité de la représentation des bâtiments modélisés par rapport aux bâtiments réels.

Une autre comparaison (Gal, Lindberg, et Unger, 2009) a été effectuée entre la méthode basée sur une image matricielle en niveaux de gris et le calcul depuis la projection en 3D de bâtiments d'une base de données vectorielles utilisée par Oke. Cette comparaison montre que les deux méthodes donnent des résultats identiques avec un coefficient de corrélation de 1,01. La différence étant expliquée par la résolution de l'image. Le calcul pour une petite ville ayant mis 38 heures pour la méthode avec image matricielle et 12 jours pour la méthode vectorielle, son intérêt est validé à grande échelle.

Le facteur de vue du ciel est donc largement documenté et depuis de nombreuses années, cet indicateur est une référence en matière d'échanges radiatifs et d'estimation de la quantité de rayonnement au sein d'une rue. Des outils ont été développés spécifiquement pour le calculer comme 3DSkyView (Souza, Rodrigues, et Mendes, 2003) ou SkyHelios (Matuschek et Matzarakis, 2010). Dans la section III.1.6, le SVF est calculé pour un ensemble de rues à partir d'une méthode photographique, les valeurs obtenues sont comparées avec des valeurs calculées à partir de la hauteur H des bâtiments et la largeur W de la rue. Cela permet d'estimer s'il est possible de passer d'un indicateur à l'autre avec une erreur moindre.

I.3.5. Études liées à l'éclairage des bâtiments

Le facteur de lumière du jour (ou DF, pour Daylight Factor) est un indicateur très largement utilisé pour déterminer l'accès à la lumière naturelle en un point à l'intérieur d'un bâtiment. Il s'agit du rapport entre l'éclairement intérieur et l'éclairement extérieur horizontal, pour un même lieu, déterminé en l'absence d'obstruction et sans prendre en compte l'influence du soleil. Ce rapport varie en fonction de la répartition de la lumière sur la voûte céleste. Il est généralement calculé ou mesuré sous les conditions du ciel couvert standard CIE (cf. section II.3.4) ; l'inconvénient du ciel couvert étant qu'il ne reflète pas les différences liées à l'orientation des surfaces vitrées : ainsi le DF aura la même valeur quelle que soit l'orientation de la surface vitrée. Une approche plus juste basée sur des données climatiques (CBDM) peut être utilisée (Mardaljevic, Heschong, et Lee, 2009). L'idée de l'approche climatique est de déterminer le rapport de proportionnalité entre l'éclairement d'un point de la pièce et la luminance d'une zone du ciel. Le ciel étant divisé en zones, cela permet de s'affranchir de la limitation du DF induite par le fait qu'il dépend de la distribution des luminances du ciel. Cette approche permet, en combinant les luminances de chacune des zones avec leur influence en un point, d'obtenir l'éclairement intérieur résultant de n'importe quel type de ciel et pas seulement du ciel couvert.

Cette approche donne donc des résultats dépendant du climat local mais aussi de l'orientation des bâtiments du fait de la prise en compte de la position du soleil. Les auteurs insistent notamment sur le fait que les indicateurs de disponibilité de la lumière naturelle basés sur le DF par ciel couvert ne sont pas adaptés au phénomène considéré, lequel varie tout au long de la journée et tout au long de l'année. L'éclairement lumineux sur un plan de travail horizontal est habituellement utilisé pour définir les niveaux réglementaires (généralement entre 300 lux et 500 lux en fonction de la tâche considérée), mais d'autres idées sont proposées. Par exemple, la considération des niveaux d'éclairement perçus à la hauteur des yeux ou la considération des luminances dans le champ de vision des occupants. Cela permet d'évaluer et/ou limiter le risque d'éblouissement qui peut survenir en milieu urbain par exemple, du fait de la réflexion du rayonnement solaire sur les vitres des bâtiments opposés. Ces indicateurs peuvent être donnés sous forme de valeurs mensuelles cumulées pour obtenir des valeurs approchées de l'accès à la lumière en fonction de la saison, ou de séries temporelles permettant par exemple de déterminer les stratégies de pilotages de stores motorisés. Une application de ce type d'approche a été effectuée par Mardaljevic afin d'évaluer l'influence de la construction d'une tour dans la ville de New York, sur l'accès à la lumière naturelle d'un bâtiment existant juste à côté de la tour (Mardaljevic, 2006). Le bâtiment existant ayant des ouvertures orientées vers le nord, la lumière à l'intérieur des pièces situées sous le toit dépend du climat et des réflexions sur les bâtiments alentours. La méthode CBDM s'est donc avérée plus pertinente que la simple utilisation du DF ou de méthodes n'utilisant que la détection de masques d'ombrages (le bâtiment ne recevant pas de rayonnement solaire direct). L'influence du facteur de réflexion lumineux des façades de la tour a été mise en évidence à l'aide de cartes de luminances cumulatives pour une année type du climat local comme le montre la Figure I-30. Les cartes représentent une vue de dessus des fenêtres de toit du bâtiment qui subit l'influence de la tour. Les valeurs écrites en noir correspondent à l'éclairement annuel total reçu par les deux surfaces vitrées, les valeurs sur fond noir sont des moyennes pondérées par la surface des

fenêtres. Ce facteur de réflexion a une influence non négligeable sur la quantité de lumière sur le toit du bâtiment existant.

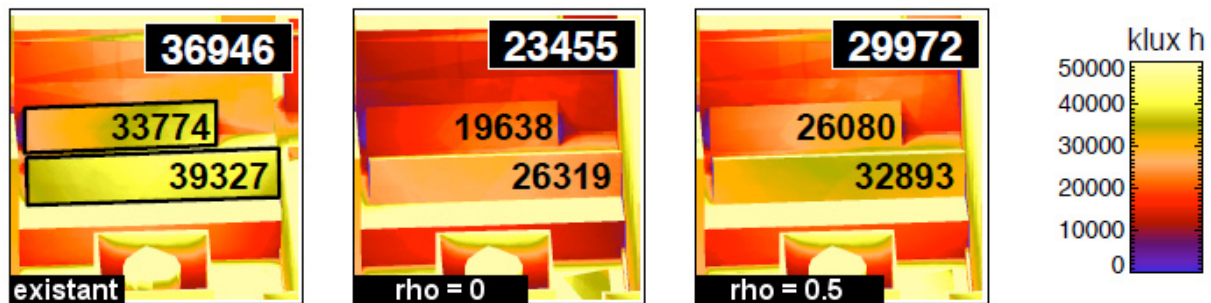


Figure I-30 : Éclairage lumineux annuel, sans la tour (à gauche), et avec la tour avec un facteur de réflexion (ρ) de 0 (au milieu) ou de 0,5 (à droite)

La considération de l'accès à la lumière s'effectue généralement à l'intérieur du bâtiment, les méthodes basées sur le DF sont souvent préférées du fait de la simplification des calculs comme le remarque Mardaljevic. C'est à l'intérieur du bâtiment que se trouvent les préoccupations liées à l'éclairage, comme la consommation d'énergie ou les niveaux minimums légaux. Cependant la connaissance de l'accès à la lumière d'une façade permet de disposer des informations nécessaires pour étudier son accès à l'intérieur des bâtiments. La section suivante se focalise sur l'exploitation de l'énergie solaire reçue sur ces façades et sur les toits des bâtiments en vue de produire de l'électricité.

I.3.6. Études liées au photovoltaïque

L'un des avantages de l'exploitation de l'énergie solaire est d'être disponible et utilisable en milieu urbain. Sachant que les villes consomment environ 70% de l'électricité produite dans le monde, l'utilisation de cette technologie peut permettre de réduire les coûts de transport qui représentent une partie conséquente du prix de l'électricité. La technologie PV représente un axe de développement de la distribution intelligente d'électricité (smart grid). Ce concept vise à utiliser un réseau de distribution décentralisé afin de minimiser les pertes en lignes et les risques de coupure électrique en cas de panne tout en permettant de réguler la production en fonction de la consommation. La technologie PV a l'avantage de permettre l'installation dans les villes de centrales modestes mais viables et avec de moindres risques, relativement aux autres types de centrales renouvelable ou non (nucléaire, charbon, éolien). Les risques existants sont inhérents à la gestion de l'électricité (incendie, électrisation/électrocution). Cependant l'environnement urbain est par nature un milieu peu propice au développement de cette technologie. Les modules doivent bénéficier d'un ensoleillement maximal pour pouvoir produire de l'électricité : toute obstruction au soleil porte atteinte à la viabilité de cette option. Néanmoins, l'utilisation de cellules PV présente d'autres intérêts, en effet, cette technologie adaptable peut être combinée avec des matériaux de revêtement de construction traditionnels ou même les remplacer du fait de leur solidité, de leur imperméabilité à l'eau ainsi que la possibilité de créer de l'ombrage (Barker *et al.*, 2001). Les modules PV peuvent aussi servir pour l'isolation thermique (Watt, 2001)

et être intégrés à des murs antibruit (Frölich, 2000). La moitié des bâtiments déjà construits existeront toujours d'ici 2050. Or, l'énergie nécessaire à leur démolition et leur remplacement est telle, qu'elle ne peut être compensée par les économies réalisées par les nouvelles constructions (UNEP, 2012). Il est donc important de trouver des solutions qui permettent d'augmenter leur efficacité énergétique et la technologie PV en fait partie.

I.3.6.1. Sur les toits

La société kiloWattsol qui a financé cette thèse est un bureau d'étude dont l'expertise consiste à estimer le productible électrique d'une centrale photovoltaïque en fonction de tous les paramètres qui agissent sur le rendement de l'installation. Durant cette thèse, la société a contracté une demande d'un client concernant le potentiel offert par de nombreux immeubles d'habitations : le projet pour le groupe SNI (Société Nationale Immobilière). Il s'agissait d'estimer la quantité d'électricité qui pourrait être revendue à EDF en considérant 626 bâtiments de natures différentes sur tout le territoire français. Un outil a été développé pour délimiter manuellement la surface totale du toit de chacun de ces bâtiments directement à partir de l'outil Google Maps. Cette méthode évite de devoir importer et mettre à l'échelle des cartes comme cela a pu être fait dans d'autres travaux (Ordóñez, Jadraque, Alegre, et Martínez, 2010). Les obstructions ont aussi été marquées et réparties en 3 catégories en fonction de leur importance comme le montre la Figure I-31.



Figure I-31 : Résultat du calepinage d'un bâtiment avec prise en compte des obstacles et de leur ombre portée (225 modules soit 38 kWc pour 972 m²)

Le type de module ayant été imposé, un programme a été développé pour effectuer le calepinage de façon à optimiser la production électrique, non seulement par rapport à la quantité maximale de modules qu'il est possible d'installer mais surtout par rapport à la production électrique la plus élevée possible en considérant les ombrages et le climat. Cette étude, à laquelle l'auteur de cette thèse a contribué, est très intéressante car elle permet d'apprécier le potentiel de toits sur tout le territoire français en matière de génération d'électricité à partir de la ressource solaire. Ces données peuvent aussi servir pour l'énergie solaire thermique.

Sur la totalité des toitures, 153 présentaient une pente qui a dû être prise en compte dans la chaîne de calcul. Seuls 48% de ces 153 toits en pente autorisaient une surface exploitable pour la génération d'énergie solaire PV. Avec une puissance crête cumulée de 5,6 MWc, pour une surface totale cumulée de 252 115 m² dont seulement 17% était exploitable, ces toits en pente offraient une densité de puissance électrique nominale de 22,3 Wc/m². Le watt-crête (Wc) est une unité permettant de décrire la puissance nominale d'un module suite à un étalonnage selon des conditions normalisées (cf. annexe G). À titre comparatif, nous avons vu dans la section I.2.2.2 que la centrale PV la plus grande de France en 2012 (Toul-Rosières) possède une puissance crête de 115 MWc pour une emprise au sol de 120 hectares, soit 95,8 Wc/m².

Concernant les 273 toits plats, il y avait 45% de bâtiments dignes d'intérêt pour une surface exploitable finale représentant 35% de la surface totale. La quantité de module représentait une puissance cumulée de 11,6 MWc, soit une densité de puissance de 46 Wc/m². Cela représente la moitié de la valeur pour la centrale de Toul-Rosières, mais notons que le rapport de la puissance réellement produite peut être nettement inférieur étant donné que la disposition des modules est optimale pour la centrale au sol. Cela n'est pas le cas pour des modules placés sur des toits plats, donc horizontalement, du moins pour des bâtiments situés en France métropolitaine. De plus, si le productible électrique est bien réel, les coûts d'installation et de maintenance pour de telles installations ne justifient pas leur réalisation, le choix de la viabilité d'un projet dépend de nombreux facteurs tels que le climat, le coût du matériel et de la main d'œuvre ou encore l'acceptabilité du risque des investisseurs.

Il est courant de trouver, dans la littérature, des articles effectuant des analyses du potentiel de production électrique par le PV pour un territoire entier. Cela traduit la capacité du PV à répondre aux contraintes énergétiques d'un pays. Lehmann et Peter ont ainsi trouvé une relation statistique entre la densité de population et la quantité de surface de toit par habitant pour une région de l'Allemagne : la Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Lehmann et Peter, 2003). Cette relation est relativement linéaire si l'on considère des bâtiments résidentiels. Grâce à une telle information, les auteurs estiment que la surface totale de toit disponible pour l'installation de centrales d'exploitation du gisement solaire est de 750 km² pour la France, avec 398 km² de surface pour les façades. Pour obtenir ces surfaces, Lehman et Peter ont utilisé la densité de population du pays dans la relation statistique qu'ils ont obtenu. Afin de prendre en compte les éventuels obstacles présents sur le toit, un facteur de 0,9 a été appliqué aux valeurs originales provenant du modèle

La surface de toit totale pour la France, incluant les obstacles, est donc de 833 km² (soit 750 km²/0,9). En appliquant la valeur de 35% de surface utilisable pour l'exploitation de l'énergie solaire à l'aide de modules PV sur la surface déduite de l'étude de kiloWattsol, la surface nationale de toit plat disponible pour l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque serait de l'ordre de 288 km².

La consommation d'électricité en France en 2011 pour les habitations représente le secteur le plus énergivore avec 50,2 Mtep soit 30% de l'électricité consommée (SOeS, 2012). Cela correspond à 584 TWh, sachant que 1 Mtep correspond à 11,63 TWh (IEA, 2012b). En considérant qu'il faut une surface de 6,7 m² pour installer 1 kWc de modules PV (cf. annexe G) et qu'en France le rendement spécifique d'une installation en toiture est

d'environ 1200 kWh/kWc, la surface de toit nécessaire pour produire autant d'énergie pour le logement qu'il en est consommé est de 3261 km². D'après ces résultats, couvrir de modules PV tous les toits de France ne permettrait de produire qu'environ 9% (288 km²/3261 km²) de l'électricité consommée par ces mêmes bâtiments. Cette étude montre qu'un intérêt réel est porté sur la connaissance du potentiel des toits en matière de production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Cependant, les résultats montrent aussi que l'utilisation de la technologie PV seule ne peut pas répondre à la demande d'énergie bien qu'elle puisse représenter une part relativement importante de la production.

Le même type d'étude a été mené en Israël (Vardimon, 2011) en utilisant un système d'information géographique (SIG) (cf. section II.5.1) disposant de l'information sur les surfaces de toit de 1,2 millions de bâtiments. Une valeur conservatrice de 30% de surface exploitable a été choisie, en ne considérant que les toitures d'une superficie supérieure à 800 m². Pour tout type de bâtiment, le potentiel PV est de 7% de la consommation nationale d'Israël. Le fait d'exploiter seulement les toits au-delà d'une certaine superficie est dû aux coûts de maintenance et de mise en œuvre précédemment énoncés.

Une autre étude menée à l'échelle d'un quartier a tenté de représenter la part d'énergie qui peut être produite par un système PV sur les bâtiments par rapport à la demande d'énergie de ce quartier (Cellura, Di Gangi, Longo, et Orioli, 2012). Les résultats, qui prennent en compte à la fois les toits plats et les toits en pente, montrent que dans le cas présenté, l'installation de modules PV pourrait parvenir à couvrir près de 36% de la demande d'énergie des bâtiments. Toutefois, en prenant en compte uniquement des installations économiquement viables, ce taux de couverture s'abaisse à 24%, ce qui reste supérieur aux chiffres annoncés dans le paragraphe précédent. Cela ne s'oppose pas nécessairement à l'existence de bâtiments à énergie positive, car les consommations utilisées correspondent à des bâtiments anciens.

L'utilisation de la technologie PV en tant que part importante de la production d'énergie est cependant limitée par les contraintes du réseau électrique traditionnel. En effet, les centrales existantes (nucléaire ou charbon par exemple) nécessitent de produire un minimum pour pouvoir être maintenues dans un état stable (Denholm et Margolis, 2006). De plus, du fait de leur caractère intermittent, les énergies renouvelables (particulièrement le PV et l'éolien) peuvent être à l'origine de variations rapides de la puissance disponible sur le réseau. L'énergie produite doit être quasiment identique à l'énergie demandée pour maintenir le réseau dans un état stable. Or les sources traditionnelles comme le nucléaire ne peuvent pas compenser aussi rapidement ces variations du fait de leur inertie, ce qui peut, dans le pire des cas, être à l'origine d'un blackout. Denholm et Margolis montrent qu'en l'état actuel, le réseau des États-Unis ne peut pas accepter plus de 10% à 15% d'électricité provenant de l'énergie solaire pour une région sans poser de problèmes de gestion du réseau. Ce pourcentage s'appelle le taux de pénétration. En France, ce taux s'élève à 30% pour les réseaux insulaires (la Corse par exemple). Ces problèmes de gestion de la distribution peuvent être résolus par la mise en place des réseaux intelligents mentionnés au début de cette section.

I.3.6.2. Sur les façades

L'utilisation de la technologie PV en façade est intéressante du fait de l'ensemble des bénéfices qu'elle peut apporter au bâtiment. Toutefois, la production d'énergie reste souvent le premier objectif. Aussi, pour évaluer l'influence de l'environnement urbain sur l'énergie produite, une méthode possible consiste à déterminer cette énergie avec et sans considération de l'environnement urbain et à comparer les deux (Yun et Steemers, 2009). Dans leur étude, Yun et Steemers calculent la production d'énergie de différents types d'intégration de modules PV sur la façade d'une pièce avec une fenêtre exposée plein sud sur laquelle se trouvent les modules PV. Les obstructions sont quantifiées à l'aide de l'indicateur OA (cf. section I.3.4). Il est ainsi possible de définir le niveau de pertinence d'installer des modules PV en façade en fonction du lieu. La méthode utilisée permet également d'évaluer les performances thermiques du bâtiment en fonction des différents paramètres étudiés tels que l'orientation de la rue, le taux de vitrage de la façade et le type de technologie installée. Cette approche paramétrique est intéressante car elle permet d'exploiter la technologie PV en milieu urbain en prenant en compte les différentes formes qu'elle peut revêtir. De même il est possible d'établir un compromis entre la performance du bâtiment (qui peut prendre en compte le confort des occupants), la production d'énergie et l'esthétique de la façade.

La quantité d'énergie que peut collecter la façade d'un bâtiment, dépend directement de son accès au soleil. Une étude basée sur des simulations sur une géométrie 3D, avec le logiciel Heliodon (ne considérant que le rayonnement direct) montre que l'orientation optimale d'un canyon urbain pour maximiser son accès au soleil dépend du rapport d'aspect de ce canyon (Coch Roura et Curreli, 2013). Les auteurs montrent qu'il est possible de maximiser le potentiel solaire des façades en choisissant un couple orientation/rapport d'aspect optimal pour un bâtiment. Toutefois, si d'un point de vue quantitatif, cela permet de collecter la plus grande quantité d'énergie possible, d'un point de vue qualitatif, le bâtiment se retrouve avec une façade fortement exposée par rapport aux autres. Ce type de configuration mène à une forte hétérogénéité du confort des appartements comme cela a été observé dans l'écoquartier de la ZAC de Bonne (cf. section I.1.3.1).

Il est aussi possible d'optimiser la forme des bâtiments afin de maximiser la quantité d'énergie solaire reçue par les modules PV en façade (Lobaccaro, Fiorito, Masera, et Prasad, 2012). Cette étude présente l'énergie collectée par la façade d'un bâtiment en fonction de sa forme ; les formes utilisées sont visibles sur la Figure I-32. Les résultats montrent aussi que le facteur de réflexion du sol a une influence non négligeable sur l'énergie collectée : un gain moyen annuel de 8% entre un facteur de réflexion de 0 (pas de réflexion, revêtement noir mat idéal par exemple) et un facteur de réflexion de 0,15. Ces résultats sont quantitatifs, cela signifie qu'ils sont donnés pour un bâtiment entier. Cependant il est possible, avec les mêmes outils, de générer une carte de la répartition de l'énergie sur la façade afin de savoir quelles sont les zones les plus exposées. Ce type de représentation permet par exemple de déterminer la partie de la façade qui est davantage sensible à une variation du facteur de réflexion du sol.

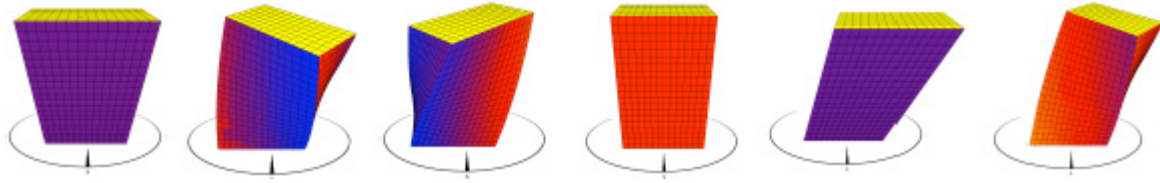


Figure I-32 : Différentes enveloppes de bâtiments évaluées pour l'analyse de la forme permettant de collecter un maximum d'énergie solaire (Lobaccaro et al., 2012), la signification des couleurs n'est pas donnée dans l'article

Les outils de simulation de rayonnement solaire permettent donc d'effectuer des études paramétriques permettant de mettre au point des formes de bâtiments optimisées pour le PV. Cependant, il faut rester prudent car l'exposition au rayonnement solaire a des conséquences sur la charge thermique du bâtiment. Il faut alors veiller à ce que le gain d'énergie apporté par les modules PV ne soit pas annulé par la consommation d'énergie utilisée pour climatiser le bâtiment par exemple. C'est toutefois rarement le cas, car les modules PV absorbent l'énergie, si bien que le bâtiment en reçoit moins et cela entraîne une baisse de la consommation pour la climatisation. De plus, le mode d'intégration au bâtiment peut permettre de renforcer l'isolation énergétique du bâtiment, c'est par exemple le cas, si une lame d'air non ventilée peut être maintenue entre les modules et la paroi du bâtiment (Wang, Tian, Ren, Zhu, et Wang, 2006).

Les travaux de Yun et Steemers mentionnés précédemment mettent en évidence la forte influence de l'obstruction sur la production d'énergie (Yun et Steemers, 2009). En fonction de la densité de constructions, différentes stratégies d'intégration des panneaux peuvent être utilisées. Par exemple dans un milieu urbain dense, la quantité d'énergie disponible sur les façades des bâtiments risque d'être insuffisante. Cependant la surface de toit peut toujours être exploitée, une hauteur uniforme de hauteur des bâtiments sera alors un gage de fort potentiel car les obstructions seront moindres (Cheng *et al.*, 2006).

I.4. Objectifs et démarche de notre étude

Le développement des villes induit des problèmes de gestion de l'énergie. Non seulement les ressources fossiles s'épuisent, mais la recherche du confort de la population augmente avec son niveau de vie. De ce fait, le milieu urbain représente un axe majeur pour réduire la consommation d'énergie. La concentration de la population peut mener à une croissance "verticale" des villes. Or nous avons vu que la hauteur des bâtiments, dans un canyon urbain, avait une influence sur différents paramètres tels que l'accès à la lumière naturelle, l'accumulation de pollution et la dissipation de la chaleur (problème d'îlot de chaleur urbain). Afin de consommer moins d'énergie, nous avons vu qu'il était nécessaire de disposer de bâtiments voire de quartiers autonomes en énergie. Pour atteindre cet objectif, il faut faire appel à une variété d'approches, nous nous sommes focalisés sur l'exploitation de l'énergie solaire. Cette ressource gratuite offre un potentiel de production d'énergie : PV et solaire thermique, mais aussi d'économie d'énergie : l'apport d'éclairage naturel, contrôlé pour éviter les surchauffes d'été, permet de réduire l'utilisation de l'éclairage artificiel.

L'environnement urbain pose un problème de masques au rayonnement solaire créés par les toits et les façades. Nous avons présenté des méthodes qui ont été développées pour évaluer l'impact du tissu urbain sur la disponibilité du rayonnement solaire. Les études mentionnées dans les chapitres précédents effectuent souvent des simplifications sur la géométrie urbaine et sur les conditions climatiques. Il est donc intéressant d'étudier la validité de ces approximations. Certaines études utilisent des modèles théoriques, mais la disponibilité du rayonnement solaire en milieu urbain a déjà fait l'objet de mesures (cf. section I.3.2). Nous proposons d'étudier cette disponibilité dans un canyon urbain en l'évaluant sur une maquette, dans des rues de Lyon et à l'aide de logiciels de simulation. La Figure I-33 présente ces trois approches, les flèches symbolisent la possibilité d'effectuer des comparaisons entre les éclairagements lumineux obtenus avec chacune d'entre elles.

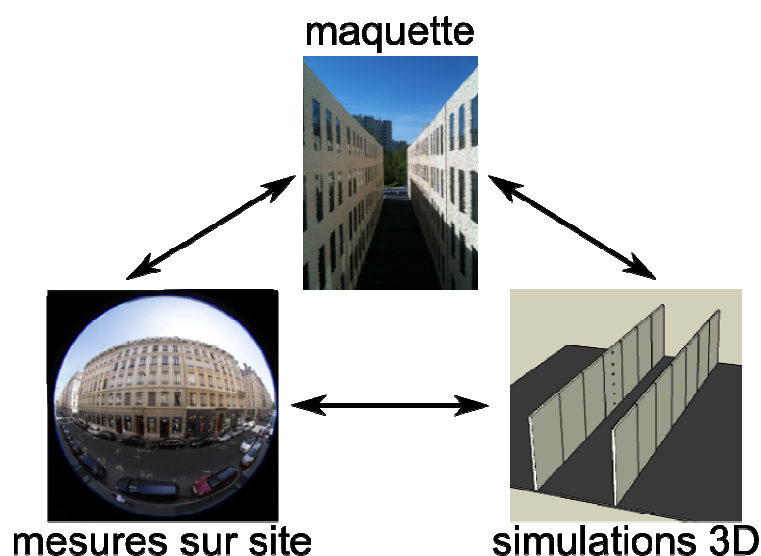


Figure I-33 : Validation de données à partir de différentes sources

L'utilisation conjointe de ces différentes approches permettra d'évaluer l'ordre de grandeur des erreurs occasionnées par les différentes simplifications. Nous nous sommes plus

particulièrement intéressés aux éclairagements lumineux à l'intérieur du canyon. Ces éclairagements peuvent être exploités pour étudier la pénétration de la lumière à l'intérieur des bâtiments ou la production d'énergie électrique par des panneaux PV installés en façade.

Des mesures ont été effectuées sur une maquette représentant un canyon urbain dont le rapport d'aspect pouvait être modifié de même que le revêtement des façades. Les éclairagements mesurés sous des conditions de ciel réels pendant un an peuvent ainsi être comparées pour ce cas simple avec des simulations en 3D. Ces simulations doivent être paramétrées avec des données équivalentes à celles du canyon : mêmes conditions climatiques, mêmes propriétés des revêtements et même géométrie. Ces simulations ont été effectuées par trois logiciels possédant des approches différentes de modélisation. La comparaison permet de valider les logiciels, mais aussi d'apporter un regard sur les approches qu'ils utilisent et l'influence des différentes simplifications qu'ils effectuent.

Des mesures ont aussi été effectuées directement en milieu urbain afin d'obtenir des données pour des rues réelles avec leur complexité naturelle. La comparaison des éclairagements lumineux mesurés sur site, avec ceux mesurés sur la maquette, permet d'évaluer l'impact de l'utilisation du modèle de canyon urbain. Ces mesures sur site ont été l'occasion de tester une méthode de cartographie des luminances des façades et de leurs éclairagements basés sur des photographies. Elles nous ont aussi permis de tester la précision des sources de données géométriques et photométriques permettant décrire le tissu urbain.

L'utilisation d'une maquette modifiable est originale par rapport aux études qui ont déjà utilisé une maquette. Un modèle théorique ou un logiciel de simulation pourrait être validé pour un type de canyon donné mais éventuellement pas pour d'autres. La maquette nous a permis de faire varier le rapport H/W ainsi que le facteur de réflexion des façades. De plus, l'utilisation de mesures sous des conditions de ciel réelles permet d'évaluer différentes approches pour des conditions autres que celles des ciels uniformes, couverts ou clairs souvent rencontrés dans d'autres études.

Dans la partie II nous allons tout d'abord présenter les bases de données et les méthodes qui permettent d'obtenir des informations sur les canyons urbains. Ces données sont nécessaires pour effectuer des simulations. Les logiciels qui les utilisent seront présentés ensuite. Dans la partie III, nous décrivons les protocoles expérimentaux que nous avons mis en place pour mesurer les éclairagements lumineux sur la maquette et dans certaines rues de Lyon. Enfin, nous présenterons dans la partie IV, l'analyse des mesures et des résultats de simulation.

Partie II - Données et outils pour la modélisation des canyons urbains

Le calcul de l'éclairement lumineux à la surface d'une façade de bâtiment en milieu urbain requiert les éléments d'information suivants :

1. Géométrie et relief urbain
2. Données photométriques
3. Données climatiques
4. Méthode de calcul d'éclairement sur l'enveloppe des bâtiments
5. Logiciel de simulation du rayonnement solaire

Le chapitre II.1 présente les éléments géographiques et géométriques qui permettent de représenter le lieu. Parmi ces données se trouvent principalement les coordonnées géographiques du lieu considéré et la géométrie du canyon urbain représentée par des dimensions telles que la largeur de la rue ou la hauteur des bâtiments. La géométrie peut aussi inclure le relief des façades, c'est-à-dire les balcons ou les dimensions des fenêtres. Différentes méthodes d'acquisition et bases de données disposant de ces informations sont présentées dans ce chapitre. La connaissance du relief urbain est abordée à cette occasion, elle permet de déterminer les obstructions occasionnées par les constructions alentours. Dans le chapitre II.2, la photométrie est définie. Il s'agit de décrire la façon dont les façades réfléchissent la lumière. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'outils théoriques afin de caractériser ce comportement. Les éléments décrits dans ces deux premiers chapitres permettent de définir une scène qui ouvre la possibilité d'effectuer des simulations numériques. Cette scène reçoit une quantité d'énergie qui résulte de la somme de deux sources distinctes : le soleil qui émet un rayonnement qualifié de direct et la voûte céleste qui émet un rayonnement qualifié de diffus. Ces phénomènes sont décrits dans le chapitre II.3. Grâce à toutes ces informations, des logiciels de simulation peuvent calculer les contributions directes du soleil et du ciel sur les éléments de surface des façades, et éventuellement leurs contributions indirectes liées aux réflexions multiples. Les méthodes que peuvent appliquer ces logiciels sont décrites dans le chapitre II.4. Elles permettent de calculer une quantité d'éclairement lumineux (lux) ou énergétique (W/m^2) pour les surfaces choisies dans la scène. Ces valeurs sont généralement disponibles pour différents intervalles de temps, leur performance dépend du niveau de simplification auxquels ils procèdent et à la qualité des algorithmes qu'ils utilisent. Plusieurs logiciels qui effectuent ces simulations sont présentés dans le chapitre II.5, ceux qui ont été retenus pour réaliser des comparaisons avec des mesures sur la maquette sont ensuite présentés plus en détails.

II.1. Données pour décrire la géométrie urbaine

Cette première section discute de la détermination des caractéristiques géométriques du canyon urbain. Il est essentiel de disposer de bases de données contenant des informations sur le bâti afin de pouvoir appliquer des méthodes de calcul d'éclairement à grande échelle. Le projet SNI (cf. section I.3.6.1) illustre clairement ce besoin. Afin de disposer des données nécessaires aux simulations, les surfaces des toits des bâtiments ont dû être délimitées manuellement à partir de l'outil Google Maps. Cette étape a mobilisé une personne pendant deux semaines pour un peu plus de 600 bâtiments. Ce travail est soumis aux erreurs humaines et nécessite d'autant plus d'application et de temps lorsqu'il s'agit d'estimer la pente des toits à partir de documents fournis par le propriétaire. Ce type d'étude aurait pu être mené beaucoup plus rapidement et avec une incertitude plus faible avec l'utilisation d'une base de données 3D.

II.1.1. Données LIDAR

La numérisation du relief urbain permet d'effectuer de nombreuses simulations concernant l'étude de ce dernier. L'évacuation des eaux pluviales, la circulation de l'air, l'aménagement des infrastructures et la gestion de la sécurité sont des domaines qui peuvent bénéficier d'une telle source de données. Le choix du format est crucial car il garantit que les données pourront être importées dans différents logiciels de simulation. L'acquisition des données se fait à partir de photographies (aériennes ou satellitaires) ou de télémétrie laser appelée LIDAR (Light Detection And Ranging) depuis des avions ou des véhicules au sol. La technologie LIDAR fonctionne comme un RADAR à la différence que la lumière se trouve sur le spectre visible et qu'elle est polarisée. L'utilisation de la lumière visible a l'avantage de pouvoir distinguer des matériaux transparents pour les ondes radios. Par exemple, il est possible de faire la différence entre de la végétation et une toiture : les toitures sont totalement opaques à la lumière visible alors que la végétation ne l'est que partiellement. L'utilisation d'algorithmes d'analyse des données LIDAR permet d'effectuer cette distinction. Ces deux types de surface possèdent des propriétés différentes qui agissent sur le climat urbain. Les données sont principalement collectées par avion, il existe des systèmes embarqués sur des satellites comme le système GLAS du satellite ICESat de la NASA (Abshire *et al.*, 2005). Un système dans l'espace permet d'obtenir des données sur une grande surface plus rapidement que par avion et n'est pas soumis à certains biais comme les turbulences atmosphériques qui nuisent à la qualité des données collectées par avion. Cependant ce type d'installation entraîne des coûts de mise en œuvre et de maintenance bien plus élevés. L'utilisation d'un avion offre aussi l'avantage d'une plus grande flexibilité dans la logistique. Il est possible de créer un modèle en 3D à partir d'images prises sous différents angles (Taillandier et Deriche, 2004) ou directement à partir des nuages de points obtenus par relevés LIDAR (Jochem, Höfle, Hollaus, et Rutzinger, 2009). La combinaison de l'information sur les limites des bâtiments et des données LIDAR permet par exemple de délimiter les surfaces de toit (Kassner, Koppe, Schüttenberg, et

Bareth, 2008). Les bordures des bâtiments peuvent éventuellement être obtenues à partir de données cadastrales ou de modèles 3D de l'occupation au sol. L'avantage de ce type de données est de pouvoir disposer de l'information à l'échelle de la ville. Il devient alors possible de traiter l'information massivement pour calculer des indicateurs de morphologie urbaine (Carneiro, Morello, Desthieux, et Golay, 2010). Les travaux de Carneiro *et al.* exploitent une combinaison de données LIDAR et d'information vectorielle sur les bâtiments pour calculer le rapport S/V des bâtiments (cf. section I.3.4), ainsi que la quantité d'énergie reçue par les façades ou les toits des bâtiments, à l'échelle d'un quartier comme le montre la Figure II-1.

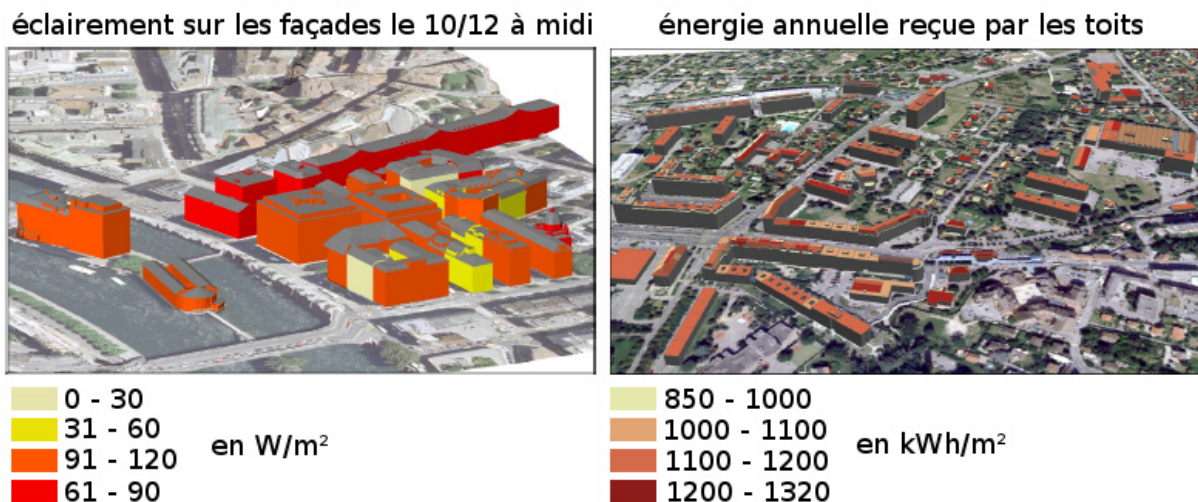


Figure II-1 : Calcul du potentiel solaire de deux quartiers de Genève

L'accès à des données de cette qualité permet donc de mettre en œuvre des outils puissants d'analyse du tissu urbain. Les urbanistes peuvent les utiliser pour obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur un quartier ou même une ville. Il est alors possible de prendre des décisions permettant d'optimiser la consommation d'énergie en considérant l'environnement urbain comme un tout et non plus comme un ensemble de bâtiments isolés. En revanche, ce type de données reste assez peu disponible ou très coûteux, les sections suivantes présentent les bases de données disponibles pour la France concernant le relief du terrain ainsi que les données en 3D des bâtiments.

II.1.2. Modèles numériques de terrain ou d'élévation

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation du relief à la surface du globe. Il ne contient pas d'informations concernant la végétation et les traces d'activité humaine. Ce n'est pas le cas d'un modèle numérique d'élévation (MNE) qui prend en compte les infrastructures et la végétation. La Figure II-2 illustre la différence entre MNT et MNE. En France, la gamme de produits BD ALTI (IGN, 2012) appartenant à l'IGN est le produit (MNT) le plus précis disponible, avec une grille au pas de 25 mètres et une précision sur l'altitude inférieure à 6 mètres. Il existe des satellites qui permettent d'obtenir des résolutions encore plus fines. Le satellite français SPOT5 peut générer des données avec

une résolution de 2,5 m à 5 m. Le satellite américain IKONOS offre la possibilité d'obtenir un pas inférieur à 5 m. La résolution du satellite japonais ALOS tourne autour de 2 m. Les satellites QuickBird, CartoSat et WorldView-1 proposent des données avec un pas de 1 m. Ces satellites ont la particularité de pouvoir être programmés pour aller scanner une zone sur commande si elle n'est pas encore disponible.

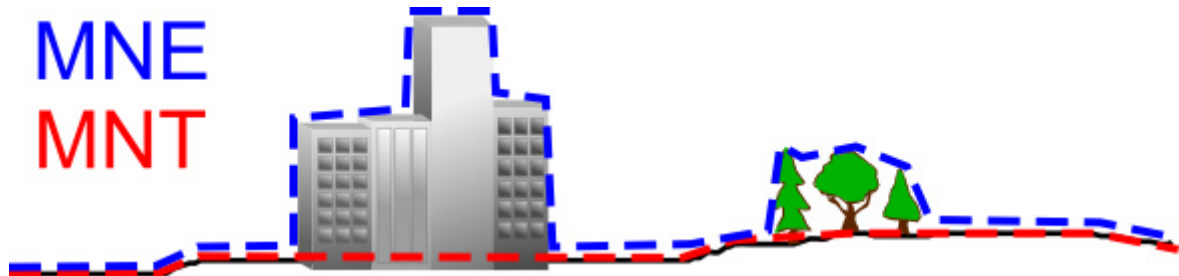


Figure II-2 : Différence entre Modèle Numérique de Terrain (MNT) et Modèle Numérique d'Élévation (MNE)

Ces produits sont évidemment payants (\$20 par km², commande minimale de 25 km² pour WorldView par exemple). Il existe toutefois des alternatives gratuites disposant d'une résolution suffisante pour un grand nombre d'applications. Parmi ces produits, les bases de données GTOPO30, ASTER et SRTM sont les seules à proposer l'information pour la quasi-totalité de la surface du globe. GTOPO30 est un MNT disponible depuis 1996 avec une résolution de 30 secondes d'arc soit environ 1 km, et une précision verticale au mieux à 30 m près. Cette résolution est suffisante pour produire des cartes du relief à l'échelle nationale, mais insuffisante pour déterminer des obstructions à la lumière naturelle avec la méthode qui sera décrite plus précisément dans la section III.2.2. Pour en expliquer la raison, la Figure II-3 montre un exemple de détermination du relief à partir d'un maillage de 1 km.

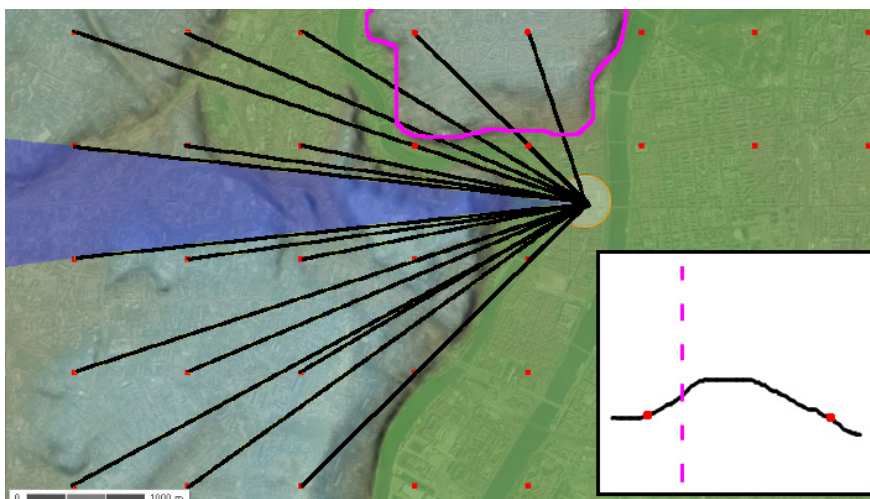


Figure II-3 : Problèmes liés à une résolution insuffisante du maillage d'une base de données altimétriques

Cette carte combine une photographie aérienne de la ville de Lyon avec le relief en fausses couleurs : peu de couleurs sont visibles car les variations de relief à cette échelle sont très grandes. Cette image a été réalisée par l'auteur dans le but unique de mettre en évidence l'importance de disposer d'une résolution élevée pour une base de données altimétriques.

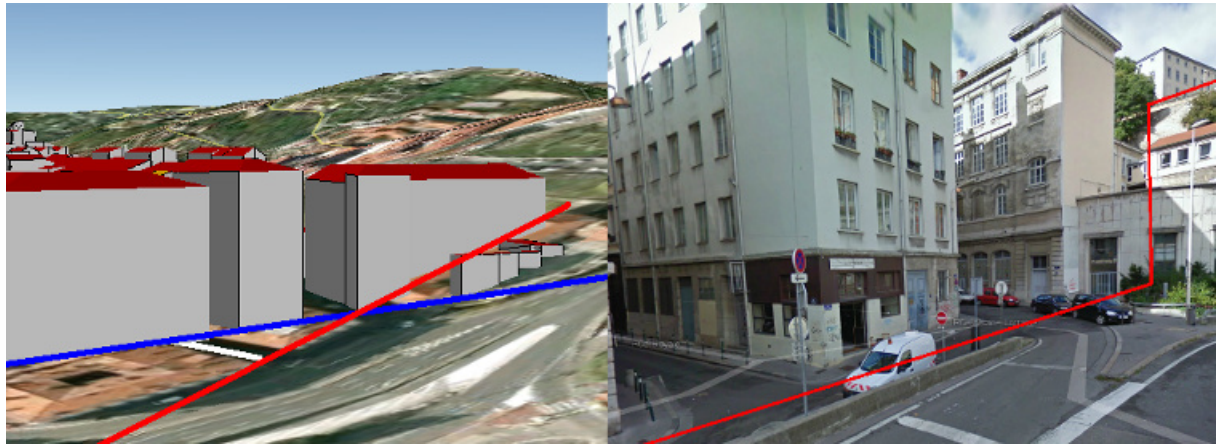
Sur la partie gauche, on peut voir un cône bleu qui représente une zone pour laquelle l'information du relief n'est pas disponible. Cette zone peut être réduite en allant chercher des données situées le plus loin possible, mais ce n'est pas toujours possible. La base de données peut être limitée aux frontières d'un pays, des valeurs peuvent ne pas exister pour des problèmes techniques au moment de la mesure, ou encore ne pas être disponibles pour des raisons de sécurité (militaires ou nationales). Sur cette même figure, le front d'une colline mise en valeur par un trait magenta est visible ainsi qu'une coupe dans l'encadré en bas à droite. Le maillage permet de distinguer ce relief uniquement avec un écart de 1 km, ce qui signifie que tout ce qui existe entre est inconnu. Dans ce cas précis, la colline monte puis redescend, or la résolution spatiale ne permet pas de distinguer cette variation, l'erreur commise est d'autant plus grande que le relief est proche car l'obstruction qu'il crée est plus importante.

Un MNE couvrant 99% des terres avec une résolution d'une seconde d'arc, soit environ 30 m à l'équateur, a été généré à partir de l'instrument ASTER embarqué sur le satellite Terra. Bien que la seconde version sortie en octobre 2011, présente des améliorations, il existe des données manquantes notamment au niveau de régions présentant des couvertures nuageuses persistantes. Les résultats obtenus par une première étude de validation stipulent que d'autres analyses devraient être effectuées afin de valider plus en détail les données générées par ASTER (ASTER GDEM Validation Team, 2011).

Le programme de la NASA nommé SRTM (Farr *et al.*, 2007) a eu pour but de créer une base de données altimétriques globales (MNT). Pendant 10 jours du mois de février 2000, la navette Endeavour a eu pour mission de sonder 80% de la surface du globe à l'aide de deux radars séparés de 60 mètres par un bras mécanique. Les deux signaux ont été analysés par interférométrie afin de déduire l'altitude à la surface du géoïde, selon le système géodésique WGS84 (Macomber, 1984). Un système géodésique est un système de coordonnées qui permet de définir des positions sur une représentation géométrique simplifiée de la Terre. Ce système utilise la représentation en ellipsoïde de révolution dont les paramètres sont standardisés. La BDD originale dispose d'une résolution de 1 seconde d'arc soit un maillage d'environ 30x30 mètres à l'équateur. Cependant, cette précision n'est disponible que pour les États Unis d'Amérique, le reste du monde se contente d'une résolution de 3 secondes d'arc soit une maille carrée d'environ 90 mètres de côté à l'équateur (en réalité 92,7 m en latitude et 92,6 m en longitude). L'erreur verticale donnée est inférieure à 16 mètres. Cela correspond par exemple à la hauteur d'un immeuble de 4 ou 5 étages à Lyon.

Un MNT dispose d'une information discrétisée. Ainsi la précision de la base de données SRTM peut être un facteur limitant en fonction de l'échelle à laquelle on souhaite l'exploiter. Cette dernière a été utilisée pour définir le relief lointain au niveau de la maquette utilisée dans cette thèse (cf. section III.2.2.1). Elle est aussi utilisée par le programme Google Earth pour l'affichage en 3D de la topographie et le calcul des distances. La Figure II-4 donne un exemple du type de problème qu'il est possible de rencontrer. Dans

ce cas précis, il existe un flanc de colline abrupt, visible sur l'image de droite. La ligne rouge représente la topographie réelle. Sur l'image de gauche, la ligne rouge représente le même relief tel qu'il est disponible dans Google Earth. Alors qu'il s'agit d'un "escalier" en réalité, le logiciel affiche une pente. En superposant un modèle 3D de la rue qui se trouve à cet endroit obtenu à l'aide de relevés LIDAR, on peut ainsi constater que les bâtiments s'enfoncent dans le sol au lieu de suivre la ligne bleue qui est le sol vrai.



*Figure II-4 : Intégration du modèle 3D dans Google Earth (à gauche),
photographie du lieu réel (à droite)*

La résolution de la BDD est à l'origine de ce défaut. À cette latitude, la distance entre chaque point est d'environ 65 mètres, tout ce qui se trouve entre les points disponibles est inconnu. Afin de représenter le relief, le logiciel effectue une interpolation entre les points, d'où un résultat inexact. Une technique intéressante consiste à effectuer une interpolation pondérée en fonction des points alentours, cela permet de faire mieux qu'une simple relation linéaire, cela dit même avec cette technique, le cas illustré ici n'aurait pas été représenté correctement étant donné la variation abrupte d'altitude.

La précision verticale de 16 mètres et l'interpolation obligatoire pour obtenir une altitude en tout point, rendent l'exploitation de la BDD SRTM peu adaptée à une utilisation en milieu urbain, de plus il s'agit d'un MNT, qui par définition ne possède pas d'informations sur le tissu urbain. L'exploitation de cette base de données doit donc être réservée à des environnements ne présentant pas de constructions humaines et pour des applications où la précision verticale est suffisante. C'est le cas pour l'estimation de l'ombrage dû au relief montagneux pour un projet de centrale photovoltaïque au sol en site isolé. Cette BDD permet d'avoir une information suffisante car l'importance de l'erreur de 16 mètres est moindre par rapport à la surface considérée. En effet, ce type de centrale est majoritairement installé dans un environnement présentant un relief peu important puisque la rentabilité dépend directement de la quantité de rayonnement solaire direct disponible. En 2012, sur les 400 simulations effectuées pour des sites différents par la société kiloWattsol, la hauteur angulaire du relief lointain situé au sud était à 97% inférieure à 10°.

II.1.3. Modèles 3D des villes

Nous avons vu dans la section I.3.4 qu'une relation avait été observée entre l'éclairement global horizontal au milieu d'une rue et le SVF (Kakon et Nobuo, 2009). Dans cette étude, le SVF a été calculé à partir d'un logiciel de simulation dans lequel la géométrie 3D des rues étudiées a pu être importée (mais la source des données 3D n'a pas été précisée). De ce fait, les conditions du calcul varient par rapport à la réalité, par exemple par rapport à la présence d'arbres qui créent des obstructions et qui ne sont pas pris en compte, menant ainsi à une sous-estimation du SVF. Le SVF a aussi été calculé à une hauteur de 1,6 m alors que la hauteur à laquelle EEG a été mesuré n'est pas précisée, il est donc possible qu'EEG ait été mesuré au sol, ce qui conduit à douter de la relation obtenue entre SVF et EEG. Cela montre le danger de simulations ne prenant pas en compte la géométrie 3D réelle et la nécessité d'être précis sur les conditions expérimentales.

En France, plusieurs villes disposent de leur modèle en 3D. La plupart des données récoltées proviennent de sociétés privées qui proposent leurs services à des collectivités ou à des entreprises. Par exemple, la société CyberCity3D qui collabore avec Google, possède un modèle de Paris contenant 69 000 bâtiments sur une surface de 52 km². La société Archividéo a participé au développement du produit Territoire3D en partenariat avec l'IGN et propose une maquette de la France entière avec les bâtiments en 3D. Ces bâtiments ont été générés à partir d'une méthode heuristique d'application de textures types sur les bâtiments 3D d'une base de données de l'IGN (BD TOPO) obtenue par restitution photogrammétrique de prises de vue aériennes (IGN, 2011). Archividéo fournit notamment les données utilisées par le site des Pages Jaunes pour produire une vue 3D de certaines villes de France. Ces données peuvent donc être principalement utilisées à des fins graphiques : la texture des bâtiments ne correspond pas aux données réelles, mais les dimensions des bâtiments sont à l'échelle. L'IGN propose plusieurs produits contenant des informations sur les dimensions réelles des bâtiments, notamment Bati3D. Contrairement à Territoire3D, il s'agit de l'application des textures réelles des bâtiments photographiés par avion sous différents angles, lesquelles sont appliquées à des modèles 3D des bâtiments dont les proportions sont fidèles à la réalité.

Ces données sont très coûteuses car leur réalisation nécessite un temps de travail conséquent et met en œuvre des moyens techniques importants. Néanmoins, la société Google a trouvé une méthode pour réduire les coûts pour la création de leur base de données mondiale de villes en 3D : une interface ergonomique permet à n'importe quel utilisateur de créer un bâtiment en 3D à partir des images aériennes des villes disponibles (Google, 2012).

Avec l'avènement des moyens techniques permettant d'obtenir un grand nombre d'informations sur la géographie d'un territoire, il est nécessaire de disposer d'une infrastructure permettant la manipulation et l'échange de telles données. CityGML (Kolbe, Gröger, et Plümer, 2005) est par exemple, un format de données ouvert basé sur XML, qui a été mis en place pour faciliter l'utilisation des modèles 3D de villes. Sa principale caractéristique est de définir 5 niveaux de détails. Un niveau de détail (Level Of Detail) est une couche qui contient des informations relatives à l'échelle qu'il représente. Ce modèle d'information repose sur le standard GML (Geography Markup Language) développé par le consortium international OGC (Open Geospatial Consortium). Les différents niveaux de

détail disponibles ne sont pas forcément adaptés à la simulation des échanges radiatifs en milieu urbain car ils sont soit trop complexes donc lourds à manipuler, soit trop simplistes ou ne possédant pas les détails nécessaires à un calcul pertinent. Cela ouvre ainsi la porte à la mise en place de nouveaux modèles de représentation 3D d'une ville conçus spécialement pour les logiciels de simulation de phénomènes physiques, comme le modèle GISOL3 (Prévost *et al.*, 2011).

Pour effectuer des simulations en milieu urbain, il est donc préférable d'utiliser des données provenant de mesures. Ces données existent moyennant un certain coût. Cependant, l'utilisation d'une géométrie 3D brute ne suffit pas pour obtenir des résultats de simulations pertinents. En effet, il est nécessaire de définir les propriétés photométriques des revêtements des façades et du sol (voire des toits) en se basant sur des données réelles, ou à défaut réalistes. Le chapitre suivant traite des données disponibles ou des méthodes utilisables pour les obtenir.

II.2. Données pour décrire les propriétés des matériaux

Pour calculer l'éclairement lumineux sur les façades des bâtiments dans un canyon urbain, il est nécessaire de connaître les facteurs de réflexion lumineux de toutes les façades ainsi que celui du sol. En effet, le flux lumineux qui pénètre à l'intérieur du canyon est réfléchi de manière multiple par chacune des surfaces du canyon. C'est donc un paramètre très important. Pour obtenir cette information, il est nécessaire de disposer de données propres à chaque site, quelle que soit la méthode d'acquisition. Plusieurs méthodes utilisant des appareils de mesure différents sont décrites et comparées dans l'annexe C. Il est retenu que la méthode utilisant un spectromètre permet d'obtenir les résultats les plus fiables. Cependant, elle peut être difficilement appliquée à grande échelle, c'est-à-dire pour un quartier voire une ville. En effet, il est nécessaire d'effectuer les mesures en étant à proximité immédiate du mur et le protocole nécessite plusieurs mesures pour une même surface. Ainsi, cela ne peut être automatisé avec un système monté sur un véhicule. Cependant, un protocole a récemment été mis en place pour effectuer une estimation de la réflectance des surfaces à partir de mesures sur un véhicule à l'intérieur d'une rue (Coubard, Brédif, Briottet, et Paparoditis, 2011). Des photographies géoréférencées provenant d'un appareil photo étalonné en luminance ainsi que différentes mesures d'éclairement sont combinées avec un modèle en 3D de la rue. La réflectance est calculée en utilisant l'écart entre la luminance mesurée par le capteur et la luminance théorique qu'il est censé mesurer en considérant que les surfaces suivent la loi de Lambert.

Google propose des photographies en couleur de l'intérieur des rues (sol, façades et ciel) à travers son service Street View. Un tel outil peut permettre d'obtenir des informations sur le revêtement des surfaces dans un canyon sans devoir s'y déplacer pour effectuer des mesures. Cette démarche n'est possible qu'en ayant une connaissance de la réponse en luminances de l'appareil photo ainsi que d'autres données qui ne sont pas fournies par les outils de type Street View par exemple. Cette source n'est donc en l'état actuel pas utilisable pour déterminer le facteur de réflexion lumineux des façades en milieu urbain. Une technique consiste à comparer les couleurs des matériaux avec ceux d'une base de données de réflectance de matériaux de construction par exemple. Ce type d'approche est décrit dans l'annexe C. Cependant une erreur non négligeable est à prévoir, du fait que la couleur n'est pas un paramètre fiable car les données d'étalonnage des appareils qui ont servi à prendre les photos ne sont pas connues. De plus, la couleur ne donne pas d'information sur la texture du matériau, ni sur la proportion de réflexion spéculaire. Il existe tout de même quelques bases de données, par exemple "ASTER" issue d'un projet de la NASA, contient plus de 2400 mesures de réflectance spectrale de matériaux naturels et fabriqués par l'homme (Baldrige, Hook, Grove, et Rivera, 2009). La base de données CuRRET peut aussi être mentionnée, elle regroupe des informations sur la réflectance (BRDF) de 61 types de surfaces existant sur la planète (Dana, Van Ginneken, Nayar, et Koenderink, 1999). La fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF) est une fonction permettant de représenter le facteur de réflexion d'un matériau dans toutes les directions pour des sources provenant de toutes les directions. Enfin, pour pouvoir effectuer des simulations en milieu urbain, il est courant d'utiliser une unique valeur par défaut,

censée être représentative, pour toutes les façades. Nous verrons plus tard qu'il existe une grande plage de facteurs de réflexion lumineuse de façades en milieu urbain et que le choix d'une valeur unique (souvent 0,2) peut être une hypothèse incorrecte.

Avec la géométrie 3D et le revêtement, le troisième paramètre nécessaire pour effectuer des simulations de comportement de la lumière est le climat. Les différentes grandeurs qui le caractérisent ainsi que les moyens d'acquérir des données climatiques sont décrites en détail dans le chapitre suivant.

II.3. Données pour décrire le rayonnement du soleil et du ciel

Dans le domaine de la lumière naturelle, la connaissance des conditions météorologiques d'un site à un instant donné est cruciale. Cela permet d'effectuer des simulations prenant en compte indépendamment la contribution du ciel et du soleil de façon réaliste. La lumière naturelle ne se stocke pas, il faut donc l'appréhender dans toute sa dynamique, les protections solaires permettent de se protéger du soleil direct tout en laissant passer encore du diffus du ciel, il faut donc connaître chacune des deux composantes. Ce chapitre décrit la géométrie solaire ainsi que l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement mesurable à la surface de la planète. Les paramètres qui permettent de qualifier le climat lumineux sont définis et les différentes sources de données utilisables sont présentées. Enfin, des modèles permettant de reconstituer la répartition des luminances du ciel à partir de ces paramètres de référence sont présentés.

II.3.1. Trajectoire du soleil et énergie rayonnée

Les lois géométriques qui régissent la course du soleil dans le ciel sont expliquées dans cette section ainsi que le comportement de la lumière par rapport à l'atmosphère terrestre. La compréhension de ces principes est importante car les logiciels de simulation utilisables pour la propagation du rayonnement solaire en milieu urbain utilisent des représentations simplifiées de ces derniers. De ce fait, les résultats des simulations peuvent présenter un niveau de précision variable en fonction du choix des modèles utilisés pour représenter ces phénomènes.

II.3.1.1. Mouvement de la terre autour du soleil

La Terre se déplace autour du soleil sur un même plan dit de l'écliptique, en dessinant une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers. Ainsi comme le montre la Figure II-5, la distance Terre-soleil varie entre 152×10^6 km (aphélie) et 147×10^6 km (périhélie). Paradoxalement, dans l'hémisphère nord, la Terre est plus proche du soleil en hiver. En fait, c'est l'angle entre le plan équatorial de la Terre et le plan de l'écliptique qui est à l'origine des saisons, il s'agit de la déclinaison solaire δ_s . Cet angle qui varie entre $+23,4^\circ$ le 21 juin (solstice d'été) et $-23,4^\circ$ le 21 décembre (solstice d'hiver). La déclinaison solaire prend la valeur de 0° deux fois dans l'année, le 21 septembre (équinoxe d'automne) et le 21 mars (équinoxe de printemps).

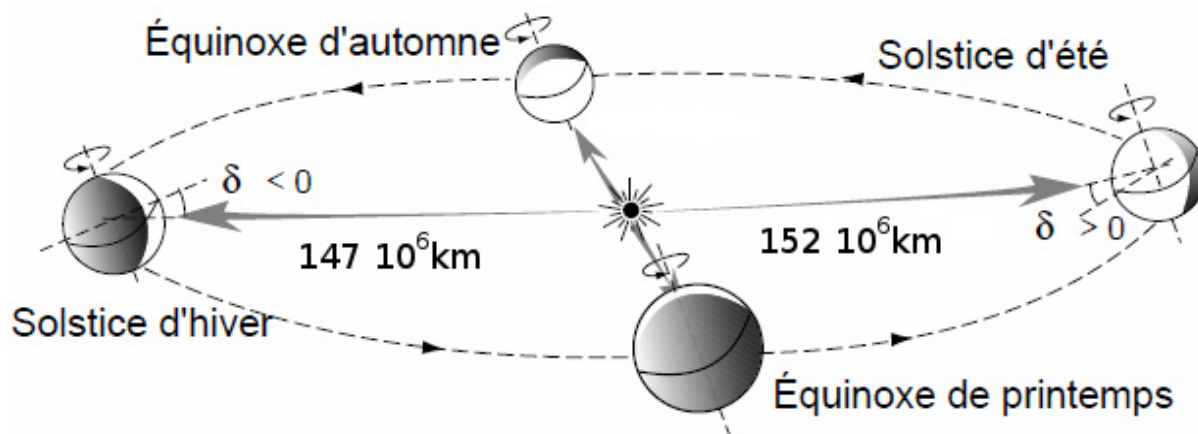


Figure II-5 : Schéma de la trajectoire de la terre autour du soleil

Il existe différents algorithmes pour calculer la valeur de la déclinaison en fonction du jour julien de l'année. Ces derniers ont été établis à partir de tables d'éphémérides publiées par le bureau des longitudes (BDL). Cette tâche a été confiée à l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE) depuis 1998. On trouve par exemple l'algorithme de Perrin de Brichambaut (Perrin et Vauge, 1982) dont la formulation est simple mais peut conduire à une erreur de -2%, et celui de Walraven (Walraven, 1978), plus complexe, mais dont l'erreur est inférieure à $\pm 0,02\%$. La Figure II-6 montre que l'écart de l'algorithme de Walraven et les éphémérides est plus faible qu'avec d'autres algorithmes (Bourges, 1992; Spencer, 1971).

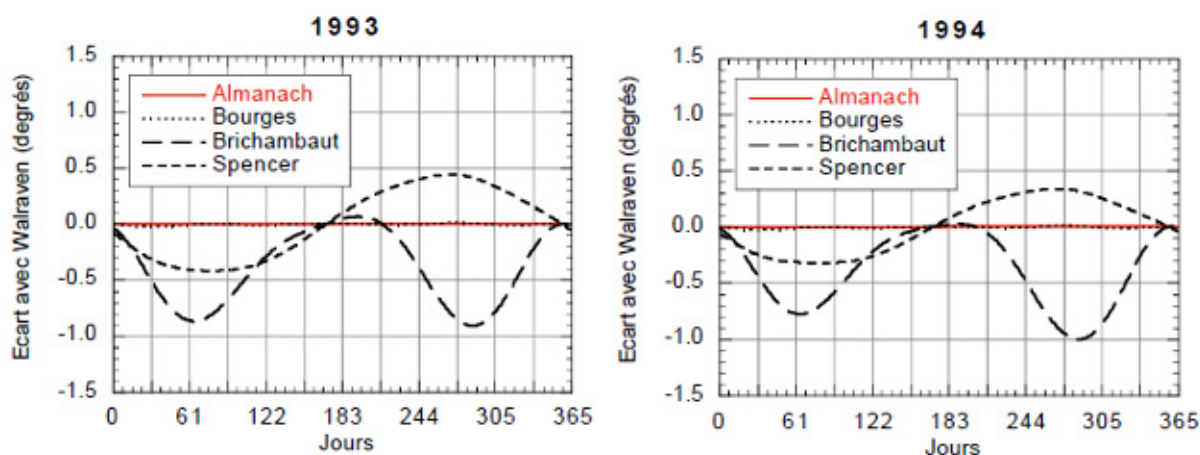


Figure II-6 : Écart entre quatre algorithmes de déclinaison solaire et l'algorithme de Walraven (D. Dumortier, 1995)

D'autres algorithmes permettent d'obtenir des précisions largement supérieures, par exemple, de l'ordre de $0,0003^\circ$ sur la période -2000 av JC à 6000 ap JC moyennant des calculs assez complexes (Meeus, 1991). Plus récemment a été publié un algorithme avec un niveau de précision de $0,0027^\circ$ entre l'année 2003 et 2022 basé sur des calculs plus simples (Grena, 2008). Cette précision se révèle pertinente pour des suiveurs de soleil dans le domaine de l'énergie solaire à concentration.

En dehors de son atmosphère, la Terre reçoit du Soleil une quantité d'énergie dont la valeur retenue est proche de 1367 W/m². Cette valeur est la constante solaire, elle a été recommandée par l'OMM, l'Organisation Météorologique Mondiale (R Kittler et Darula, 2000). Une étude plus récente basée sur des mesures d'éclairement énergétique à partir du satellite ACRIMSAT recommande d'utiliser la valeur de 1366,1 W/m² (Darula, Kittler, et Gueymard, 2005).

La constante solaire est donnée pour une distance fixe de 1 ua, une unité astronomique "ua" représentant une valeur moyenne de la distance Terre-soleil soit 149 597 870 700 m ±3 m (IAU, 2012). En raison de la trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil, la distance entre les deux astres varie constamment durant une année. Ainsi la CIE recommande d'utiliser l'équation (II-1) qui permet de déterminer l'éclairement énergétique disponible à la surface de la terre en dehors de son atmosphère en fonction du jour de l'année (CIE TC 2.17, 1989).

$$ExSNO = C \left[1 + 0.0334 \cos \left(\frac{360}{365.25} J - 2.7206 \right) \right] \quad (II-1)$$

En remplaçant le "x" dans "ExSNO" par un "E" pour obtenir l'éclairement énergétique (avec C = 1367 W /m²) et par un "V" pour l'éclairement lumineux (C = 133800 lux).

Cette géométrie des astres est décrite dans le référentiel héliocentrique, ainsi la géométrie solaire est généralement rapportée à un référentiel terrestre. Cela permet de décrire le mouvement apparent du soleil qui est directement lié à l'exploitation de cette ressource.

II.3.1.2. Trajectoire locale du soleil

Le référentiel local représente l'observation de la trajectoire du soleil depuis un endroit situé à la surface de la Terre. Dans ce référentiel, c'est le soleil qui se déplace dans le ciel. Ainsi on définit le repère local comme le plan horizontal du lieu d'étude (cf. Figure II-7).

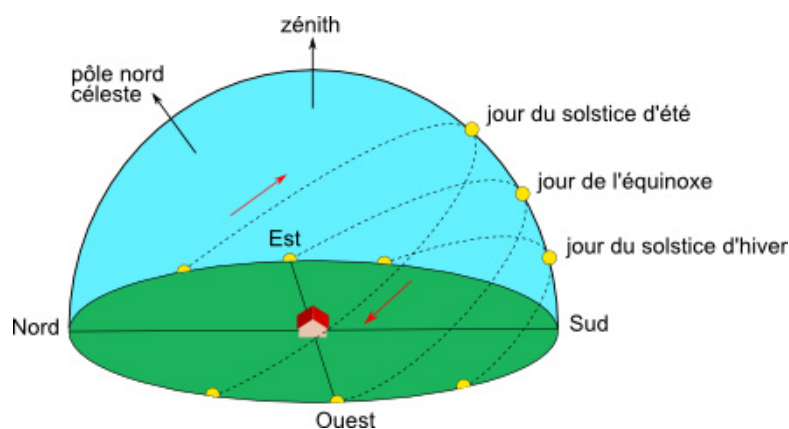


Figure II-7 : Schéma de la géométrie solaire dans le repère local

Le mouvement apparent du soleil est défini par les deux grandeurs suivantes : sa hauteur angulaire γ_s (angle entre le soleil et l'horizon) aussi appelée altitude du soleil, et son azimut α_s (angle par rapport au nord ou au sud en fonction des conventions). Les valeurs de γ_s et α_s peuvent être calculées à partir de la déclinaison solaire δ_s à l'aide des équations suivantes :

Angle horaire :

$$\omega = 15^\circ(T - 12)$$

Hauteur angulaire :

$$\gamma_s = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta_s + \cos \varphi \cos \delta_s \cos \omega_s) \quad (II-2)$$

Azimut :

$$\alpha_s = \arcsin\left(\frac{\cos \delta_s \sin \omega_s}{\cos \gamma_s}\right)$$

L'angle horaire ω_s représente l'arc de cercle parcouru par le soleil à partir du sud à l'heure T . Le mouvement apparent dépend du lieu considéré qui est représenté par sa latitude φ . Le diagramme solaire est couramment utilisé pour représenter la trajectoire apparente du soleil pour un lieu donné. La forme de ce diagramme dépend de la latitude du lieu, la Figure II-8 en montre un exemple dans l'hémisphère nord.

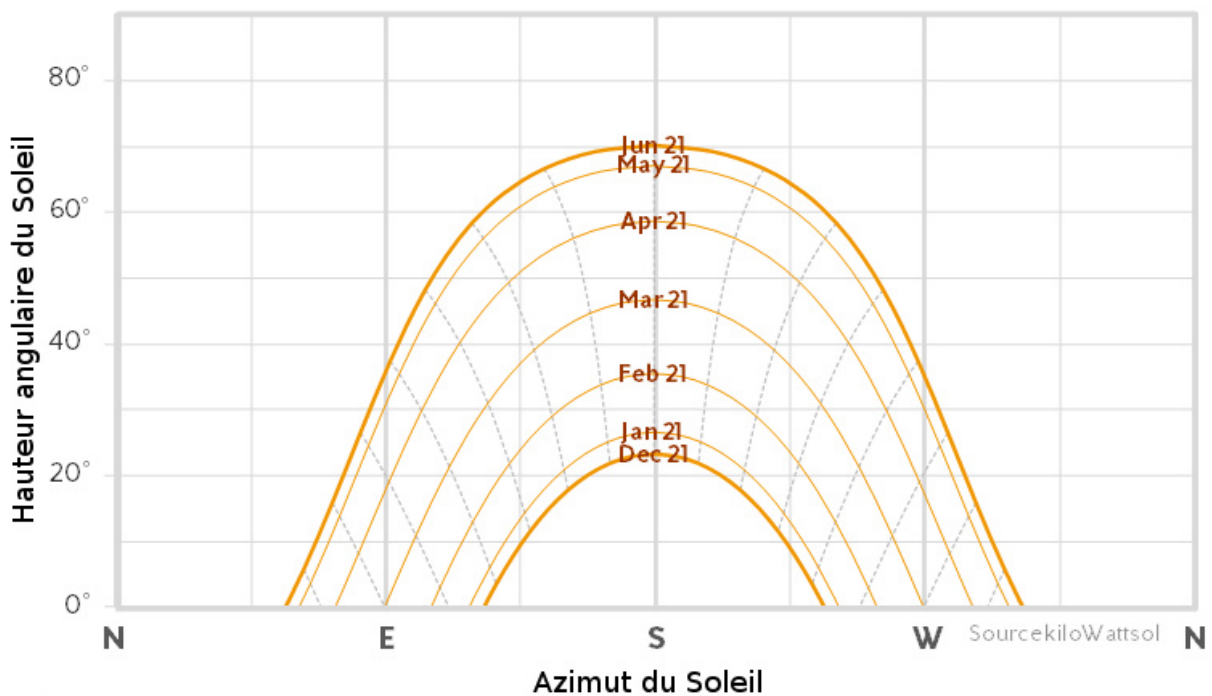


Figure II-8 : Exemple de diagramme solaire pour un lieu en France, latitude $43^\circ 18' 29''$ N et longitude $6^\circ 09' 14''$ E

Il est très important de connaître la trajectoire du soleil en milieu urbain car pour une hauteur de bâtiment donnée, la quantité de lumière disponible dans un canyon sera d'autant

plus faible que le lieu est proche des pôles car l'obstruction faite au soleil est plus grande. Pour l'utilisation de la technologie PV, l'accès au rayonnement solaire direct est crucial dans le cas d'une intégration des modules aux façades (BIPV) (cf. section I.3.6).

Le diagramme solaire permet aussi de représenter la durée de jour. Il s'agit du temps écoulé entre le lever et le coucher du soleil. Cette durée dépend de l'approche considérée. Par exemple, il est possible de considérer le moment où la hauteur angulaire du soleil est supérieure à zéro ou encore lorsque la partie supérieure du disque solaire est visible en prenant en compte la réfraction atmosphérique. Cette donnée est plus importante lorsque l'on considère la lumière du jour pour l'éclairage. En milieu urbain, cela n'est pas un critère important puisque l'horizon est généralement caché par des constructions. L'Organisation Mondiale Météorologique (OMM) définit une autre unité de temps appelée "durée d'ensoleillement" qui correspond à la durée pendant laquelle l'éclairement énergétique horizontal perpendiculaire aux rayons du soleil (EESN) est supérieur ou égal à 120 W/m^2 (WMO, 2003).

Les diagrammes et données météorologiques sont toujours fournis pour une échelle de temps donnée. Les logiciels de simulation du rayonnement solaire peuvent utiliser différentes conventions. Par exemple, l'heure solaire dépend de la longitude du lieu, au midi solaire, le soleil se trouve exactement au sud dans l'hémisphère nord (azimut de 180° par rapport au nord). En utilisant cette convention, l'heure de référence change en fonction de la position, elle est donc différente d'une ville à l'autre. Pour des raisons pratiques, il est d'usage de représenter le temps selon un système moins variable décrit dans la section suivante.

II.3.1.3. Heure solaire et heure légale

L'heure légale est fixe pour un fuseau horaire donné. En Europe, plusieurs pays situés géographiquement sur des fuseaux horaires différents ont adopté la même heure pour des raisons économiques et de commodité. En France, notre fuseau de référence est GMT+1 (Greenwich Mean Time). Historiquement, l'heure française était l'heure universelle GMT jusqu'à la seconde guerre mondiale pendant laquelle l'armée allemande a imposé l'utilisation du fuseau horaire GMT+1 pour tous les pays occupés (Pouille, 1999). L'heure légale permet aussi de s'affranchir de paramètres qui font varier l'heure solaire en fonction du lieu considéré. Ces paramètres sont la variation de la vitesse de la Terre durant sa course autour du soleil ainsi que l'obliquité de son axe de rotation. La mise en place de l'heure légale permet de conserver une unité au sein d'un même pays voire entre plusieurs pays. La prise en compte de ces phénomènes astronomiques est faite en considérant l'écart de longitude entre le lieu et la longitude de référence choisie pour l'heure légale, et à l'aide de l'équation du temps. Il s'agit d'une formule qui permet d'obtenir le décalage entre l'heure légale ou temps moyen et l'heure solaire. La complexité de la formule utilisée dépend de la précision nécessaire qui varie de la minute au centième de seconde. Pour des applications à la lumière naturelle, une précision trop importante n'est pas nécessaire puisque les variations les plus rapides sont dues aux passages de nuages, des variations de l'ordre de quelques secondes lorsqu'elles sont importantes. La Figure II-9 représente la variation de ce décalage en minutes en utilisant une équation simplifiée (Whitman, 2003).

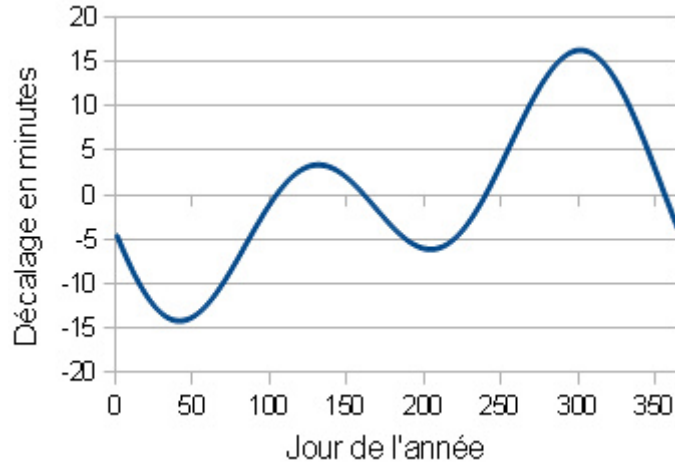


Figure II-9 : Équation du temps

Cette convention horaire est très importante car dans le cas de l'importation de données météo, il faut que le logiciel de simulation puisse gérer le format sous lequel les données sont disponibles ; sinon il faut convertir les heures dans le format du logiciel en appliquant la correction appropriée.

Un décalage d'une heure peut être pris en compte entre l'été et l'hiver, l'heure est ainsi avancée entre les mois de mars et d'octobre pour des raisons d'économie d'énergie. Ce changement d'heure est appliqué en Europe et notamment aux Etats-Unis et au Canada. Généralement, les fichiers météo sont fournis en heure d'hiver, mais il est nécessaire que les logiciels qui exploitent ces données aient la possibilité de prendre en compte ce décalage, sinon il faut une fois de plus corriger les données en conséquence.

Pour les applications PV, ces décalages horaires ne sont pas importants, car le dimensionnement se fait surtout à partir de cumuls d'énergie journaliers, mensuels, voire annuels. Pour les applications relevant de l'accès la lumière naturelle, il est important d'utiliser les heures légales. L'allumage automatique de l'éclairage artificiel des bureaux se fait aux heures ouvrables.

La géométrie solaire étant définie, nous allons désormais pouvoir étudier l'énergie rayonnée par le soleil et reçue à la surface de la Terre.

II.3.1.4. Énergie rayonnée par le soleil

Le rayonnement solaire est modifié par sa propagation dans l'atmosphère, on distingue donc le rayonnement extraterrestre et le rayonnement à la surface de la planète (au niveau de la mer). La Figure II-10 représente l'éclairement énergétique spectral du soleil en dehors de l'atmosphère (en bleu) ainsi que l'éclairement énergétique spectral du soleil au niveau de la mer (en rouge). La surface considérée est perpendiculaire aux rayons du soleil. L'intégration de l'éclairement énergétique spectral extraterrestre conduit à la constante solaire présentée dans la section II.3.1.1.

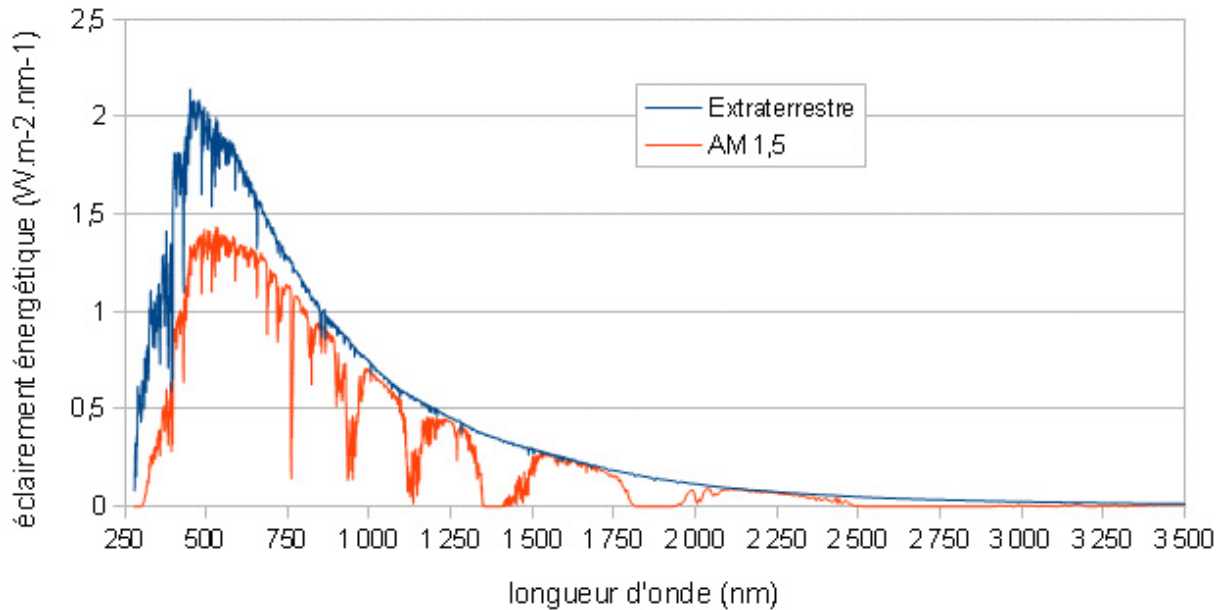


Figure II-10 : Spectre solaire extraterrestre et AM 1,5 (ASTM G173-03, 2012)

L'atmosphère est constituée de trois grands groupes de composants : l'air, l'eau et les aérosols (D. Dumortier, 1995). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il est partiellement absorbé et diffusé par celle-ci. La connaissance de la composition de l'atmosphère permet de caractériser cette absorption et cette diffusion. Étant donné que la diffusion de certains composants dépend de la distance parcourue dans l'atmosphère par les rayons du soleil pour arriver à la surface, la masse d'air optique relative (ou AM, de l'anglais Air Mass) est utilisée pour caractériser cette distance. La valeur de ce coefficient varie avec l'altitude du lieu considéré et la hauteur angulaire du soleil dans le référentiel local. Il est possible de calculer l'AM à l'aide de formules mathématiques comme celle de Kasten et Young (équation (II-3)) qui est largement utilisée (Kasten et Young, 1989). Cette formule donne la masse d'air optique relative pour une hauteur angulaire de soleil γ_s en fonction de la pression atmosphérique moyenne du lieu considéré p et de la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer p_0 .

$$AM(\gamma_s) = \frac{p}{p_0} \times \frac{1}{\sin \gamma_s + 0,50572(\gamma_s + 6,07995)^{-1,6364}} \quad (II-3)$$

Cependant, il est courant d'utiliser une version simplifiée de l'équation (II-3) pour laquelle l'AM est égale à l'inverse du sinus de la hauteur angulaire du soleil. Par convention, AM=0 correspond à l'extérieur de l'atmosphère. D'après l'équation (II-3) AM ne peut pas prendre la valeur zéro, cette équation n'est définie que pour traduire l'effet de l'atmosphère. S'il n'y a pas d'atmosphère, alors il n'y a pas lieu de l'utiliser. Par définition, AM=1 représente l'épaisseur de l'atmosphère lorsque le soleil se trouve au zénith. Dans le domaine PV, AM=1,5 (correspondant à une hauteur angulaire du soleil de 48,81°) est utilisée pour évaluer la puissance d'un module sous des conditions normalisées (cf. Annexe G). La Figure II-10 montre en rouge l'éclairement énergétique spectral du soleil à la surface pour AM=1,5. Ce spectre provient de la norme ASTM G173-03 qui est utilisée par les

constructeurs de modules PV et dont les valeurs ont été générées par le modèle SMARTS2 (Gueymard, 2001). Sur la Figure II-10 les variations importantes de la courbe rouge par rapport à la courbe bleue résultent de l'influence de l'absorption du rayonnement par les différents constituants de l'atmosphère pour des bandes de longueur d'onde bien particulières.

À la sortie de l'atmosphère, il reste donc le rayonnement transmis qui a été diffusé et absorbé par différents composants comme l'ozone dans l'UV ou la vapeur d'eau dans l'IR et le visible. Il s'agit de la composante directe. À cette composante s'ajoute le rayonnement résultant de la diffusion dans l'atmosphère : la composante diffuse. La somme des rayonnements diffus et direct est appelée rayonnement global.

La composition de l'atmosphère varie au fil des saisons et en fonction de la pollution produite par l'homme ou par des événements naturels comme une éruption volcanique. Les logiciels de calcul de rayonnement doivent donc prendre en compte cette variation temporelle car elle a une influence sur la valeur de l'éclairement mesurable à la surface. En effet, l'utilisation de modèles ne permet pas de tenir compte de ces phénomènes locaux. Les logiciels de calcul d'éclairement ne prennent généralement pas en compte le spectre solaire, ce qui est le cas des logiciels utilisés dans cette thèse. En réalité, il est rare de trouver un système de mesure du spectre solaire sur une station météo. Toutefois, cette donnée est importante pour les applications telles que la technologie solaire PV à concentration (cf. section I.2.2).

Pour prendre en compte l'influence de la composition de l'atmosphère pour un ciel clair, il est possible d'utiliser le facteur de trouble énergétique de Linke. Ce dernier prend en compte l'influence de la vapeur d'eau et des aérosols sur l'atténuation et la diffusion du rayonnement solaire. Il représente le nombre d'atmosphères propre et sèche qui permet d'obtenir le même niveau d'atténuation du rayonnement solaire direct (D. Dumortier, 1995). Cet indicateur est tellement utilisé qu'il existe même une base de données mondiale qui a été créée à partir de différentes données satellitaires (Remund, Wald, Lefèvre, Ranchin, et Page, 2003). Toujours utilisée, sa formulation a été revue dans le but de rendre son calcul indépendant de la masse d'air optique relative (Ineichen et Perez, 2002).

Le climat est donc un paramètre complexe à considérer car il dépend de phénomènes physiques multiples décrits à l'aide de modèles dont la précision augmente avec la complexité. Nous allons voir dans la section suivante les moyens disponibles au sol pour mesurer le rayonnement solaire.

II.3.2. Données sur le rayonnement solaire

Pour étudier l'influence de certains paramètres d'un canyon urbain sur la disponibilité de la lumière naturelle, il est nécessaire de caractériser le climat lumineux qui caractérise le lieu où il se trouve. Dans ce but il faut pouvoir disposer de données météorologiques caractérisant les conditions qui règnent habituellement à cet endroit. Il existe deux ressources qui permettent d'obtenir des données permettant de parvenir à ce but. Il s'agit des mesures des stations au sol et des images satellites.

II.3.2.1. Mesures au sol

Il existe des stations météo à travers le monde qui mesurent différents paramètres liés aux conditions de ciel et à la qualité de l'atmosphère. On les trouve dans les aéroports, éventuellement sur les toits des écoles ou encore sur des bâtiments publics. Leur répartition géographique est irrégulière et les paramètres mesurés peuvent varier d'une station à l'autre. Certaines se focalisent sur les propriétés de l'air ambiant (pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, température, humidité de l'air, pluviométrie, concentration en polluants...) d'autres possèdent des appareils capables de mesurer la quantité de rayonnement solaire.

Il existe plusieurs types d'appareils pour mesurer les caractéristiques du rayonnement solaire, certains sont visibles sur la Figure II-11, ce sont ceux de la station IDMP de l'ENTPE, situé à Vaulx-en-Velin. Le réseau IDMP est constitué d'une quarantaine de stations au sol mesurant des éclairements lumineux et énergétiques (cf. section II.3.2.3).

Les éclairements énergétiques sont mesurés avec des pyranomètres. Ces appareils sont constitués d'une thermopile recouverte d'un matériau noir absorbant le rayonnement solaire. Une thermopile est un dispositif qui produit une tension proportionnelle à une variation de température. Les caractéristiques de la thermopile étant connues, le pyranomètre produit une tension qui varie avec le flux énergétique du soleil. Le pyranomètre dispose de deux dômes : l'un pour filtrer les longueurs d'ondes au-delà des infrarouges proches ($\lambda > 2800\text{nm}$), l'autre pour protéger la thermopile des échanges par convection.

Les éclairements lumineux sont mesurés avec des luxmètres. Ces appareils utilisent une cellule photovoltaïque qui produit un courant proportionnel au rayonnement reçu. Pour produire l'éclairement lumineux, cette cellule est recouverte d'un filtre dit photopique, parce que sa sensibilité spectrale est proche de celle de l'œil. Le silicium seul n'offrirait pas cette sensibilité.



Figure II-11 : pyranomètre (à gauche), pyréliomètre (au milieu) et luxmètre avec arceau pour mesurer le rayonnement diffus (à droite)

Placé à l'horizontal, un pyranomètre ou un luxmètre permet de mesurer respectivement l'éclairement énergétiques global horizontal (EEG) ou l'éclairement lumineux horizontal

(EVD). Ces appareils peuvent être équipés d'un arceau mobile permettant de cacher le soleil en toute saison, ainsi l'éclairement mesuré ne provient que du ciel, ce paramètre est nommé éclairement énergétique diffus horizontal (EED) ou lumineux (EVD). Le pyréliomètre est un appareil permettant de mesurer l'éclairement énergétique direct dans le plan normal aux rayons du soleil, ce paramètre est appelé éclairement énergétique direct normal (EESN).

L'un des risques de l'utilisation de données météo réside dans la confiance que l'on peut leur attribuer. En effet, les instruments de mesure sont exposés aux intempéries et autres phénomènes pouvant causer des dommages ayant des répercussions sur la qualité des mesures. Il est donc important que les données subissent un contrôle de qualité rigoureux. Il existe différentes méthodes pour contrôler les valeurs mesurées. Il est possible de disposer de deux instruments de mesure du même paramètre, cela permet d'une part de continuer à mesurer des données lorsque l'un des deux tombe en panne, mais aussi de repérer les erreurs dues à l'un ou l'autre des instruments. Il est aussi possible d'utiliser des méthodes mathématiques et des modèles théoriques. Par exemple, il est possible de mesurer à la fois les éclairements énergétique direct normal (EESN), global horizontal (EEG) et diffus horizontal (EED). Nous savons que EEG est égal à la somme de EES et EED, avec EES le rayonnement solaire direct mesuré sur un plan horizontal. La valeur de EES peut être calculée à partir de EESN et de la hauteur angulaire γ_s du soleil à l'aide de l'équation suivante :

$$EES = EESN \times \sin(\gamma_s) \quad (II-4)$$

Il est alors possible de définir un écart maximal entre EES calculé à partir de la différence entre EEG et EED, et EES mesuré au-delà duquel on peut estimer qu'un des instruments a donné une valeur fautive. Il est aussi envisageable d'utiliser un modèle de séparation qui permet d'obtenir les proportions de direct et de diffus pour un global donné et de comparer les mesures à ce modèle pour vérifier que les valeurs mesurées sont réalistes.

Outre les stations météo au sol, il est possible d'acquérir des données sur le rayonnement solaire à partir d'images prises par des satellites soumises à des modèles théoriques.

II.3.2.2. Estimations à partir d'images satellites

Contrairement aux stations météo, les données obtenues à partir des satellites subissent avec certitude des contrôles de qualité rigoureux. Envoyer un satellite dans l'espace est un projet extrêmement coûteux, les organismes qui s'occupent de gérer les données doivent faire preuve de beaucoup de précautions car celles-ci doivent justifier les investissements. De ce fait, il est facile de se procurer des informations sur la qualité des données, le type de contrôle effectué ainsi que des publications scientifiques qui justifient les choix effectués. Toutefois, les données fournies peuvent être moins fiables que des données mesurées au sol. En effet, les instruments de mesures n'étant pas exclusivement prévus pour l'estimation du rayonnement solaire, leur précision n'est pas axée sur ce paramètre. Lorsque plusieurs sources de données de ce type sont disponibles, il est plus facile de produire une incertitude moyenne que de déterminer de façon absolue celle qui donne les meilleurs résultats. Cela

permet de déterminer la source qui semble être la plus fiable mais ne garantit pas qu'elle soit performante sur tous les sites de comparaison.

Une étude a été menée concernant plusieurs BDD de ressource solaire, dérivées d'images satellites (Suri *et al.*, 2008). La Figure II-12 montre une carte des écarts types de l'éclairement global horizontal annuel total obtenu pour toute l'Europe. En utilisant les valeurs de cette carte, l'écart type est inférieur à 7% pour 90% de la surface couverte par l'ensemble des 6 BDD utilisées dans la comparaison. Les zones pour lesquelles les écarts entre les différentes BDD sont les plus importants peuvent se trouver aussi bien dans des zones à fort relief montagneux que sur des plaines ou des littoraux. Les données dérivées d'images satellites présentent un grand intérêt du fait de la possibilité d'obtenir des valeurs pour des zones étendues, toutefois il est important de considérer des comparaisons entre différentes sources afin d'obtenir une information concernant l'incertitude sur les données obtenues pour lieu donné.

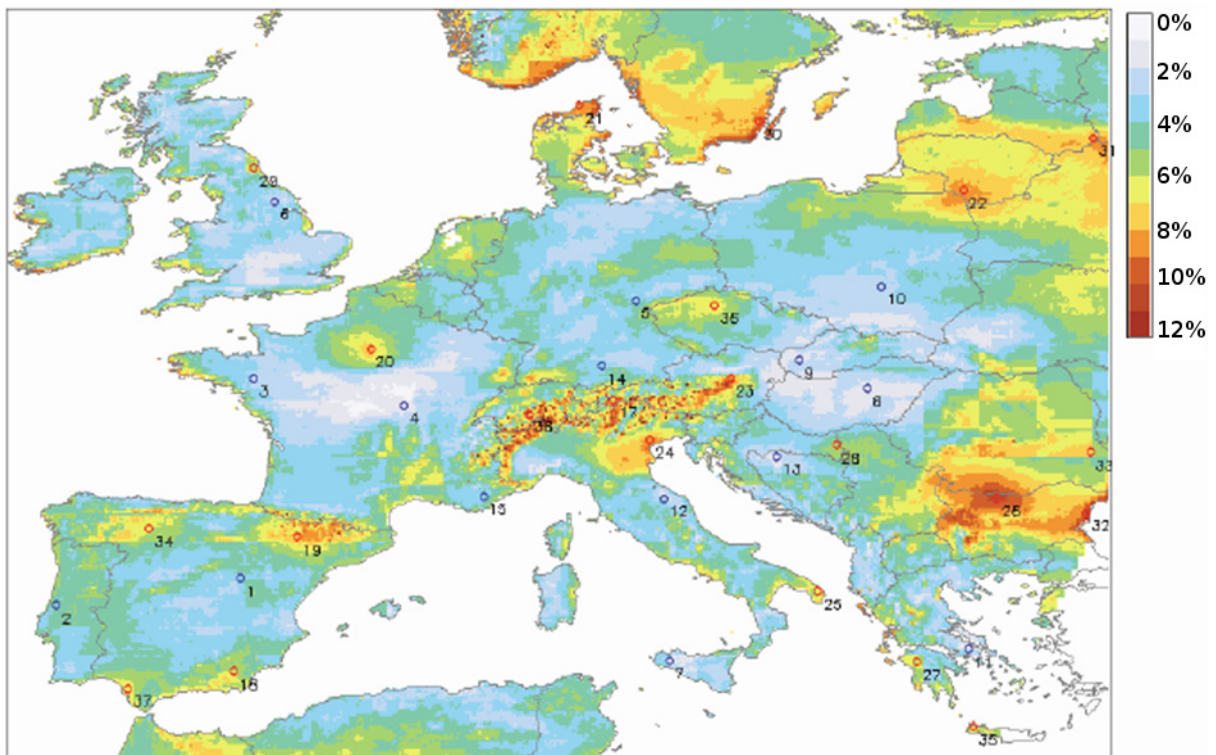


Figure II-12 : Carte des écarts types du cumul annuel de l'éclairement global horizontal entre 6 BDD obtenues à partir d'images satellitaires

Le même type de comparaison a été effectué pour une zone couvrant l'Asie et la Russie en utilisant cette fois des données de stations au sol en même temps que des données dérivées d'images satellites (Budig, Orozaliev, et Vajen, 2010). Cette étude révèle des écarts types dépassant 6% dans 53% de la surface étudiée, ce qui est deux fois supérieur au résultat présenté dans l'étude précédente. Cela peut être dû à l'utilisation combinée de données au sol et de données provenant d'images satellites. En effet, il existe un écart entre les valeurs d'éclairement énergétique dérivées de données satellitaires et les mesures effectuées au sol (Ineichen, 2011). L'étude d'Ineichen montre ainsi que, concernant l'éclairement énergétique

global horizontal (EEG), sur 5 produits fournissant des données satellitaires, l'écart type le plus faible avec des mesures au sol, est de 16%. La performance des données satellitaires varie en fonction de la présence d'une couverture nuageuse et de sa composition. En effet, le satellite voit la couverture nuageuse du dessus et n'a pas forcément les moyens de déterminer son épaisseur ou son opacité. De ce fait, des hypothèses doivent être faites sur l'opacité de la couverture nuageuse en fonction du facteur de réflexion de sa partie supérieure (ce que mesure le radiomètre du satellite). Ces hypothèses peuvent ne pas correspondre à la réalité. Tous les produits ont tendance à surestimer l'éclairement global horizontal pour des conditions de ciel nuageux et couverts. À l'inverse, ils sous-estiment ces valeurs pour des ciels sans nuages, ce type de ciel donnant aussi des écarts types plus faibles.

II.3.2.3. Bases de données existantes

Il existe de nombreuses bases de données permettant d'obtenir des informations sur le rayonnement solaire, elles peuvent provenir : soit uniquement de mesures provenant de stations au sol, soit uniquement de données provenant de satellites, soit de données satellitaires recalées par rapport à des mesures au sol.

À grande échelle, la NASA propose gratuitement des données d'éclairement énergétique global horizontal (NASA, 2013), sur une grande partie de la surface de la planète, dérivées d'images satellitaires provenant du programme SRB (Surface Radiation Budget). Pour l'Europe, il existe différents produits proposant des données dérivées des satellites MeteoSat, comme Helioclim (Helioclim, 2013), SOLEMI (DLR, 2013) et Satel-Light (Satel-Light, 2013). Le choix d'un produit dépend de la zone géographique couverte, de la période disponible ainsi que de la résolution spatiale et temporelle. Lorsque plusieurs produits provenant du même satellite sont disponibles pour une même zone, le choix peut s'orienter par rapport aux modèles qui ont été utilisés pour passer des valeurs mesurées par le capteur du satellite à des valeurs d'éclairement horizontal, lorsque cette information est disponible. La majorité des sources de données citées fournissent des éclaircissements énergétiques, seul Satel-Light fournit également des éclaircissements lumineux.

Les données sur le rayonnement solaire obtenues à partir des stations au sol sont disponibles dans des bases de données nationales ou mondiales. Par exemple, l'Allemagne et les États-Unis disposent de BDD accessibles gratuitement : respectivement DWD (CDC, 2013) et NSRDB (NREL, 2013). D'autres organismes : World Radiation Data Center (WRDC), Global Energy Balance Archive (GEBA), ont récolté des données de stations à l'échelle mondiale pour les proposer dans des BDD. La répartition géographique est cependant très hétérogène, par exemple sur la Figure II-13 chaque croix représente une station faisant partie du réseau dont les données sont distribuées par le WRDC. Certaines régions d'Afrique possèdent de nombreuses stations alors que le reste du continent en est vierge, l'Amérique du nord possède un maillage plutôt régulier, alors que le Brésil qui est le 5^{ème} plus grand pays du monde n'en possède quasiment pas. En réalité, le Brésil possède son propre réseau de stations automatiques depuis le début des années 2000, plus de 450 stations sont en service en 2010 (Rodrigues et Lucas, 2010).

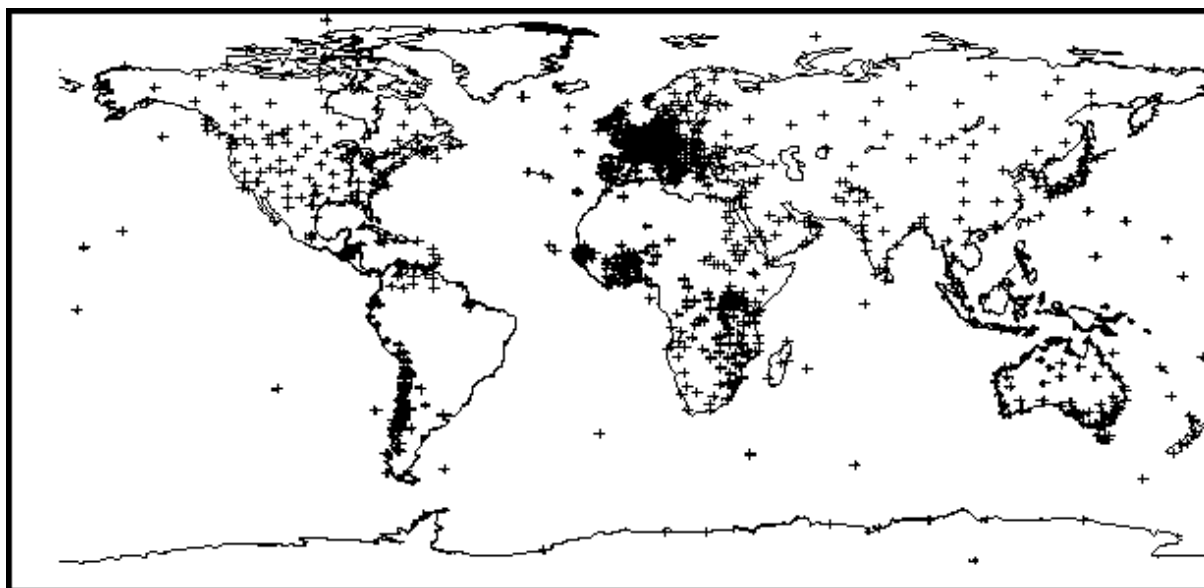


Figure II-13 : Réseau de stations du WRDC entre 1964 et 1993

Il existe aussi des réseaux de stations au sol qui ne fournissent que des données provenant de leurs stations (IDMP, BSRN). Le BSRN (BSRN, 2013) regroupe une quarantaine de stations réparties sur toute la surface du globe dans le but d'obtenir des données pour des types de climats très contrastés. Leur but est de fournir des données permettant de calibrer les mesures effectuées par les satellites, de permettre de valider des modèles théoriques de comportement du flux radiatif. Le réseau IDMP (International Daylight Measurement Programme) a été mis en place par la CIE en 1991 (IDMP, 2013). Il a compté un maximum de 48 stations réparties à travers le monde. Celles-ci mesurent des éclairagements lumineux horizontaux et verticaux, ainsi que des éclairagements énergétiques. Une quinzaine de stations ont mesuré également les luminances de la voûte céleste. Le laboratoire d'accueil de cette thèse fait partie du réseau IDMP et dispose d'une station ; C'est donc cette source de données qui est utilisée pour caractériser le climat au niveau des dispositifs expérimentaux présentés dans ce document.

La résolution temporelle des données varie d'une source à l'autre, le WRDC fournit des cumuls horaires ou journaliers, le GEBA propose des moyennes mensuelles. Le BSRN et l'IDMP disposent eux de données au pas de la minute (5 minutes selon la station).

Le choix d'une source par rapport à une autre dépend en premier lieu de la disponibilité de données pour un lieu donné. Lorsque plusieurs sources sont disponibles, le choix dépend de la qualité souhaitée, cela dépend de l'application. S'il est nécessaire d'obtenir des données sur une grande surface, les données satellitaires sont généralement préférées car elles permettent d'obtenir un maillage régulier qu'il est difficile d'obtenir avec un réseau de stations au sol. Pour obtenir des données en un point précis, il est préférable d'utiliser une station au sol tant que celle-ci se trouve à proximité, par exemple dans un rayon inférieur à 30 km dans le cas de données horaires (Zelenka, Perez, Seals, et Renné, 1999). Toutefois, la qualité des données dépend de l'entretien des instruments de la station, lequel peut varier fortement d'une station à l'autre. Enfin il est possible d'obtenir des séries temporelles sur une durée qui varie en fonction des sources ou encore une année de

référence. Cette année, appelée TRY (Test Reference Year), est construite à partir de données mesurées sur plusieurs années et se veut représentative du climat moyen d'un lieu donné. Aux États-Unis, il existe le format TMY (Typical Meteorological Year) produit par le NREL (National Renewable Energy Laboratory). Cet organisme a créé une base de données météorologiques utilisant ce format. La version TMY3, la plus récente, fournit pour 1020 lieux situés sur le territoire américain des données obtenues à partir de moyennes sur 15 ou 30 années suivant les sites.

Modèles d'efficacité lumineuse

Le plus souvent, les sources de données climatiques contiennent des éclairagements énergétiques qui prennent en compte l'intégralité du spectre solaire. Or, pour étudier la lumière du jour, il faut travailler sur la partie visible du spectre solaire (380 nm à 780 nm) et prendre en compte la sensibilité spectrale de notre système visuel. Il est possible de convertir des valeurs d'éclairagement énergétique en éclairagement lumineux en utilisant l'efficacité lumineuse. Elle peut être définie pour une surface horizontale comme le rapport entre l'éclairagement lumineux (EVG) et l'éclairagement énergétique (EEG) sur cette surface, son unité est le lumen par Watt (équation (II-5)).

$$Eff_{global} = \frac{EVG}{EEG} \quad (II-5)$$

Parmi les modèles d'efficacité lumineuse les plus utilisés se trouvent ceux de (Olseth et Skartveit, 1989), (Littlefair, 1988) et (Perez, Ineichen, Seals, Michalsky, et Stewart, 1990). Ces modèles peuvent prendre en compte la composition de l'atmosphère, la position du soleil et la couverture nuageuse. Ils ont été établis à partir de mesures simultanées de l'éclairagement lumineux et énergétique à des localisations respectivement différentes et ont été comparés expérimentalement (Vartiainen, 2000). Ils donnent des résultats très proches pour le global avec un avantage pour le modèle de Perez *et al.* ; pour le diffus et le direct des écarts plus importants ont été constatés par Vartiainen. En effet, des phénomènes de diffusion se produisent dans l'atmosphère terrestre, la vapeur d'eau agit sur le domaine infrarouge, l'ozone et les aérosols agissent sur l'ultraviolet et le visible (cf. section II.3.1.4). Ainsi, lors de son passage dans l'atmosphère, le rayonnement solaire direct est diminué au profit du rayonnement diffus. De ce fait, l'efficacité lumineuse du rayonnement direct est différente de celle du diffus. Les logiciels de simulation qui fournissent des valeurs d'éclairagement lumineux à partir de données climatiques sont susceptibles d'utiliser différents modèles en fonction des données fournies en entrée.

II.3.2.4. Mesures effectuées à l'ENTPE

Pour les besoins de notre étude, les données qui ont été utilisées ont été obtenues à partir d'une station météo faisant partie du réseau de l'IDMP. Cette station se trouve à 100 mètres d'un dispositif expérimental utilisé dans cette thèse, une maquette de canyon urbain située sur le même site (cf. Figure II-14).



Figure II-14 : Distance de 100 m entre la station IDMP et la maquette d'après l'outil de mesure de Google Earth

Il s'agit de la station météo la plus proche, de plus elle applique le contrôle de qualité défini par la CIE pour les stations du réseau IDMP (CIE TC 3.07, 1994). Les données mesurées sont les suivantes :

- Éclairements lumineux
- global horizontal (EVG)
- diffus horizontal (EVD)
- nord/sud/est/ouest vertical

- Éclairements énergétiques
- global horizontal (EEG)
- diffus horizontal (EED)
- direct normal (EESN)

- Éclairements ultraviolets
- global horizontal UVA
- global horizontal UVB

- Autres
- luminance du zénith
- température sèche
- humidité relative
- direction et vitesse du vent

Les instruments sont contrôlés visuellement tous les 2 ou 3 jours (nettoyage des dômes si nécessaire, réglage des arceaux pour les mesures du diffus). La Figure II-15 montre une vue panoramique des instruments dont est équipée cette station. La position du soleil est comprise dans les données fournies par la station, la hauteur angulaire et l'azimut du soleil sont calculés à partir des équations (II-2) dont la déclinaison solaire est donnée par l'algorithme de Walraven (Walraven, 1978).



Figure II-15 : Vue panoramique des instruments de la station IDMP de Vaulx-en-Velin, durant l'année 2005

Les données mesurées par la station sont analysées selon un contrôle de qualité défini par la CIE (CIE TC 3.07, 1994). Les valeurs nocturnes sont aussi analysées car elles peuvent révéler des dysfonctionnements des appareils de mesure. Le jour, les valeurs mesurées doivent se trouver dans les limites physiquement acceptables (exemple : température d'air comprise entre -20°C et 40°C). Entre les éclairements mesurés, il existe des lois qui doivent être respectées. Par exemple, l'éclairement diffus horizontal ne peut être supérieur à l'éclairement global horizontal, cela étant valable aussi bien sur l'éclairement énergétique que l'éclairement lumineux. D'autres contrôles du même type sont effectués entre les différentes composantes du rayonnement solaire. De plus, les valeurs mesurées par les sondes sont comparées à des modèles (d'efficacité lumineuse par exemple) afin de vérifier que l'écart entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées ne dépasse pas un certain seuil. Les cellules de la station ont été étalonnées à intervalle régulier en les comparant à une cellule de référence.

Sur la station IDMP de Vaulx-en-Velin, ainsi que sur la plupart des stations météo du monde, la mesure du rayonnement solaire ou de la lumière naturelle consiste en un éclairage sur une surface : horizontale, verticale ou perpendiculaire aux rayons du soleil. L'éclairement ne donne qu'une information partielle sur la directionnalité de la lumière provenant de la voûte céleste. Pour obtenir une information complète sur la distribution des luminances de la voûte céleste, il est nécessaire de la mesurer à l'aide d'un appareil appelé "scanner de ciel", ou de la calculer à l'aide d'un "modèle de ciel".

II.3.3. Modélisation des luminances du ciel

Les bases de données proposant des mesures du rayonnement solaire fournissent généralement des éclairements énergétiques. Or dans le cadre de l'étude de la lumière naturelle, il est nécessaire de disposer d'éclairements lumineux. Les modèles d'efficacité lumineuse permettent alors d'effectuer cette conversion, lorsque les éclairements lumineux n'ont pas été mesurés mais que les éclairements énergétiques sont disponibles. Dans le canyon urbain plus précisément, la visibilité réduite du ciel en fait un facteur critique. Nous

avons vu qu'il était possible de caractériser cette obstruction à l'aide d'indicateurs, cependant il est important de déterminer la portion de ciel qui reste visible et qui constitue, avec le soleil lorsqu'il est visible, la source lumineuse la plus importante. À défaut de pouvoir mesurer la distribution des luminances du ciel systématiquement, le seul moyen de pouvoir quantifier la contribution du ciel est d'utiliser un modèle de ciel. Ces modèles permettent de décrire la répartition des luminances sur la voûte céleste à partir des valeurs d'éclairement global, diffus et direct normal généralement fournies par les bases de données décrites précédemment.

II.3.3.1. Modèles de luminances du ciel

Il est possible de mesurer la luminance pour différentes zones du ciel en utilisant un scanner de ciel. Il s'agit d'un luminance-mètre monté sur une base motorisée qui permet de mesurer la luminance en différents points de la voûte céleste. La CIE préconise d'utiliser un maillage de 145 points (Tregenza, Perez, Michalsky, et Seals, 1994). Ce maillage est généralement adopté par les scanners de ciel. L'instrument permet d'effectuer des mesures de luminance pour un angle solide donné par le constructeur (proche de 11°). Cela correspond au maillage de la CIE qui est régulier en hauteur angulaire avec un intervalle de 12° . Cet appareil est coûteux et nécessite un entretien régulier, de plus il faut entre 1 et 4 minutes pour effectuer un scan complet du ciel en fonction de l'appareil. Dans cet intervalle de temps, la position des nuages dans le ciel peut varier fortement si la vitesse du vent est élevée. De ce fait la répartition des luminances peut être erronée. Une étude a montré qu'il était possible de mesurer la luminance en tout point du ciel à l'aide de photographies provenant d'un appareil équipé d'un objectif fisheye étalonné en luminance (Kobav, 2009). L'appareil doit être protégé des intempéries par un dôme dont la transmission doit être caractérisée pour être la plus neutre possible sur le domaine visible, cette protection ne doit pas influencer la prise de vue. Les effets à long terme de l'exposition au rayonnement solaire direct risquent d'endommager le capteur CCD du boîtier de l'appareil et donc de fournir des résultats erronés. Les capteurs CMOS, de technologie plus récente, présentent une moindre sensibilité à ce phénomène. Des modèles de ciel ont été élaborés et validés dans le but d'obtenir une répartition théorique des luminances sans avoir besoin de mesurer les luminances des différents éléments de ciel.

Modèles par type de ciel

Le modèle le plus simple est le ciel uniforme pour lequel la luminance est constante en tout point du ciel. Cette répartition est caractéristique d'une situation de brouillard. Ce modèle n'est donc pas représentatif de la réalité, dans la majorité des cas, mais présente l'avantage de pouvoir simplifier les calculs.

La CIE a adopté en 1955 un modèle de ciel couvert basé sur le travail de Moon et Spencer (Moon et Spencer, 1942) et défini par Fritz (Fritz, 1955). Ce modèle de ciel présente une luminance L_Z au zénith trois fois supérieure à la luminance L d'un point du ciel situé à l'horizon. La Figure II-16 schématise la position d'un élément de ciel et du soleil sur la voûte céleste, dans le référentiel local, représentant ainsi les différentes variables qui vont être utilisées dans cette section.

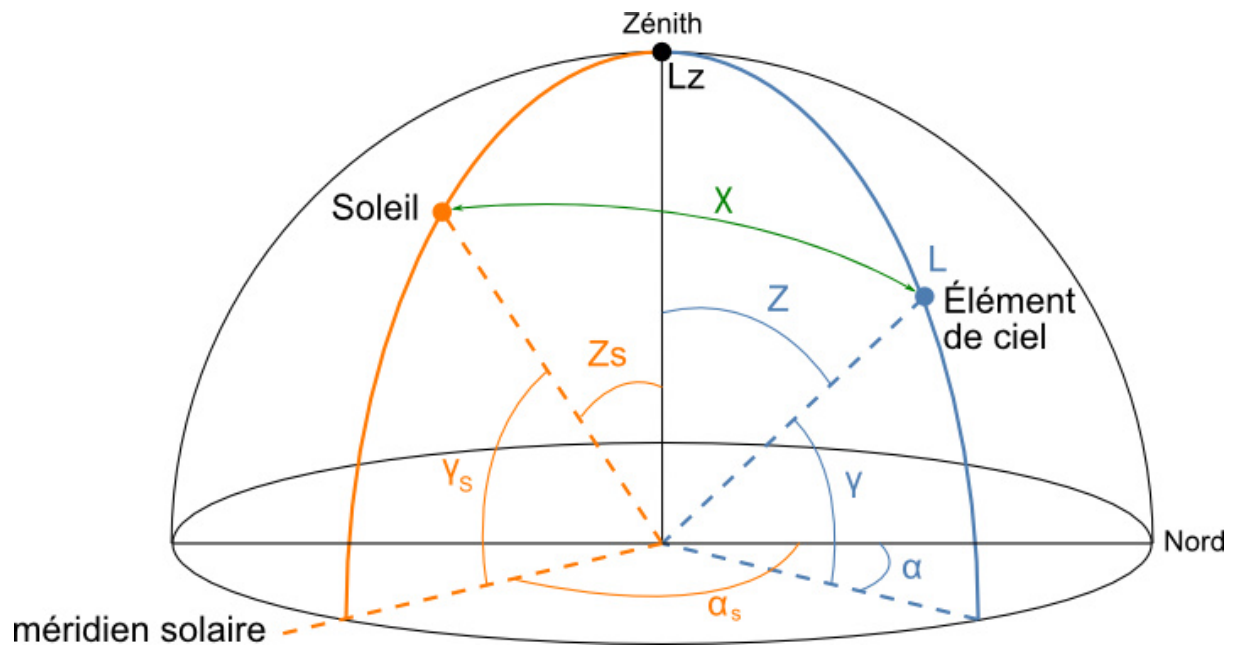


Figure II-16 : Schéma de la position du soleil et d'un élément de ciel

La luminance L d'un point quelconque relativement à la luminance L_Z du zénith se calcule selon le cosinus de l'angle zénithal Z du point considéré :

$$\frac{L}{L_Z} = \frac{1 + 2\cos Z}{3} \quad (II-6)$$

La Figure II-17 illustre différentes distributions de luminances du ciel. Les luminances sont représentées en niveaux de gris, plus un pixel est foncé, plus la luminance de l'élément de ciel auquel il correspond est faible par rapport à la luminance au zénith.

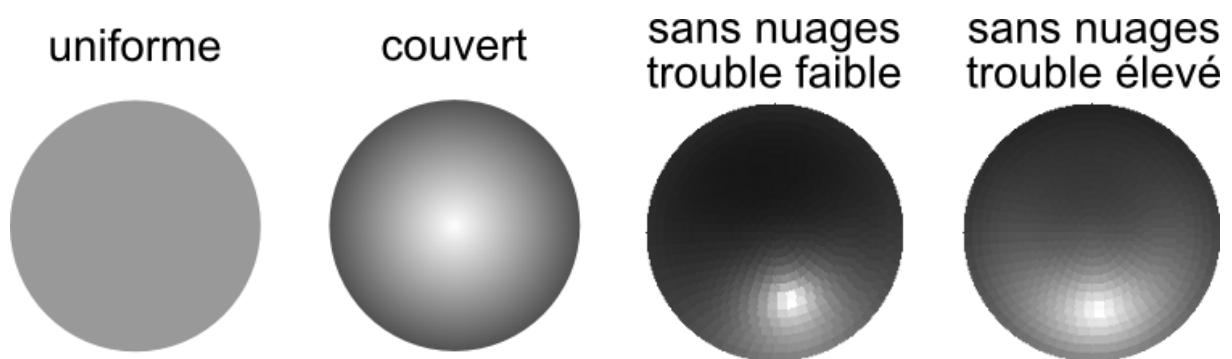


Figure II-17 : Distribution des luminance pour des types de ciels typiques

Un ciel uniforme ne présente pas de variation de luminance en fonction de la position des éléments de ciel, il en résulte un disque de couleur uniforme. Pour un ciel couvert tel que celui décrit par l'équation (II-6), la luminance diminue progressivement en s'éloignant du zénith qui représente la luminance la plus élevée, d'où un dégradé concentrique. Pour un ciel sans nuages, la distribution s'apparente à l'inverse de la distribution pour un ciel

couvert avec des luminances qui sont plus élevées à l'horizon. Cependant la position du soleil peut être distinguée contrairement aux deux autres types représentés. Deux cas sont présentés, l'un avec une atmosphère pure, et l'autre avec une atmosphère troublée. En présence de trouble, la diffusion est importante et résulte en un ciel plus lumineux.

La CIE retient en 1973, une représentation de ciel clair (un ciel sans nuages) proposée par Kittler (R. Kittler, 1967) en utilisant le principe d'indicatrices décrit dans la section suivante. Il s'agit de deux fonctions : f (indicatrice de diffusion) et φ (indicatrice de gradation) qui permettent respectivement de tenir compte des phénomènes de diffusion et des variations de la masse d'air optique, pour chaque élément de ciel en fonction de l'angle χ entre l'élément de ciel considéré et le soleil, ainsi que l'angle zénithal Z de cet élément de ciel. Ces fonctions sont décrites par les équations (II-10). Elles sont décrites plus en détail dans la section suivante dans laquelle elles sont utilisées pour classer les types de ciel.

Indicatrice de diffusion :

$$f(\chi) = 1 + N \times (\exp(-3\chi) - 0.009) + M \times \cos^2\chi \quad (II-7)$$

Indicatrice de gradation :

$$\varphi(Z) = 1 - \exp\left(\frac{-0.32}{\cos Z_s}\right)$$

Dans son document, la CIE propose de distinguer deux expressions différentes pour une zone rurale ou urbaine à partir des modèles de ciel proposés par Kittler (R. Kittler, 1967) et Gusev (Krochmann et Seidl, 1974) selon le principe d'indicatrices avec $f(\chi)$ défini à l'aide des équations (II-8). Cela permet de tenir compte du contenu de l'atmosphère en aérosols : une atmosphère urbaine a un contenu en aérosols plus élevé qu'une atmosphère rurale. Le contenu en aérosols agit sur la distribution des luminances du ciel et notamment sur la luminosité de la zone circumsolaire.

CIE Kittler :

$$f(\chi) = 0.91 + 10 \exp(-3\chi) + 0.45\cos^2\chi \quad (II-8)$$

CIE Gusev :

$$f(\chi) = 0.856 + 16 \exp(-3\chi) + 0.3\cos^2\chi$$

La luminance d'un élément de ciel peut être calculée à partir de ces équations et de l'équation (II-15) (page 110).

Les modèles de ciel sans nuages et couvert ne permettant pas de représenter les autres conditions de ciel, Nakamura a mis au point en 1985, une formule permettant de caractériser un ciel intermédiaire (Nakamura, Oki, et Hayashi, 1985) :

$$\frac{L}{L_z} = \frac{h(\gamma_s, \gamma, \chi)}{h\left(\gamma_s, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} - \gamma_s\right)}$$

$$h(\gamma_s, \gamma, \chi) = a(\gamma_s, \gamma) \exp[b(\gamma_s, \gamma) \chi] \quad (II-9)$$

$$a(\gamma_s, \gamma) = 0.43[\gamma + 4.799 + 1.35 \sin(2.6\gamma_s + 0.316) \sin(3.59\gamma_s - 0.009) + 2.31]$$

$$b(\gamma_s, \gamma) = -0.563[(\gamma + 1.059)(\gamma_s - 0.008) + 0.812]$$

$$h\left(\gamma_s, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} - \gamma_s\right) = 0.988[\sin(2.6\gamma_s + 0.316) + 2.772] \times \exp[-1.481(\gamma_s + 0.301)(1.571 - \gamma_s)]$$

Avec γ la hauteur angulaire de l'élément de ciel et γ_s la hauteur angulaire du soleil en radians. La hauteur angulaire est égale à la différence de $\pi/2$ et de l'angle zénithal.

Modèles "tout temps"

Nous avons vu jusqu'alors des modèles permettant de représenter la répartition des luminances pour un ciel totalement couvert, un ciel sans nuages et un ciel intermédiaire qui sert donc pour à peu près toutes les situations réelles qui peuvent exister. Afin de pouvoir disposer d'un outil capable de représenter la distribution des luminances des ciels réels avec une plus grande fidélité, les modèles "tout temps" ont été développés. Il s'agit donc de modèles uniques de distribution des luminances qui peuvent être utilisés pour des types de ciels allant de couvert à clair en passant par plusieurs représentations de ciels intermédiaires. Les modèles ASRC-CIE (Perez *et al.*, 1990) et "tout temps" de Perez (Perez, Seals, et Michalsky, 1993) vont être présentés car ils sont utilisés par les logiciels de simulation présentés dans le chapitre II.5.

Les deux modèles de Perez sont basés sur les indices de clarté ε et de luminosité Δ du ciel définis de la façon suivante :

$$\varepsilon = \frac{\frac{EESN}{EED} + 1 + 1.041Z_s^3}{1 + 1.041Z_s^3} \quad (II-10)$$

$$\Delta = \frac{EED \times m}{EESNO} \approx \frac{EED}{EENSO \times \cos Z_s}$$

Ces deux indices sont calculés à partir de l'éclairement énergétique diffus horizontal EED, de l'éclairement énergétique direct normal en dehors de l'atmosphère terrestre : EESNO, et à la surface de la terre : EESN, ainsi qu'à partir de la masse d'air optique m et de l'angle zénithale du soleil Z_s . L'indice de clarté permet de caractériser le trouble atmosphérique. Pour une atmosphère pure, donc présentant une faible valeur de trouble, la valeur de EESN est grande par rapport à celle de EED. Dans ce cas, la valeur de ε peut dépasser 6. Si l'atmosphère est trouble ou que le ciel est couvert, l'écart entre EESN et EED diminue et ε tend vers sa valeur minimale de 1, pour EESN=0. L'indice de luminosité permet de représenter l'influence de la couverture nuageuse sur la luminosité du ciel. Plus Δ est important, plus le ciel est lumineux, cela est exprimé par le rapport entre l'éclairement

énergétique diffus horizontal et l'éclairement énergétique direct horizontal extraterrestre. Pour des ciels couverts, cela permet de dire que l'on a affaire à un ciel couvert lumineux, indépendamment de la hauteur du soleil. Pour des ciels sans nuages, si Δ est élevé, on a affaire à un ciel troublé.

Le modèle de ciel ASRC-CIE a lui aussi été établi à partir de mesures sur site, il procède en fait à une interpolation linéaire entre quatre modèles existants décrivant les ciels couverts, intermédiaire et sans nuages que nous avons vu précédemment. Le choix du modèle à utiliser dépend de la valeur de ε :

Pour $\varepsilon \leq 1,2$:

$$\frac{L}{L_Z} = (1 - a) \left(\frac{L}{L_Z} \right)_{Fritz} + a \left(\frac{L}{L_Z} \right)_{Nakamura}$$

$$\text{Avec } a = \min \left\{ 1, \max \left[0, \frac{\varepsilon-1}{0,2}, \frac{\Delta-0,05}{0,4} \right] \right\}$$

Pour $1,2 < \varepsilon \leq 3,0$:

$$\frac{L}{L_Z} = (1 - b) \left(\frac{L}{L_Z} \right)_{Nakamura} + b \left(\frac{L}{L_Z} \right)_{Gusev} \quad (II-11)$$

$$\text{Avec } b = \frac{\varepsilon-1,2}{1,8}$$

Pour $\varepsilon > 3,0$:

$$\frac{L}{L_Z} = (1 - c) \left(\frac{L}{L_Z} \right)_{Gusev} + c \left(\frac{L}{L_Z} \right)_{Kittler}$$

$$\text{Avec } c = \min \left\{ 1, \frac{\varepsilon-3}{3} \right\}$$

Le modèle "tout temps" de Perez, lui, définit 5 coefficients a , b , c , d et e qui permettent de caractériser le ciel. Le coefficient a décrit le fait que l'horizon soit plus ou moins lumineux que le zénith et le coefficient b sert à en exprimer le gradient. Le coefficient c décrit l'intensité de l'auréole solaire et d en définit la taille. Enfin le coefficient e donne la quantité de lumière diffuse. Ils sont calculés à l'aide de l'équation suivante :

Pour $x = a, b, c, d, e$:

$$x = x_1(\varepsilon) + x_2(\varepsilon)Z_S + \Delta[x_3(\varepsilon) + x_4(\varepsilon)Z_S]$$

Sauf pour les ciels couverts quand $\varepsilon < 1,065$ où : (II-12)

$$c = \exp[\Delta(c_1 + c_2Z_S)]^{c_3} - 1$$

$$d = -\exp[\Delta(d_1 + d_2Z_S)] + d_3 + \Delta d_4$$

Les valeurs respectives de chaque coefficient $a_{1...4}$ à $d_{1...4}$ doivent être récupérées dans un tableau, ces valeurs ont été établies à partir de plus de 16 000 mesures de scanners de ciel, effectuées à Berkeley en Californie entre 1985 et 1987.

Dans sa thèse, Kobav (Kobav, 2009) a effectué une comparaison entre les distributions des luminances obtenues à partir des modèles de Perez, Igawa (Igawa, Koga, Matsuzawa, et Nakamura, 2004) et ASRC-CIE, et 13 000 scans de ciels. La méthode utilisée est décrite dans la section suivante (cf. section II.3.4.2). Kobav montre que le modèle ASRC-CIE est le mieux corrélé avec les mesures et que le modèle "tout-temps" présente l'inconvénient de ne pas pouvoir modéliser les conditions du ciel couvert CIE. Une autre comparaison entre 10 modèles de ciel différents a été menée en utilisant la même méthode (Ineichen, 2005). La distribution des luminances obtenue à partir de chacun des modèles a été comparée avec 1430 scans de ciels. Le modèle ASRC-CIE est à nouveau l'un des modèles offrant la meilleure précision.

II.3.4. Classification CIE des ciels

Les modèles de luminance précédemment décrits permettent de connaître la distribution des luminances du ciel à partir des éclairagements énergétiques horizontaux mesurés au sol ou estimés à partir d'images satellites. La CIE a défini 15 types de ciels caractérisés par une distribution des luminances spécifique. Ces ciels vont d'un ciel couvert de nuages épais à un ciel sans nuages avec une atmosphère très trouble. Grâce aux modèles de luminance et à la classification des ciels de la CIE, il est possible d'établir un lien entre les valeurs des éclairagements horizontaux et le type de ciel à tout moment de la journée. La position du soleil ainsi que la distribution des luminances du ciel a évidemment un impact sur la distribution de la lumière sur les façades du canyon urbain. Chaque mesure sur maquette sera donc caractérisée par son type de ciel CIE, ce qui permettra d'établir des relations entre un type de ciel et les éclairagements sur les façades des bâtiments d'un canyon urbain.

II.3.4.1. Principes de la classification et ciels types

Un élément de ciel est défini comme une zone de la voûte céleste sous-tendue par un angle solide connu. La luminance d'un élément de ciel dépend de sa position sur la voûte céleste. En utilisant la représentation du ciel sous forme de solide photométrique de Kittler (R. Kittler, 1967), il est possible d'utiliser la notion d'indicatrice mentionnée dans la section précédente. La distance angulaire χ entre le centre d'un élément de ciel et la position du soleil permet de définir l'indicatrice de diffusion $f(\chi)$:

$$f(\chi) = 1 + c \left[\exp(d\chi) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \quad (II-13)$$

Avec :

$$\chi = \arccos(\cos Z_S \cdot \cos Z + \sin Z_S \cdot \sin Z \cdot \cos|\alpha - \alpha_S|)$$

Cette fonction permet de caractériser les phénomènes de diffusion sur les composants de l'atmosphère que sont les aérosols. Cette diffusion est maximale pour des ciels sans nuages de trouble atmosphérique élevé. Elle se traduit par une région circumsolaire très étalée et présentant des luminances élevées. L'angle Z entre le centre de cet élément et le zénith permet de définir l'indicatrice de gradation $\varphi(Z)$:

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad (II-14)$$

Cette fonction définit une relation entre l'angle zénithal d'un élément de ciel et sa luminance par rapport à celle du zénith. Cela permet de tenir compte de la masse d'air optique, la luminance à l'horizon est plus faible car le rayonnement solaire est absorbé et diffusé par un plus grand nombre de molécules de l'atmosphère. La luminance L d'un élément de ciel se calcule relativement à la luminance L_Z au zénith à l'aide de la fonction suivante :

$$\frac{L}{L_Z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_S) \cdot \varphi(0)} \quad (II-15)$$

Les coefficients a et b définissent la fonction $\varphi(Z)$. Les coefficients c , d et e définissent la fonction $f(\chi)$. La CIE (CIE, 2004) a standardisé les valeurs des coefficients permettant de définir 6 indicatrices de diffusion et 6 indicatrices de gradation (cf. Figure II-18).

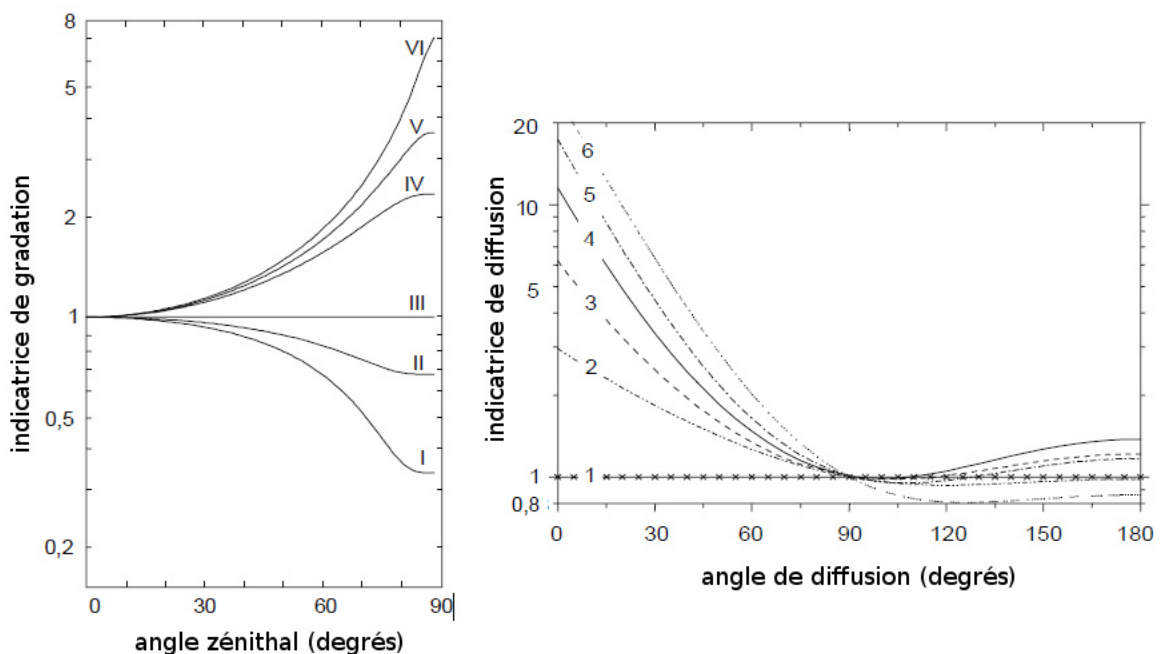


Figure II-18 : Courbes d'indicatrices de gradation (à gauche), et de diffusion (à droite), retenues par la CIE (CIE, 2004)

La combinaison de ces différentes indicatrices permettrait de créer 36 types de ciels aux distributions de luminances différentes. La CIE n'a retenu que 15 d'entre eux : les plus fréquemment rencontrés. Les valeurs des coefficients qui caractérisent la distribution des luminances des 15 types de ciel CIE sont présentées dans le Tableau II-1, avec la description du ciel fournie par la CIE.

| Type | a | b | c | d | e | Description |
|------|------|-------|----|------|------|---|
| 1 | 4.0 | -0.70 | 0 | -1.0 | 0.00 | Ciel couvert CIE standard, forte gradation de la lumière vers le zénith, uniformité azimutale |
| 2 | 4.0 | -0.70 | 2 | -1.5 | 0.15 | Ciel couvert, forte gradation de la luminance vers le zénith, luminosité légèrement supérieure vers le soleil |
| 3 | 1.1 | -0.80 | 0 | -1.0 | 0.00 | Ciel couvert, gradation zénithale modérée, uniformité azimutale |
| 4 | 1.1 | -0.80 | 2 | -1.5 | 0.15 | Ciel couvert, gradation zénithale modérée, gradation légère vers le soleil |
| 5 | 0.0 | -1.00 | 0 | -1.0 | 0.00 | Ciel couvert, uniformité totale |
| 6 | 0.0 | -1.00 | 2 | -1.5 | 0.15 | Ciel partiellement nuageux, gradation zénithale nulle, gradation légère vers le soleil |
| 7 | 0.0 | -1.00 | 5 | -2.5 | 0.30 | Ciel partiellement nuageux. gradation zénithale nulle, zone circumsolaire plus lumineuse |
| 8 | 0.0 | -1.00 | 10 | -3.0 | 0.45 | Ciel partiellement nuageux, gradation zénithale nulle, couronne solaire distincte |
| 9 | -1.0 | -0.55 | 2 | -1.5 | 0.15 | Ciel partiellement nuageux, le soleil est totalement masqué |
| 10 | -1.0 | -0.55 | 5 | -2.5 | 0.30 | Ciel partiellement nuageux, zone circumsolaire plus lumineuse |
| 11 | -1.0 | -0.55 | 10 | -3.0 | 0.45 | Ciel bleu laiteux, couronne solaire distincte |
| 12 | -1.0 | -0.32 | 10 | -3.0 | 0.45 | Ciel clair CIE standard, ciel bleu sans nuages faiblement pollué |
| 13 | -1.0 | -0.32 | 16 | -3.0 | 0.30 | Ciel clair CIE standard, ciel bleu sans nuages fortement pollué |
| 14 | -1.0 | -0.15 | 16 | -3.0 | 0.30 | Ciel sans nuages, large couronne solaire |
| 15 | -1.0 | -0.15 | 24 | -2.8 | 0.15 | Ciel sans nuages bleu laiteux, large couronne solaire |

Tableau II-1 : Paramètres permettant de décrire les types de ciel CIE (CIE, 2004)

II.3.4.2. Méthode de détermination des ciels types

Il est possible de déterminer le type de ciel CIE, sans scanner de ciel, à partir de données mesurées sur la station IDMP. Cette méthode s'appuie sur celle proposée par Tregenza (Tregenza, 2004). Dans un premier temps, le ciel est découpé en un ensemble de zones

d'angle solide identique. Si l'on considère un point sur l'hémisphère qui représente la voûte céleste, sa hauteur angulaire γ varie entre 0° (à l'horizon) et 90° (au zénith). Dans un premier temps, on choisit un pas de discrétisation des valeurs que peut prendre γ . Par exemple si le pas est de 9° , cela signifie que l'hémisphère est découpé en 10 sections ($90^\circ/9^\circ$) comme le montre la Figure II-19.

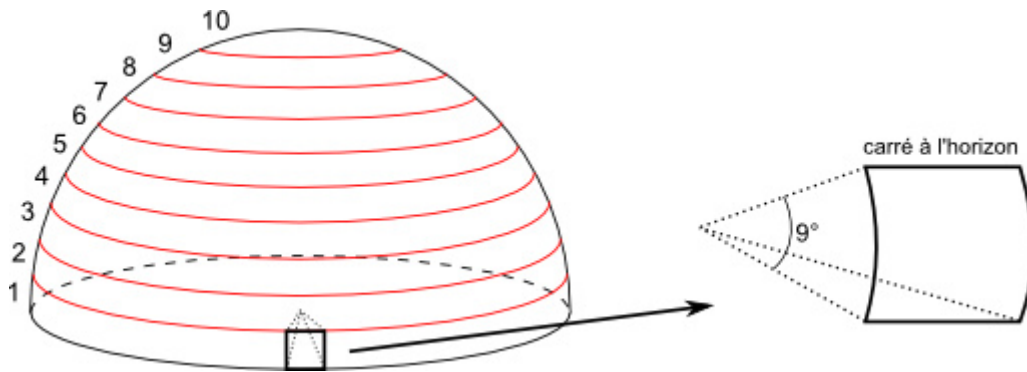


Figure II-19 : Découpage du ciel en 10 sections parallèles au plan horizontal

Chaque section de l'hémisphère est ensuite découpée en plusieurs sections de façon à conserver un angle solide donné. Cet angle solide correspond à celui qui permet de tracer un carré sur la ligne d'horizon comme sur la Figure II-19. Le ciel est donc découpé selon une grille dont les caractéristiques sont connues. À chaque instant donné, la luminance du point situé au centre de chaque élément de cette grille est calculée selon le modèle ASRC-CIE décrit dans la section précédente. Pour la même position du soleil, la luminance relative (à la luminance du zénith) du centre de chaque grille est déterminée pour chacun des 15 types de ciel CIE. Il suffit ensuite de calculer l'écart quadratique moyen (EQM, cf. équation (III-16), page 214) entre les valeurs de la grille selon le modèle ASRC-CIE et chacune des grilles des types de ciel CIE. Le type de ciel correspondant aux données soumises au modèle correspond à celui des 15 types de ciel CIE qui conduit à l'écart le plus faible.

La finesse de la grille définit la qualité de la comparaison et le temps de calcul. En effet, plus son maillage est grossier, moins les spécificités de chaque type de ciel seront représentées. En revanche, plus le maillage est fin, plus le temps de calcul est important. Pour une journée présentant presque tous les types de ciel, la comparaison a été faite en utilisant différentes valeurs pour le pas de discrétisation en hauteur angulaire. Le Tableau II-2 présente les résultats obtenus. La première ligne représente la référence utilisée pour calculer l'erreur commise en augmentant la taille des sections. Cette grille de référence se base sur une hauteur angulaire de section de 1° , soit un total de 90 sections. Cela conduit à un ensemble de 20673 éléments de même angle solide. Les types de ciels pour chaque minute de la journée choisie ont été calculés en utilisant ce découpage, soit un total de 541 minutes. Les types de ciel ont ensuite été calculés pour cette même journée en utilisant des grilles de plus en plus grossières. L'erreur représentée dans le Tableau II-2 correspond au pourcentage de situations pour lesquelles le type de ciel est différent de celui calculé pour la grille de référence. Le temps d'exécution du programme pour le calcul du type de ciel pour une seule position de soleil est donné dans le tableau, cela permet d'isoler la portion de code qui doit être évaluée. En utilisant des sections de 5° de hauteur angulaire au lieu de 2° , le temps d'exécution est divisé par un facteur de 4,7 alors que l'erreur commise reste nulle.

| Hauteur angulaire d'une section | Nombre d'éléments de ciel | Pourcentage d'erreur | Temps d'exécution pour une seule position de soleil |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------|---|
| 1° | 20673 | référence | 995 ms |
| 2° | 5181 | 0,0% | 271 ms |
| 5° | 835 | 0,0% | 58 ms |
| 10° | 212 | 1,1% | 24 ms |
| 15° | 97 | 2,2% | 18 ms |
| 30° | 26 | 11,3% | 8 ms |

Tableau II-2 : Influence de la finesse du découpage de la voûte céleste sur l'erreur dans la détermination du type de ciel

Pour une grille avec un intervalle de 5°, le ciel est divisé en 835 valeurs, et il s'agit de la grille la moins fine qui permet d'obtenir exactement les mêmes résultats qu'avec une grille au pas de 1°, en divisant par 25 le nombre d'éléments de ciel. C'est ce découpage qui a été utilisé pour notre étude. Notons qu'en utilisant un autre jour, il est possible qu'un intervalle de 6° ou de 4° ait été choisi. Pour garantir la précision, il semble préférable de ne pas choisir un intervalle plus grand. Étant donné que le temps d'exécution croît rapidement avec la réduction de l'intervalle, la valeur de 5° a été conservée. Il est remarquable de constater que pour cette journée, même en ne divisant la hauteur angulaire qu'en 3 sections (avec un écart de 30°) 88% des ciels conservent la même classification.

La Figure II-20 montre un exemple du résultat obtenu avec la méthode décrite précédemment. Le type de ciel correspond bien aux conditions observées, les graphiques contiennent l'éclairement direct horizontal (en jaune) et diffus horizontal (en bleu clair). On constate bien que le type de ciel tend vers les valeurs maximales lorsque le direct est grand par rapport au diffus.

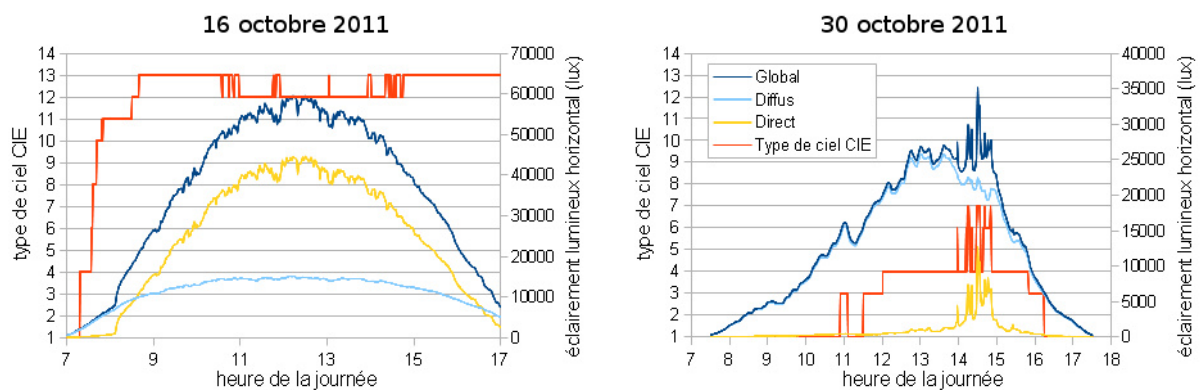


Figure II-20 : Type de ciel CIE (en rouge) calculé pour un jour avec un ciel peu nuageux (à gauche) et un jour avec un ciel couvert (à droite)

Nous disposons désormais de tous les éléments nécessaires pour effectuer des simulations de rayonnement solaire. La géométrie de la scène peut être décrite ainsi que les revêtements des surfaces. Le climat lumineux peut être mesuré et une information précise sur la distribution des luminances peut être dérivée à partir de ces mesures. Nous allons maintenant décrire les principes utilisés pour effectuer les calculs de rayonnements en milieu urbain ainsi que différentes approches qui ont déjà été menées.

II.4. Méthodes de calcul de l'éclairement des bâtiments en milieu urbain

En milieu urbain, la quantité d'énergie solaire reçue par l'enveloppe des bâtiments peut provenir de 3 sources différentes : le rayonnement direct apporté par le soleil qui constitue l'apport le plus important (lorsqu'il est visible), le rayonnement diffus provenant du ciel dont la contribution varie en fonction de la couverture nuageuse, enfin, le rayonnement du ciel et du soleil, réfléchi par le sol et les façades qui agissent de ce fait comme des sources secondaires. Le facteur de réflexion du sol et des façades a donc une influence sur la quantité de lumière disponible au sein du canyon urbain et mérite d'être étudié. Le calcul du rayonnement solaire reçu par une façade est soumis à la complexité du milieu urbain, des outils pour décrire sa géométrie ont été abordés (cf. section I.3.4). Nous allons voir dans ce chapitre, les différents outils et approches qui peuvent être utilisés ainsi que certains modèles choisis dans la bibliographie pour leur pertinence.

II.4.1. Calcul des échanges radiatifs au sein d'un canyon urbain

Le bilan radiatif d'un canyon urbain peut être calculé en utilisant une méthode analytique, c'est-à-dire en décrivant les équations qui régissent le système. Cela est possible en utilisant une représentation simplifiée de la géométrie du canyon. La deuxième méthode consiste à discrétiser les surfaces de la géométrie et à appliquer un calcul itérativement sur tous les éléments ainsi créés. Cette méthode a l'avantage de pouvoir être utilisée pour des géométries quelconques ; la précision obtenue dépend de la résolution du découpage effectué, laquelle est directement liée au temps de calcul. Il a été montré que les méthodes qui utilisent des calculs simplifiés peuvent mener à des écarts d'autant plus élevés que le rapport d'aspect H/W est élevé ou que le facteur de réflexion des matériaux est élevé (Harman, Best, et Belcher, 2004). Les méthodes analytiques basées sur des représentations simplifiées sont plus rapides mais moins précises. Les méthodes reposant sur un maillage des surfaces sont plus lentes, avec un temps de calcul dépendant du nombre de mailles. Il est nécessaire de trouver un compromis entre la précision souhaitée et le temps de calcul. Nous allons voir dans la section suivante les principes de base du calcul d'échanges radiatifs entre deux surfaces.

II.4.1.1. Méthodes de calcul et algorithmes

Quel que soit le nombre de réflexions considéré (zéro, une ou plusieurs), les méthodes de calcul d'échanges radiatifs utilisent des calculs géométriques, en s'appuyant sur les lois générales de l'optique, pour déterminer le comportement du rayonnement solaire dans une scène.

Le principe élémentaire du calcul d'échanges radiatifs entre deux objets repose sur la considération de la surface d'échange de chacun. Les photons se déplacent en ligne droite, il est possible de calculer la quantité de rayonnement reçue par une surface depuis

une autre surface en connaissant leur aire et leur position dans l'espace. Ce principe est représenté par le facteur de forme (cf. annexe K). L'utilisation de ce principe repose sur l'hypothèse que les surfaces considérées sont parfaitement diffusantes, c'est-à-dire que leur luminance est constante dans toutes les directions de l'hémisphère adjacent dans lequel se propage le rayonnement. D'une manière générale, les études sur les calculs d'éclairement au sein d'une rue considèrent que les façades des bâtiments sont recouvertes de matériaux parfaitement diffusants comme par exemple (Mardaljevic et Rylatt, 2003), (Wa-Gichia, 1998) et (Tsangrassoulis *et al.*, 1999). Pour estimer la quantité d'énergie sur les surfaces d'une géométrie en 3D, deux types d'algorithmes informatiques sont utilisés : la radiosité et le lancer de rayons.

La radiosité est une méthode qui peut s'appliquer lorsque les surfaces sont considérées comme parfaitement diffusantes, c'est-à-dire suivant la loi de Lambert (Goral, Torrance, Greenberg, et Battaile, 1984). Les surfaces de la scène sont discrétisées sous forme d'un maillage. Pour chaque maille, le facteur de forme prenant en compte tous les objets de la scène est calculé. Ces coefficients sont intégrés à un système d'équations linéaires dont la résolution permet d'obtenir l'éclairement sur chacune des mailles. La radiosité nécessite un temps de calcul qui dépend de la complexité de la scène et qui peut rapidement devenir très important, d'autant que tous les facteurs de forme doivent être stockés, ce qui peut nécessiter une grande quantité de mémoire en fonction du taux d'échantillonnage. Le logiciel CitySim est un bon exemple de programme utilisant cette approche pour effectuer des simulations de rayonnement solaire, il est décrit en détail dans la section II.5.2.1.

Le lancer de rayons consiste à suivre le trajet d'un ensemble de rayons partant de la source de lumière (ou du point de vue de la scène) (Ward et Rubinstein, 1988). Chaque rayon possède un poids initial, lors de chaque intersection avec un élément de la scène, de nouveaux rayons sont lancés à partir du point d'impact, le poids de ces rayons dépend des propriétés des matériaux et du poids du rayon incident. Le chemin emprunté par les rayons peut être déterminé à l'aide d'une méthode statistique dite de Monte-Carlo. Le lancer de rayons permet de gérer les phénomènes de réflexion spéculaire et de réfraction, mais la qualité des rendus dépend de la quantité de rayons lancés ce qui peut en faire un procédé très coûteux en temps de calcul. Le logiciel RADIANCE est le plus fréquemment utilisé dans les travaux de recherche car il est dit "physiquement réaliste" et a été largement validé (Ward, 1994).

II.4.1.2. Prise en compte des réflexions spéculaires

Les modèles assimilant les façades des bâtiments à des matériaux homogènes parfaitement diffusants s'éloignent de la réalité en excluant la présence des ouvertures. D'une part, la façade n'est pas une surface plane : les balcons et les volets projettent des ombres et ont des propriétés différentes qui ont une influence sur l'exitance totale de la façade. L'exitance désigne le flux lumineux par unité de surface quittant une source lumineuse. D'autre part, la présence des fenêtres peut réduire l'exitance de la façade par absorption de la lumière à l'intérieur des pièces, comme elle peut l'augmenter par la réflexion de la lumière sur les rideaux clairs des fenêtres. Le vitrage quant à lui peut créer des réflexions spéculaires qui

auront une influence sur le bilan lumineux de la rue ainsi que sur le confort des passants et des habitants.

Les éblouissements peuvent créer de l'inconfort mais aussi être invalidants. Par exemple, une étude a été menée à Taipei sur les éblouissements occasionnés par les bâtiments ayant des murs-rideau vitrés (Shih et Huang, 2001). Le mur-rideau est une façade légère c'est-à-dire qu'elle n'est pas porteuse du bâtiment, elle possède cependant les propriétés d'une façade conventionnelle décrites dans la section I.2.1. Les panneaux qui remplacent les murs sont des surfaces vitrées afin de laisser passer la lumière naturelle ; en contrepartie, ils sont susceptibles de provoquer des éblouissements dans leur environnement extérieur, des éblouissements d'autant plus importants que les façades des bâtiments sont imposantes comme le montre la Figure II-21. Cependant, l'utilisation de matériaux réfléchissants permet de réduire les dépenses liées à la climatisation d'un bâtiment. L'accès à la lumière naturelle à l'intérieur des pièces peut néanmoins être réduit si la lumière naturelle est réfléchi au lieu d'être transmise. L'utilisation d'un verre dont le facteur de réflexion varie en fonction de la lumière (mentionné dans la section I.2.3.2) représente une solution pour ce type de préoccupation (Selkowitz et Lampert, 1989).



Figure II-21 : Bâtiment émettant une lumière éblouissante (à gauche) et bâtiment en subissant les effets (à droite) (Shih et Huang, 2001)

L'albédo du canyon, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie réfléchi par un canyon et l'énergie incidente, diminue avec l'augmentation du taux de vitrage des façades WWR (Tsangrassoulis et Santamouris, 2003). Comme le montre la Figure II-22, pour un canyon de rapport d'aspect $H/W = 2$ et un angle d'incidence du soleil de 30° , le passage du WWR de 0,1 à 0,8 entraîne une diminution de 80% de l'albédo. Ce résultat a été obtenu à partir d'une méthode mathématique, utilisant le facteur de forme, sur un canyon de longueur infinie dont le taux de vitrage des façades pouvait être modifié. Cette diminution varie avec la hauteur de soleil pour un rapport d'aspect donné : plus le soleil est bas, plus la diminution de l'albédo est importante en augmentant le WWR. Sans surprise, l'albédo diminue aussi avec l'augmentation du rapport d'aspect.

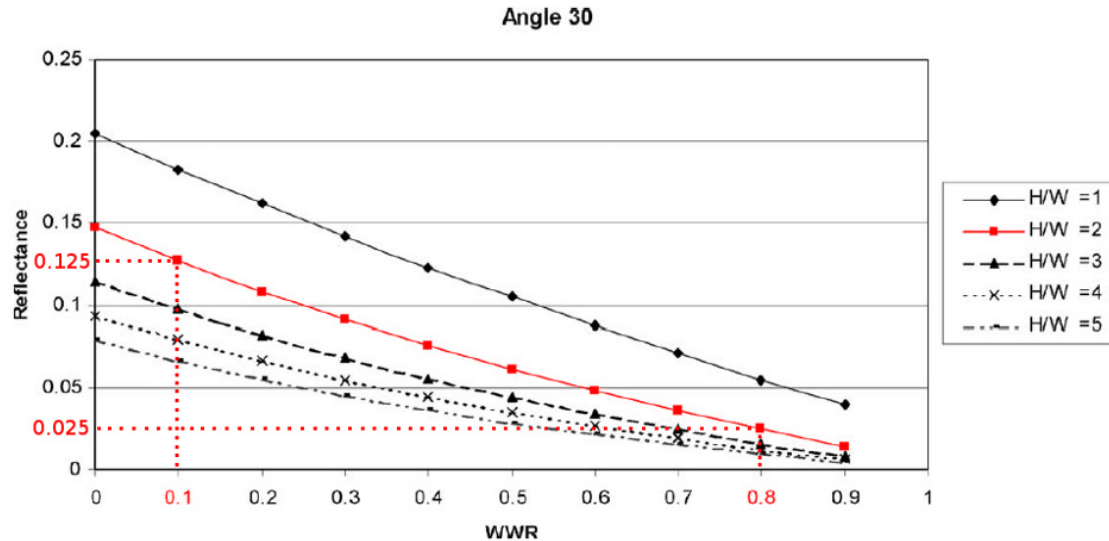


Figure II-22 : Albédo urbain en fonction du rapport d'aspect pour une hauteur de soleil de 30° (Tsangrassoulis et Santamouris, 2003)

Certains matériaux ont davantage un comportement spéculaire que diffusant, c'est le cas des vitrages des fenêtres. La prise en compte des réflexions spéculaires semble donc nécessaire pour obtenir des valeurs d'éclairement lumineux réalistes. La section suivante présente quelques études prenant en compte un autre paramètre important : la spécificité du climat.

II.4.2. Méthodes prenant en compte le climat

Afin de simplifier les calculs, il est possible de considérer uniquement un ciel uniforme ce qui permet de considérer que la luminance en chaque point du ciel est identique. Dans ce cas, le lien entre l'éclairement disponible à l'intérieur d'un bâtiment et la visibilité du ciel peut suivre une loi relativement linéaire (Capeluto, 2003b). La méthode de Capeluto utilise le DF, cet indicateur a été décrit et critiqué dans la section I.3.4 car il ne tient pas compte des conditions de ciel réelles est donne des résultats indépendants de l'orientation des façades du bâtiment ce qui peut être fortement éloigné de la réalité.

La méthode LT pour "Lighting and Thermal" (Baker, 2000) est une méthode graphique d'évaluation de la consommation d'énergie d'un bâtiment non-résidentiel. La consommation d'énergie nécessaire pour chauffer, refroidir et éclairer ce bâtiment, peut être estimée à partir de lectures sur des graphiques en fonction de son orientation, son taux de vitrage, sa situation géographique, le niveau d'éclairement lumineux souhaité, les charges de chauffages ainsi que l'utilisation des locaux (école ou bureau par exemple). Un exemple de courbes est visible sur la Figure II-23.

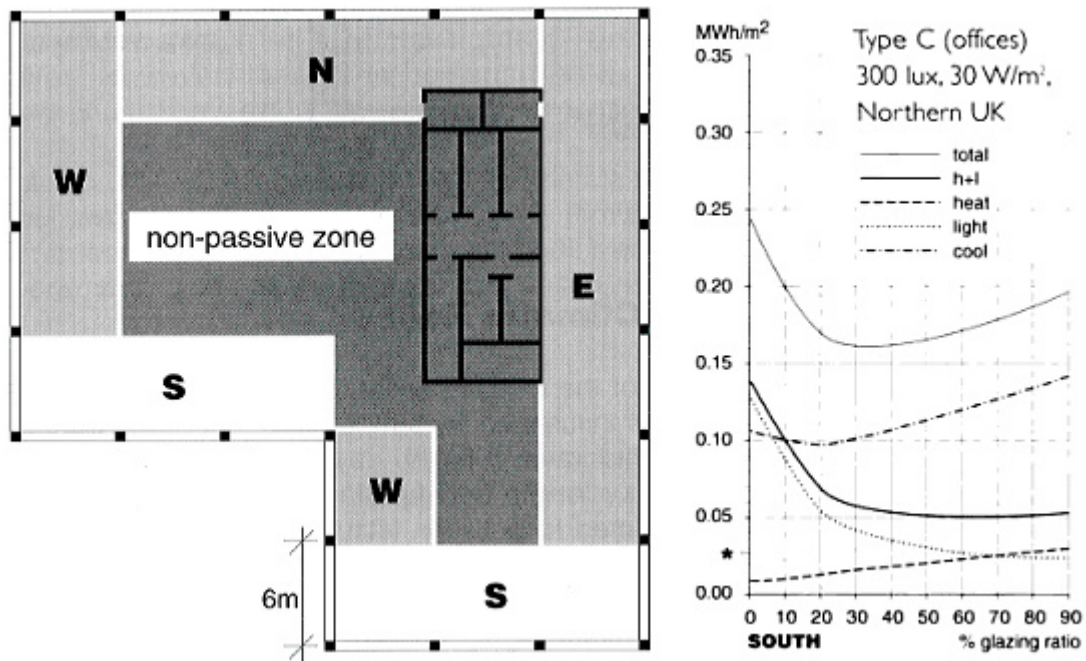


Figure II-23 : Exemple de repérage des zones passives pour un étage (à gauche), courbes qui permettent de calculer la consommation (à droite)

La méthode prend en compte les obstructions à la lumière naturelle en utilisant l'indice UHA (Urban Horizon Angle), un angle permettant de décrire la hauteur des obstructions occasionnées par les façades opposées dans un canyon urbain (cf. section I.3.4). Les courbes sur lesquelles la lecture doit être faite ont été obtenues à partir d'un modèle qui repose sur le concept de "zone passive". Comme le montre la Figure II-23, il s'agit de la zone de l'étage de bâtiment située à une distance inférieure à deux fois la hauteur du sol au plafond des murs constituant l'enveloppe du bâtiment. Les zones non-passives représentent le reste de l'étage. Le facteur de lumière du jour est calculé à partir du ciel CIE couvert. Le modèle de séparation (ou modèle de fraction de diffus) de Liu et Jordan (Liu et Jordan, 1960) est utilisé pour obtenir un profil horaire de l'éclairage énergétique diffus.

Cette méthode a aussi été réutilisée pour estimer la consommation d'énergie des bâtiments en milieu urbain (C Ratti, Robinson, Baker, et Steemers, 2000). Le modèle a été intégré à un programme informatique afin de pouvoir l'utiliser massivement. La base de la méthode repose sur la disponibilité d'un modèle numérique d'élévation contenant la hauteur des bâtiments d'un quartier ou d'une ville. Cette information est représentée sous forme d'une image en niveaux de gris dont la valeur de la couleur correspond à la hauteur relative d'un bâtiment (cf. Figure II-24). L'échelle représente le niveau de gris de 0 à 255, sa correspondance en mètres n'est pas fournie dans l'article. L'angle d'obstruction est calculé selon le même indice UHA utilisé par la méthode LT, appelé "Obstruction Angle" (OA) par Ratti *et al.*. La Figure II-24 montre une vue en 3D des obstructions faites à une façade et des angles UHA associés.

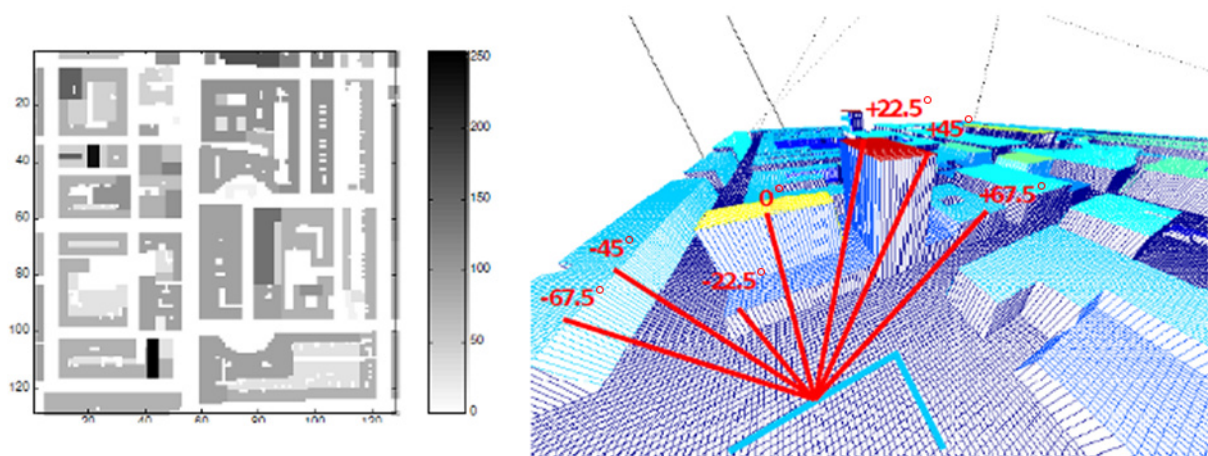


Figure II-24 : MNE avec hauteur relative en niveaux de gris (à gauche), vue en 3D de l'Obstruction Angle (OA) d'une façade (à droite) en rouge

La méthode LT effectue ses calculs étage par étage. Utilisée sur tous les bâtiments d'un quartier, elle permet de créer des vues en coupe permettant de visualiser les consommations énergétiques du quartier étage par étage et de comparer les bâtiments entre eux. La Figure II-25 montre la consommation d'énergie annuelle par unité de surface du deuxième étage de trois quartiers de Londres, de Toulouse et de Berlin.

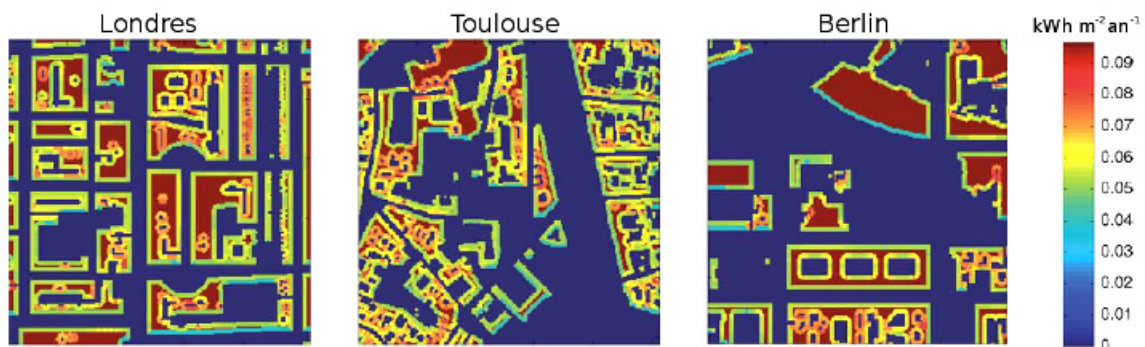


Figure II-25 : Consommation d'énergie annuelle d'après la méthode LT du 2^{ème} étage, de trois villes européennes, avec WWR fixé à 0,5 (C. Ratti et al., 2005)

La méthode ICUE (Mardaljevic et Rylatt, 2003) pour "Irradiation mapping for Complex Urban Environments" a pour but principal de réduire le temps de simulation. Dans un premier temps, les positions du soleil sont discrétisées en utilisant non pas le temps comme référence, mais l'altitude et l'azimut du soleil. Par exemple, en considérant une position du soleil par heure, pour une année complète, il y aurait eu normalement environ 4400 simulations à effectuer. La première étape de la méthode consiste à découper le diagramme solaire à l'aide d'une grille comme le montre la Figure II-26.

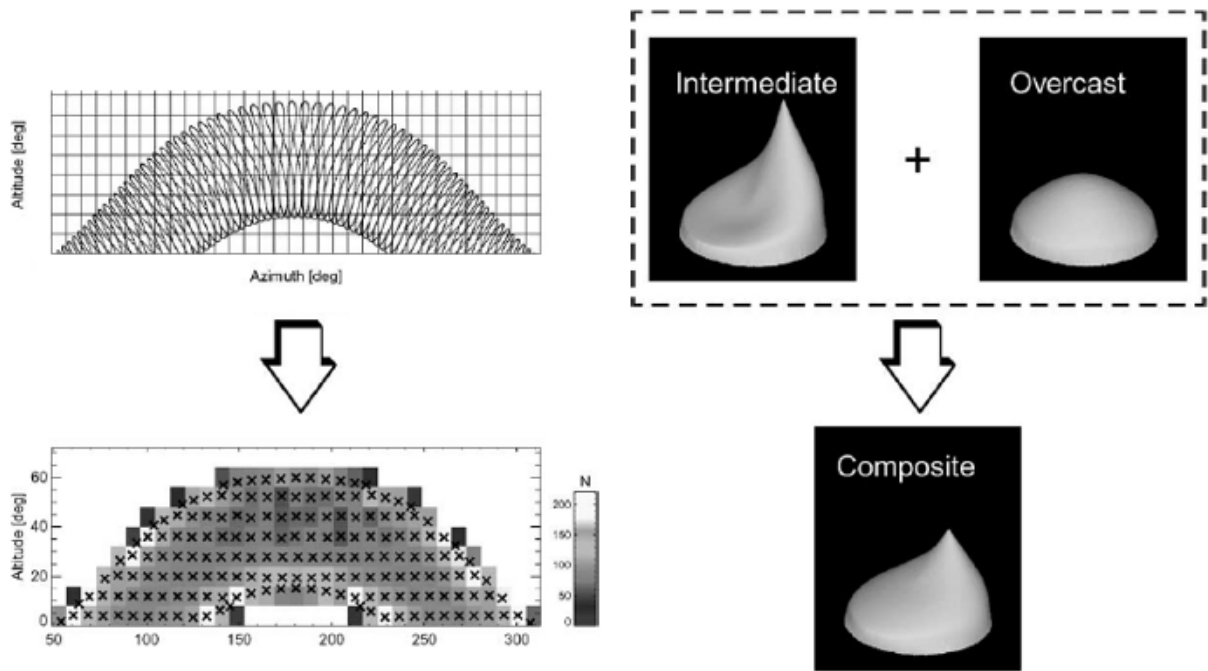


Figure II-26 : découpage du diagramme solaire (à gauche)
création d'un ciel en combinant deux ciels de base (à droite)

La méthode ICUE considère qu'il est possible de représenter n'importe quel ciel comme une combinaison linéaire entre un ciel couvert et un ciel intermédiaire de référence. Les positions du soleil sont synthétisées dans des mailles, avec un découpage tous les 8° : il ne reste alors plus que 179 simulations. Une grille moins fine (tous les 16°) est utilisée pour prendre en compte la contribution d'un ciel anisotrope (dont la répartition des luminances dépend de la position du soleil) soit 52 simulations. Les contributions du ciel et du soleil sont donc analysées séparément. Une seule simulation est suffisante pour le ciel couvert de la CIE car la distribution des luminances est identique quelle que soit la position du soleil. Les nombres mentionnés précédemment varient en fonction du lieu puisqu'ils sont basés sur la trajectoire du soleil. Les coefficients de cette combinaison sont calculés à partir de l'indice de clarté du ciel tel que définit par Perez (cf. équation (II-10) page 107).

Les simulations sont faites avec RADIANCE, le système est prévu pour travailler avec un fichier météo d'une année de référence (TRY). La quantité de rayonnement à la surface des bâtiments est le résultat de la contribution du ciel et du soleil. RADIANCE produit une image (cf. Figure II-27), ainsi les quantités de rayonnement calculées ne sont déterminées que pour les surfaces visibles, pour avoir l'information pour des bâtiments orientés différemment, il faut effectuer d'autres rendus. Cela permet une analyse massive pour une géométrie complexe ainsi qu'une vue d'ensemble qui peut être utile dans le cas de projets d'urbanisme. D'ailleurs ce système de calcul a été intégré au GIS SEP (Solar Energy Planning) (Rylatt, Gadsden, et Lomas, 2001), un logiciel d'aide à la prise de décision destiné aux urbanistes afin de les aider à intégrer des solutions liées à l'énergie solaire telles que le chauffage de l'eau, la production d'électricité (PV) et la conception de bâtiments passifs (Rylatt *et al.*, 2001).

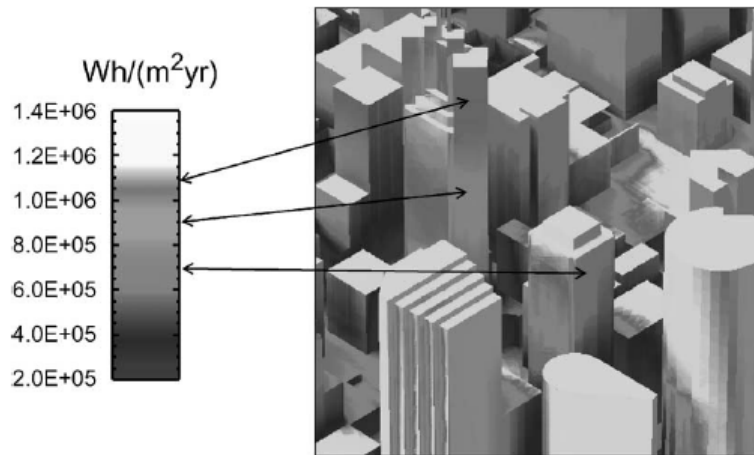


Figure II-27 : Énergie solaire reçue annuellement par m^2 de façade (méthode ICUE)

Un outil basé sur RADIANCE a été développé par Compagnon (Compagnon, 2004). Il permet de calculer des éclairagements lumineux et énergétiques sur les toits et surfaces de bâtiments dont la géométrie doit être fournie au format DXF. La méthode utilise le modèle de Perez (cf. section II.3.3.1) pour générer des répartitions de luminance dans le ciel à partir des données météo fournies par le logiciel METEONORM (Remund et Kunz, 1997). La subdivision du ciel en 145 éléments selon Tregenza est utilisée. Le disque solaire est lui aussi divisé en plusieurs parties, s'il se trouve à la limite d'au moins deux éléments de ciel. La contribution du soleil pour chacun des éléments est donnée au prorata de la surface du disque présent dans chaque élément. Les facteurs de réflexion peuvent être définis pour chaque surface, s'ils sont disponibles. Le programme produit une rose d'orientations, une information destinée au planning urbain. Il s'agit du cumul des surfaces des façades des bâtiments d'un quartier, pour chaque orientation. Ces surfaces sont pondérées par le SVF afin de prendre en compte les obstructions propres à chacune. La Figure II-28 représente deux exemples de géométrie pour un ensemble de bâtiments avec leur rose d'orientations correspondante.

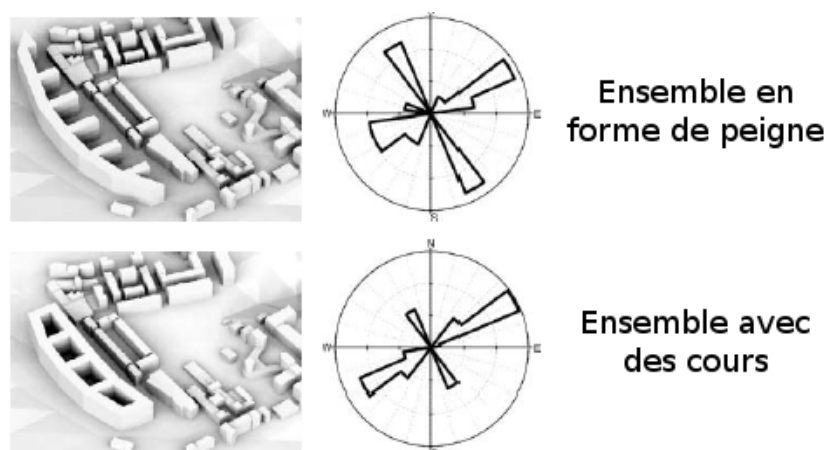


Figure II-28 : Exemple d'utilisation de la rose d'orientations (Compagnon, 2004)

Si l'architecture du bâtiment forme des cours intérieures (exemple du bas), le cumul des surfaces orientées nord-ouest et sud-est est réduit en comparaison à la version "ouverte" en

forme de peigne (exemple du haut). Cette simulation permet de déterminer la forme la plus adaptée à l'utilisation du rayonnement solaire en fonction du choix de la forme de l'ensemble de bâtiments qui pourrait être construit. La rose permet de voir quelles orientations sont privilégiées et d'établir des stratégies d'urbanisme en fonction du besoin d'accès à la lumière naturelle.

La méthode ALBYRD (Trenkle, 1988) permet d'évaluer la quantité de lumière absorbée par une cour formée par 4 bâtiments, elle est intéressante car l'auteur précise que sa méthode peut être appliquée à un canyon urbain de longueur finie qui correspondrait donc à une cour avec deux murs en moins. Cette méthode présente l'avantage de prendre en compte les réflexions spéculaires et diffuses tout en considérant les réflexions multiples. Les réflexions s'arrêtent lorsque le rayon réfléchi transporte une énergie inférieure à une valeur seuil. Enfin la contribution de la voûte céleste peut être divisée en plusieurs parties afin de prendre en compte les variations des luminances du ciel. Les résultats permettent de déterminer les surfaces de la cour qui absorbent le plus d'énergie et donc celles qui en réfléchissent le plus. Bien que la méthode procède à de nombreuses simplifications, on peut voir que la contribution du sol en hiver est presque aussi importante que celle des façades alors qu'en été elle est environ 2 fois moins importante (cf. Figure II-29).

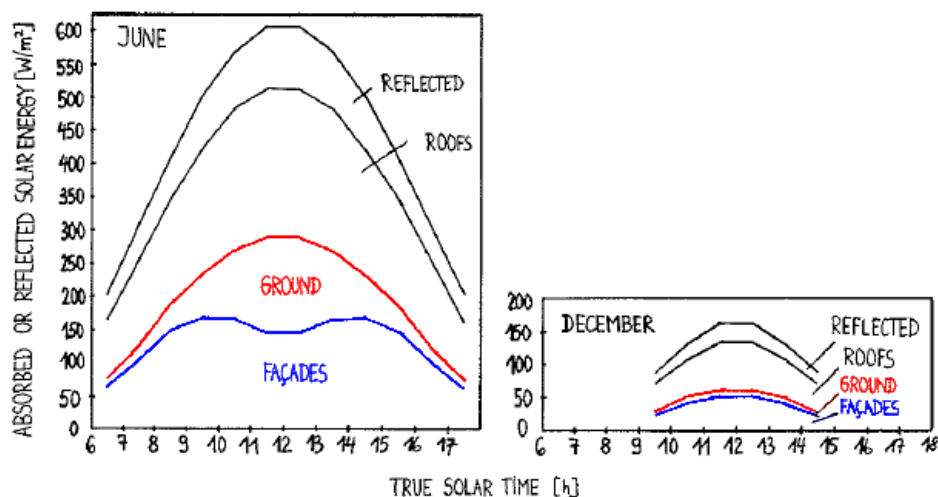


Figure II-29 : Variation de l'absorption du rayonnement solaire par le sol, les façades, et les toits, ainsi que le rayonnement total réfléchi, dans une cour d'immeubles en juin et décembre (Trenkle, 1988)

Quelques-unes des méthodes disponibles pour calculer la quantité de rayonnement à la surface des bâtiments et éventuellement du sol, ont été décrites dans cette section. Toutes reposent sur certaines simplifications. Appliquées à l'échelle d'un quartier ou d'une ville, ces calculs peuvent prendre beaucoup de temps : plusieurs heures, voire plusieurs jours, selon la précision requise. Pour un architecte, il n'est pas pensable d'attendre autant de temps avant d'obtenir des résultats. D'autant qu'il lui faut effectuer de nombreux essais avant de trouver une solution optimale. Ces simplifications sont donc quasiment indispensables.

Comme nous venons de le voir, elles interviennent au niveau de la géométrie : il est encore difficile de disposer d'une scène en 3D fidèle aux situations réelles, de plus dans un format compatible avec les logiciels de calcul d'éclairéments. Nous avons vu dans la section I.3.4 que l'utilisation de cartes en 2D représentant une vue de dessus des toits permet d'obtenir des temps de calcul réduits tout en étant utilisable avec une carte cadastrale, même s'il faut encore déterminer la hauteur des bâtiments. Les conditions climatiques font aussi souvent l'objet de simplifications : les algorithmes utilisant RADIANCE effectuent souvent une discrétisation des positions du soleil ainsi qu'une optimisation du découpage du ciel. Enfin, le comportement photométrique des surfaces est lui aussi simplifié : les réflexions spéculaires sont ignorées, les surfaces vitrées ne sont pas prises en compte et les facteurs de réflexions des façades sont approchés.

Le chapitre suivant traite des différents logiciels qui permettent d'effectuer les calculs de rayonnement, ils utilisent des approches différentes et ont évidemment des degrés de simplification différents pour les raisons que nous venons de mentionner.

II.5. Outils logiciels

Nous avons vu que le SVF était l'un des paramètres les plus utilisés pour caractériser la géométrie d'un canyon urbain. Différentes études ont permis d'établir un lien entre cet indicateur et le climat urbain. Toutefois, il n'apporte pas d'information sur la distribution de l'ombrage, c'est-à-dire sur la position des bâtiments qui cachent le soleil et/ou une portion du ciel. Or cette information est importante, car elle permet d'étudier l'accès à la lumière naturelle en prenant en compte son caractère dynamique. En effet, deux SVF identiques peuvent caractériser plusieurs répartitions d'ombrage (géométries de rues) très différentes. Pour illustrer simplement, prenons une photo fisheye obtenue avec un objectif dont la déformation est connue, il est possible d'y ajouter l'information de la position du soleil (Chapman, Thornes, et Bradley, 2001). Chapman *et al.* ont développé un programme permettant de placer la trajectoire du soleil pour un jour donné sur l'image comme le montre la Figure II-30. Cette méthode simple permet de savoir à quels moments de la journée, le canyon reçoit du rayonnement solaire direct, tout au long de l'année. Le reste du temps, il ne faut considérer que le rayonnement diffus provenant des parties visibles du ciel, et les inter-réflexions.

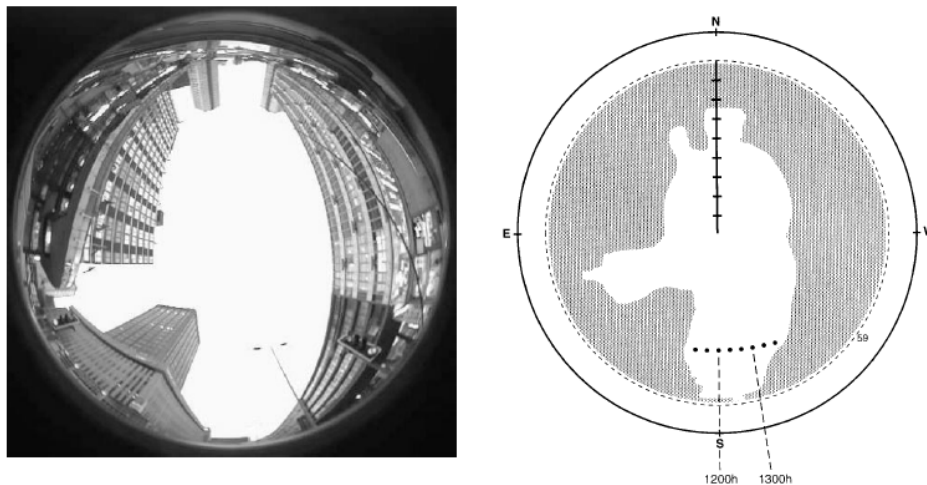


Figure II-30 : Photo fisheye du ciel dans une rue (à gauche), et partie visible de la trajectoire du soleil de la même rue pendant un jour donné de l'année (à droite), selon la méthode de Chapman et al. (Chapman et al., 2001)

Cette information reste insuffisante pour effectuer des calculs de rayonnement précis, l'intérêt ici est de montrer qu'une valeur de SVF seule n'est même pas en mesure de décrire cette dynamique, qui a une influence majeure sur l'éclairement mesurable à un moment de l'année en un point d'une rue.

Les indicateurs uniques de géométrie urbaine sont utilisés du fait de leur simplicité et des nombreux modèles qui les utilisent. Cependant, les performances croissantes des ordinateurs permettent désormais de remplacer ces outils simplistes par des simulations plus précises. Cela permet de prendre en compte le mouvement du soleil, la distribution des luminances du ciel et les propriétés des revêtements pour des journées entières, des mois, voire des années, avec la possibilité de choisir la résolution temporelle ou d'utiliser des

données climatiques réelles. Les logiciels de simulation décrits dans la section suivante permettent d'obtenir une information détaillée sur la dynamique de la lumière naturelle en utilisant des données spécifiques à un site telles que la géométrie de la rue, les propriétés photométriques des façades, les coordonnées géographiques ou des données climatiques. Certains logiciels offrent la possibilité de visualiser voire d'analyser leurs résultats, d'autres ne fournissent que des valeurs qui doivent donc être analysées par la suite. Nous allons décrire les différents types de logiciels qu'il est possible de trouver et en présenter quelques-uns. Trois logiciels potentiellement intéressants pour la simulation en milieu urbain ont été retenus, ils seront utilisés pour la validation expérimentale présentée dans la partie IV.

II.5.1. Les solutions disponibles

Il est possible d'utiliser des logiciels de simulation d'éclairage naturel afin d'obtenir des valeurs d'éclairement énergétique ou lumineux à la surface des façades du canyon. Il existe des outils qui permettent indépendamment de prendre en charge une ou plusieurs des étapes précédemment énumérées et des logiciels qui permettent de définir tous les paramètres nécessaires (géométrie, propriétés des matériaux, climat) et qui peuvent directement produire des valeurs d'éclairement.

Les outils qui effectuent une part du travail peuvent s'intégrer dans des structures plus importantes (plugin) ou être totalement indépendants. La contrainte majeure réside dans la compatibilité liée aux formats d'entrée et de sortie des données. Par exemple, un logiciel qui nécessite une géométrie 3D pour produire des éclairagements a été programmé pour une quantité limitée de formats d'entrée, il est courant de devoir changer le format d'un fichier pour le rendre compatible, seulement, ce type de démarche ne se fait pas toujours sans perte de qualité des données. Ce problème est résolu grâce à l'utilisation de plugins. Ils sont développés spécifiquement pour être intégrés dans un programme qui impose le format de gestion des données. Ainsi l'utilisateur n'a pas à procéder au moindre changement de format qui risquerait d'altérer la qualité de sa conception 3D par exemple. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sont des structures qui peuvent intégrer de tels outils.

II.5.1.1. Des plugins pour SIG

Ces systèmes permettent de créer et gérer des données géo-référencées, c'est-à-dire associées à une position géographique. Il est possible de produire des plans ou des cartes, voire des animations de ces derniers dans le temps. Les possibilités offertes par ces systèmes sont nombreuses (cartographie, aménagement du territoire, gestion forestière, agriculture, transport...), mais nous soulignerons particulièrement le domaine de l'urbanisme qui est directement lié au thème de cette recherche. Il existe des SIG commerciaux parmi lesquels on trouve ArcGIS (leader historique) et MapInfo qui est utilisé en France par les géomaticiens du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Il existe aussi des SIG libres de droits comme GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) qui est le projet libre le plus conséquent en la matière. Il est

maintenu par l'association non-gouvernementale OSGeo (Open Source Geospatial Foundation), son architecture modulaire et sa licence libre sont des atouts en termes de croissance et de performance.

L'outil 3DSkyView (Souza *et al.*, 2003) est un exemple de plugin disponible pour le SIG ArcGIS. Il permet de calculer le SVF d'une scène dont la géométrie 3D des bâtiments est disponible. L'avantage d'être implémenté dans un SIG est de pouvoir bénéficier des autres couches de données, en l'occurrence de l'accès à l'élévation du terrain et à la géométrie des bâtiments. Un algorithme similaire à celui de Souza *et al.* a été développé dans ArcGIS (Unger, 2009), cette fois le SVF a été corrélé avec des données de températures afin d'évaluer la relation entre le SVF et l'îlot de chaleur urbain.

Le module de calcul du rayonnement solaire *r.sun* représente un exemple d'intégration dans le SIG GRASS (Hofierka et Suri, 2002). Ce dernier utilise le modèle de ciel de Muneer (Muneer, 1990) pour obtenir des valeurs d'éclairement énergétique global, diffus et direct normal pour une surface inclinée. Ce modèle est donc utilisable pour un toit, une façade ou le sol, de plus il prend en compte la composante réfléchi par le sol selon la loi de Lambert. Le modèle *r.sun* permet d'obtenir des valeurs pour des types de ciel clairs et couverts en appliquant un coefficient de clarté du ciel. Cet indice correspond au rapport entre l'éclairement énergétique pour un ciel couvert et celui pour un ciel clair.

L'intégration de tels modèles dans un SIG permet d'obtenir des informations à l'échelle d'un territoire. La Figure II-31 montre l'éclairement énergétique global annuel cumulé d'une partie de l'Europe de l'est pour différents plans inclinés, calculé à partir des données produites par *r.sun*. Cela peut permettre d'évaluer le potentiel d'exploitation de l'énergie photovoltaïque pour un pays entier. Ce module étant libre de droit, son code source peut être récupéré gratuitement, et modifié pour être redistribué, ce type d'initiative permet de faire évoluer rapidement les projets.

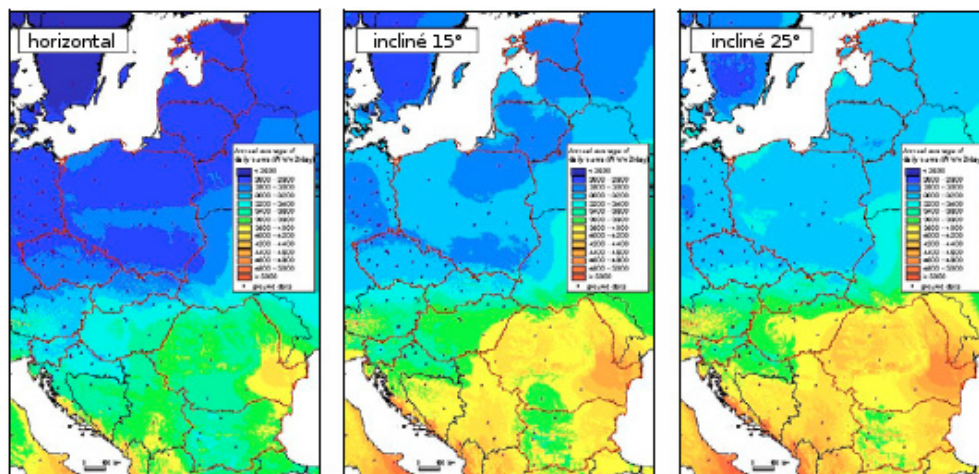


Figure II-31 : Éclairement énergétique global annuel cumulé à partir de *r.sun* pour un plan horizontal (à gauche), pour un plan orienté sud incliné à 15° (au centre) et pour un plan orienté sud incliné à 25° (à droite)

Un SIG permet de corrélérer des ensembles de données entre elles, il est donc possible de lier des informations sur la ressource solaire avec des informations démographiques, ou

économiques. Par exemple, une étude (Sørensen, 2001) a pu conclure, grâce à un tel outil, que l'Afrique serait la partie du monde avec le plus fort potentiel d'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque en milieu urbain. En effet, avec un total de 54 MW par kilomètre carré de ville, l'Afrique se place devant l'Europe, qui offre d'après l'étude, 31 MW par kilomètre carré de ville. Cette conclusion a été obtenue en considérant que la surface pouvant accueillir des installations BIPV en milieu urbain représente 1% de la surface au sol occupée par la ville. Ces installations sont considérées comme ne recevant pas d'ombrage et étant "convenablement orientées" (suitably oriented), sans préciser de valeur d'inclinaison. Les résultats de cette étude sont néanmoins discutables car il est difficile de donner des estimations justes à si grande d'échelle. Par exemple, les capacités d'installation de modules PV sur un toit en France et au Zimbabwe sont incomparables, la qualité du réseau électrique et le degré de salissure d'un module dans le temps sont totalement différents et ce ne sont que deux paramètres parmi de nombreux autres qui agissent sur la viabilité d'une installation PV.

II.5.1.2. Des logiciels autonomes

Quelques-uns des outils permettant d'effectuer des calculs d'éclairage à l'intérieur des bâtiments ou sur leurs façades sont décrits dans cette section. Le but n'est pas de dresser une liste exhaustive mais de présenter différentes approches qu'il est possible de rencontrer avant de décrire plus en détail les trois logiciels qui ont été retenus pour notre étude.

3ds Max

C'est un logiciel de modélisation 3D développé par Autodesk. Son architecture modulaire lui permet d'implémenter facilement de nouvelles fonctionnalités. La simulation de la lumière naturelle a été ajoutée à l'aide du module nommé Exposure (C. Reinhart, Landry, et Breton, 2009). Ce module utilise le modèle de ciel "tout temps" de Perez pour calculer la quantité de lumière à l'intérieur des géométries construites par l'utilisateur en utilisant l'algorithme de lancer de rayons Mental Ray. Ce module a été validé expérimentalement et conjointement avec Daysim (Christoph Reinhart et Breton, 2009). Les résultats obtenus montrent que cet outil se révèle fiable pour le calcul d'éclairage avec prise en compte de la lumière naturelle. Daysim est un logiciel lui-même validé et décrit en détail plus loin dans cette section.

Solene

Il s'agit d'un logiciel de simulation d'éclairage solaire développé par le CERMA (Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture) (Groleau, 2000). Il permet de calculer le tracé d'ombres pour une journée entière. Ce calcul est effectué en 2D, le point de vue du soleil est projeté dans un plan pour chacune de ses positions, puis les zones ombragées sont à nouveau projetées dans l'espace. Le logiciel permet aussi de connaître la durée d'ensoleillement en un point donné d'une géométrie 3D en projetant l'obstruction vue depuis ce point sur un diagramme solaire. Ce logiciel permet surtout d'effectuer des calculs d'éclairage en un point en prenant en compte les obstructions occasionnées par la géométrie de la scène. La répartition des luminances du ciel est considérée selon le modèle "tout temps" de Perez, en utilisant un maillage par défaut de 1024 éléments pour le ciel. Les

énergies provenant du soleil et du ciel sont considérées séparément, l'éclairement dû au soleil est calculé à partir du modèle de Perrin de Brichambaut (Perrin de Brichambaut et Vauge, 1982). Les inter-réflexions sont calculées à l'aide du principe de radiosité (cf. section II.4.1.1) en considérant que les matériaux sont parfaitement diffusants. Le logiciel permet aussi de gérer la transparence des parties vitrées avec un coefficient de transmission indépendant de l'angle d'incidence du rayonnement (Miguet et Groleau, 2002). Le logiciel Solene a été utilisé dans le cadre de l'étude des échanges radiatifs d'un canyon urbain en fonction des propriétés de réflexion des façades (Doya, 2010), étude déjà mentionnée dans la section I.3.2.

Townscope

Townscope (Teller et Azar, 2001) est un logiciel développé dans le cadre du projet européen POLIS (cf. section I.2.2.2). Il est basé sur un logiciel plus ancien visant à simplifier la prise en compte du rayonnement solaire en milieu urbain. À l'instar de certaines méthodes permettant de calculer le SVF (cf. section I.3.4), le programme effectue une projection sur la sphère céleste du relief vu par le point considéré. Le ciel est supposé isotrope, ce qui permet de conserver le rapport de proportionnalité entre le facteur de vue du ciel et l'éclairement lumineux qui en résulte. La connaissance de la position du soleil sur la sphère par l'intermédiaire du diagramme solaire, permet de connaître les moments de l'année où le soleil est obstrué. Cette méthode est appliquée pour 12 jours de l'année (un par mois) pour obtenir des valeurs annuelles. Il est possible de calculer la contribution du diffus pour un ciel uniforme (pour un temps de calcul réduit) ou pour le ciel couvert CIE (pour une meilleure précision). Une seule inter-réflexion est prise en compte, les surfaces sont supposées parfaitement diffusantes. On constate que toute la méthode procède à de nombreuses simplifications, l'utilisation d'un tel outil pour la prise en compte du confort visuel ainsi que le calcul de la quantité d'éclairement lumineux est inappropriée.

LightSolve

Le logiciel LightSolve mérite d'être cité (Andersen *et al.*, 2008), il s'agit d'un outil d'aide à la conception architecturale. Le concept repose sur la discrétisation d'une année type (TMY2 cf. section II.3.2.3) en 56 périodes. L'année est découpée en 8 périodes et chaque jour en 7. Pour chaque période, la position centrale du soleil est utilisée et le type de ciel est calculé à partir de la moyenne des coefficients du modèle ASRC-CIE pour les données de cette période. La méthode a été validée à l'aide de comparaisons avec des simulations Daysim. Le but de LightSolve est de permettre de visualiser rapidement l'influence des choix de conception, sur la répartition de la lumière ou du rayonnement solaire dans une pièce. Pour cela, des cartes d'éclairements spatio-temporelles sont utilisées (Mardaljevic, 2004a). Elles permettent de visualiser en fausses couleurs les éclairages lumineux ou énergétiques sur une période donnée, sur les surfaces visibles depuis un point donné de la scène. À titre d'exemple, la Figure II-32 montre les éclairages énergétiques cumulés annuels reçus par le sol intérieur d'un bâtiment possédant une toiture au système d'ouverture complexe. Ce type de carte permet de visualiser rapidement les zones qui reçoivent trop ou pas assez d'énergie tout au long de l'année. LightSolve permet de visualiser la variation des ces éclairages au fil de l'année.

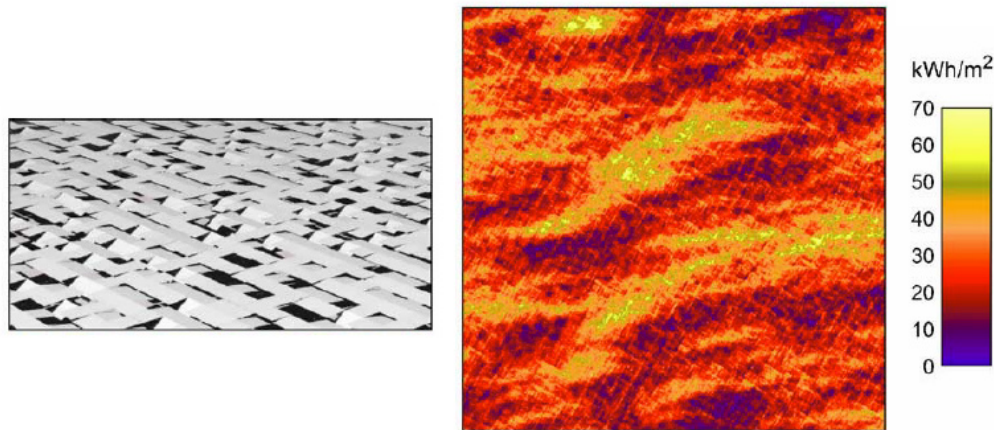


Figure II-32 : Rendu en 3D d'une toiture complexe (à gauche) et carte de rendu spatial de l'énergie reçue au sol à l'intérieur du bâtiment (à droite) (Andersen et al., 2008)

II.5.2. Les trois logiciels sélectionnés pour notre étude

Trois outils permettant d'effectuer des calculs d'éclairage sur les façades de bâtiments ont été sélectionnés pour notre étude. Ils utilisent des méthodes différentes et possèdent différents niveaux d'approximation. La comparaison des valeurs calculées par ces logiciels avec des valeurs mesurées sur notre modèle réduit de canyon permettra de déterminer la précision de chacun d'entre eux.

Le logiciel Heliodon a été sélectionné car il est censé effectuer les calculs très rapidement. En effet, il effectue plusieurs simplifications de phénomènes physiques dont la prise en compte est généralement coûteuse en temps de simulation. Contrairement à Heliodon, le logiciel Daysim effectue un minimum de simplifications. Par contre, il nécessite des temps de simulation beaucoup plus importants. La confrontation de ces deux outils permettra d'estimer la variation de la précision des résultats avec le degré de complexité des calculs. Enfin, le logiciel Citysim sera utilisé car son algorithme réalise un compromis entre temps de simulation et précision des valeurs calculées. Ces trois logiciels sont présentés en détail dans les sections suivantes.

II.5.2.1. Citysim

Description

Ce logiciel reprend les grandes lignes de SUNtool, un logiciel permettant d'aider à l'amélioration de la durabilité des quartiers en se basant sur la gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets (D Robinson *et al.*, 2007). Citysim permet d'estimer la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier voire d'une ville (D. Robinson *et al.*, 2009). Il s'inscrit aussi dans une démarche visant à optimiser les performances énergétiques des bâtiments en milieu urbain. Il est développé par le Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Les calculs sont basés sur une géométrie 3D de bâtiments dont les propriétés des matériaux peuvent être définies. Le climat spécifique à un site pour la période de simulation doit être importé depuis un fichier. Citysim utilise un modèle thermique pour le calcul des températures à l'intérieur des bâtiments, un modèle de calcul d'échanges radiatifs et un modèle de comportement des occupants lié à la consommation d'énergie du bâtiment comme l'ouverture des fenêtres ou l'utilisation d'éclairage artificiel. Nous nous intéressons uniquement au comportement de la lumière à l'intérieur du canyon, ainsi seul le modèle d'échanges radiatifs est considéré. Les paramètres utilisés par les autres modèles n'ayant pas d'influence sur celui-ci, les valeurs sont laissées par défaut.

L'algorithme de radiosité nommé SRA (Simplified Radiosity Algorithm) est utilisé par Citysim (D Robinson et Stone, 2005). Ce dernier permet de calculer l'éclairage énergétique pour les courtes longueurs d'onde sur les surfaces de la scène en 3D. Le ciel est divisé en 145 éléments selon la méthode de Tregenza (cf. section II.3.3.1) et la radiance de chaque élément est calculée à partir du modèle "tout temps" de Perez et des données du fichier climatique. L'éclairage d'une surface donnée est calculé à partir de la somme des contributions de chacun des éléments de ciel. Cette contribution dépend de l'angle d'incidence de cet élément, ainsi que du pourcentage de la surface de cet élément qui est visible par la surface dont l'éclairage veut être connu. Cela permet de prendre en compte les obstructions du ciel par la géométrie. La contribution du rayonnement direct est calculée à partir de l'angle d'incidence du soleil et du rayonnement direct normal donné dans le fichier climatique.

Citysim peut prendre en compte un masque d'ombrage lointain (provenant d'un MNT), cet ombrage peut être décrit dans le fichier sous forme d'un ensemble de 360 points (1 point par degré d'orientation) dont la hauteur angulaire de l'obstruction est connue. Cette fonctionnalité permet d'effectuer des simulations en prenant en compte l'influence de l'environnement proche sur l'accès à la lumière provenant du ciel et du soleil. Il est possible d'obtenir des éclairages énergétiques pour chacune des surfaces mais aussi des éclairages lumineux, l'efficacité lumineuse étant calculée à partir du modèle de Perez (Perez *et al.*, 1990).

Utilisation

Le solveur de Citysim utilise en entrée un fichier XML qui est généré automatiquement depuis l'interface graphique proposée. Celle-ci permet, dans la version utilisée pour notre étude (version du 31/08/12), d'importer une géométrie 3D principalement au format DXF. Elle propose également des outils pour créer les géométries directement. Cependant, cette version étant assez jeune et en cours de développement, le solveur a été utilisé en lignes de commandes et le fichier XML a été généré à l'aide d'un programme Java que j'ai développé. Toutefois, le logiciel a beaucoup évolué durant la thèse, son interface a été entièrement redessinée et ses fonctionnalités améliorées constamment, le LESO-PB continue de travailler sur le logiciel. Pour des raisons pratiques, l'interface graphique n'a jamais été utilisée pour notre étude, cependant le solveur en lignes de commandes a été mis à jour durant la thèse afin de bénéficier d'éventuelles corrections.

 tant donné que Citysim permet de prendre en compte le climat local, il utilise en entrée un fichier contenant les paramètres météorologiques qui permettent de le caractériser.

Le format de ce fichier est prévu pour correspondre au type de fichier fourni par METEONORM. Dans notre étude, un programme Java a été développé pour récupérer les données de la station IDMP de l'ENTPE (cf. section II.3.2.4) et créer un fichier utilisable par Citysim. Il y a plusieurs paramètres présents dans les fichiers de la station IDMP qui ne sont pas utilisés dans le calcul d'échanges radiatifs comme l'humidité relative et la température de l'air. En effet, pour ce type de calculs seuls les éclairagements énergétiques diffus horizontal et direct normal sont nécessaires. Le modèle de ciel de Perez a besoin de l'éclairagement lumineux diffus horizontal pour produire des valeurs de luminance absolues. Citysim ne permet pas d'utiliser directement des valeurs mesurées de l'éclairagement lumineux, il utilise le modèle d'efficacité lumineuse de Perez. Les autres valeurs peuvent être mises à 0 pour autant que le solveur soit utilisé avec l'option "-i" qui lui indique alors d'effectuer uniquement des calculs d'éclairagement. Le fichier climatique contient aussi les coordonnées géographiques sous forme décimale, il n'y a pas de limite dans la précision étant donné que le solveur utilise directement ces valeurs sous forme de nombre à virgule flottante. Ce fichier permet aussi de définir l'altitude du lieu qui est utilisée par les modèles de Perez.

La géométrie du modèle réduit du canyon étant simple (cf. chapitre I.4), elle a pu être générée au format XML directement à l'aide d'un programme Java. Le modèle est constitué de deux rangées de façades, l'une en face de l'autre avec un sol défini entre les deux. Dans Citysim, une surface est définie par 4 points dans l'espace, le premier et le dernier point ayant exactement les mêmes coordonnées. L'ordre dans lequel les points sont définis est important car il détermine l'orientation de la surface : l'extérieur ou l'intérieur du bâtiment. Citysim ne permet pour cette version que de définir des bâtiments sous la forme de boîtes fermées constituées de 6 surfaces. Il est impératif que ces surfaces soient correctement orientées pour que les échanges radiatifs soient calculés.

Citysim permet d'obtenir les éclairagements lumineux sur les quatre façades et le toit des bâtiments ainsi que sur l'unique sol de la scène. Comme nous comparerons les mesures d'éclairagement en certains points de notre maquette avec des résultats de simulation, nous devons pouvoir obtenir avec Citysim des valeurs d'éclairagement en des points donnés du canyon. La position de ces points est indiquée dans l'image de gauche de la Figure II-33. Pour cela, il y a deux solutions possibles avec Citysim.

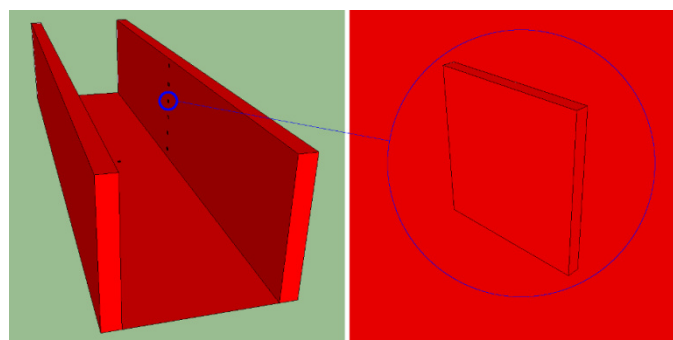


Figure II-33 : Géométrie 3D d'un canyon, importée dans Citysim (à gauche), et vue rapprochée d'une zone représentant une sonde (à droite)

La première consiste à créer une façade constituée d'un maillage de surfaces et de ne récupérer les résultats que pour les éléments qui se trouvent là où l'éclairement veut être connu. Ces zones sensibles correspondent aux emplacements de sondes sur le modèle réduit de canyon urbain décrit plus tard dans la section III.2.3. Malheureusement, cette solution n'est pas applicable au sol. En effet, dans Citysim, le sol ne peut être décrit que par quatre triangles, ce qui ne permet pas d'isoler un petit élément auquel comparer l'éclairement mesuré. De plus, cette solution implique d'effectuer un grand nombre de calculs superflus, ce qui ne permet pas d'effectuer des comparaisons sur le temps de calcul entre les logiciels.

La seconde solution consiste à créer des bâtiments de petite taille, dont les dimensions des façades correspondent à la surface des zones dont on veut connaître l'éclairement. Il y a donc un bâtiment par point de mesure. Cela est mis en évidence par l'image de droite de la Figure II-33 qui représente un zoom de la partie entourée en bleu sur l'image de gauche. Ces bâtiments de petite taille sont donc en lévitation. Cela ne pose pas de problème par rapport au fonctionnement de l'algorithme de calcul d'échanges radiatifs. L'éclairement sur la façade visible de ces petits bâtiments, et sur le toit de celui qui se trouve au milieu du canyon au sol, correspond à la valeur souhaitée. Les deux rangées de façades principales du canyon sont modélisées chacune par un bâtiment de la même longueur que le canyon.

II.5.2.2. Daysim

Description

La méthode utilisée par Daysim (version utilisée : 3.1e) est basée sur le concept de "Daylight Coefficient" (DC) décrit par Tregenza (Tregenza et Waters, 1983). Cette méthode a été mise au point initialement pour calculer l'éclairement sur les murs, le sol ou le plafond d'une pièce, provenant de la lumière naturelle passant à travers une fenêtre. L'intérêt de la méthode est d'accélérer le calcul des éclairements lumineux à chaque instant en séparant les calculs optiques des calculs climatiques. La méthode nécessite d'utiliser un maillage du ciel. La première étape consiste à calculer la contribution de chaque maille du ciel à l'éclairement en chaque point d'intérêt de la pièce, cette contribution est le Daylight Coefficient. La deuxième étape consiste à calculer la luminance de chaque maille du ciel à un instant donné en utilisant un modèle de luminance du ciel. Les éclairements à cet instant, en chaque point d'intérêt, sont alors calculés à partir des luminances de chaque maille et de leur DC en ce point. La méthode de Daysim est décrite pour la première fois, dans un article visant à comparer les résultats de simulations effectuées à l'aide de logiciels basés sur RADIANCE (Christoph Reinhart et Herkel, 2000). La méthode présentée donne alors les meilleurs résultats entre les logiciels évalués par rapport à des valeurs de références.

À partir de la géométrie 3D, les DC sur les façades sont calculés dans un premier temps. Ensuite un lancer de rayons est produit pour un ciel isotrope. Les rayons qui ont été lancés pendant cette exécution sont sauvegardés dans un fichier pour être réutilisés par un script qui effectue le même lancer de rayons avec des distributions de luminances réalistes. Pour cela, le ciel est divisé en 145 zones. À un instant donné, la luminance de chaque zone du ciel est calculée selon le modèle "tout temps" de Perez. L'intérêt de la méthode présentée est d'effectuer une simulation rapidement et donc de minimiser le nombre de calculs. Ainsi

pour calculer la contribution du sol, les DC sont calculés pour 3 sections de la voûte céleste uniquement : une bande de 10° à l'horizon, une bande de 20° juste au-dessus et une dernière section comprenant le reste du ciel. En appliquant les DC aux valeurs des rayons lancés, la contribution du diffus peut être calculée. Pour prendre en compte la contribution du rayonnement solaire direct, 65 lancers de rayons sont effectués. En effet, les positions du soleil sont discrétisées pour toute l'année et un petit nombre représentatif est utilisé pour calculer les valeurs d'éclairement horaire.

Daysim a déjà été validé expérimentalement à partir de mesures effectuées dans une pièce réelle sous 10 097 conditions de ciel (C. F. Reinhart et Walkenhorst, 2001). Les éclairagements lumineux mesurés ont été comparés aux éclairagements lumineux obtenus à partir de simulations de la représentation 3D de la même pièce en considérant les surfaces comme Lambertiennes. D'autres validations du même type ont été effectuées : Mardaljevic (Mardaljevic, 1995) a obtenu un écart relatif moyen de 5,6%, Reinhart (Christoph Reinhart et Breton, 2009) a obtenu un écart relatif moyen de 7%. Les deux études concluent que Daysim est un logiciel bien adapté à la simulation de lumière du jour. Une étude plus récente a utilisé Daysim pour évaluer la disponibilité de la lumière du jour dans un canyon urbain (Strømman-Andersen et Sattrup, 2011). Il s'agit du même type de simulation qui sera effectué dans la partie III ce qui permettra de comparer les résultats obtenus.

Daysim est toujours en développement et en validation par rapport à d'autres méthodes (Ibarra et Reinhart, 2011). Un plugin, appelé DIVA, a été développé pour le logiciel de CAD Rhinoceros (Dogan, Reinhart, et Michalatos, 2012). Le logiciel Ecotect permet d'exporter des fichiers que Daysim peut utiliser directement pour lancer des simulations.

Utilisation

Pour faire une simulation, il est nécessaire de disposer du climat, de la géométrie ainsi que des propriétés des matériaux et des positions des capteurs. Le climat peut être importé sous deux formats différents : le format EPW provenant du logiciel de simulation thermique des bâtiments EnergyPlus, et le format WEA propre à Daysim. Le format WEA a été utilisé pour sa simplicité. Ce dernier consiste en une entête de 6 lignes permettant de décrire : les coordonnées géographiques du lieu, le fuseau horaire, l'altitude du site et un paramètre qui permet de préciser la nature des données météo décrites dans le fichier (EES ou EESN, et EED). Un programme Java a été développé pour générer les fichiers WEA à partir des données de la station IDMP.

La géométrie peut être importée au format 3DS, le logiciel la convertit au format RAD, reconnu par Radiance. L'importation de la géométrie est décrite dans la section III.1.8.2. Un second fichier RAD contient la définition des matériaux utilisés dans la géométrie. Les matériaux utilisables sont définis dans la documentation de Radiance.

Afin de pouvoir déterminer les points pour lesquels les valeurs d'éclairement veulent être connues, il est nécessaire de construire un fichier PTS dans lequel sont décrites les coordonnées dans l'espace de ces points (Px, Py, Pz) ainsi que l'orientation du plan qu'ils sont censés représentés sous forme d'un vecteur (Vx, Vy, Vz). Par exemple, la ligne "0 0 0 0 0 1" correspond à un point situé à l'origine de la géométrie et qui permet d'obtenir

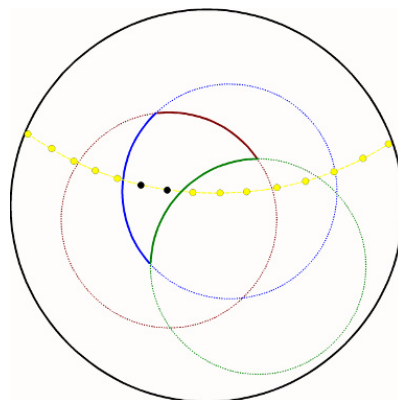
l'éclairement horizontal. Le vecteur V désigne la normale à la surface, dans notre exemple, la normale est verticale. Une fois ce fichier chargé dans l'interface graphique, il est possible de déterminer le type d'éclairement qu'il est souhaité mesurer (lumineux ou énergétique). Le logiciel calcule les DC, puis une valeur d'éclairement en chaque point du fichier PTS, pour chaque ligne du fichier climatique fourni en entrée, ces valeurs sont sauvegardées dans un fichier. Les DC sont systématiquement stockés dans un fichier séparé et peuvent ainsi être réutilisés pour de futures simulations (avec un fichier climatique différent par exemple).

II.5.2.3. Heliodon

Description

Ce logiciel qui permet de calculer l'énergie reçue par le soleil pour des bâtiments dans une géométrie 3D (version utilisée : 2.7-03). Contrairement à Citysim et à Daysim, il ne prend pas en compte les conditions climatiques locales. En effet, il est possible de définir la latitude du lieu considéré pour calculer les positions du soleil, mais les conditions de ciel suivent un modèle de ciel clair qui n'est pas lié à un fichier climatique soumis en entrée. Heliodon ne considère que la contribution du rayonnement solaire direct, le rayonnement diffus provenant du ciel n'est pas évalué, ce qui implique une sous-estimation de l'éclairement par rapport à une situation réelle (de ciel clair). Toutefois, en multipliant le SVF des surfaces de la géométrie, calculé par Heliodon, par l'éclairement diffus horizontal (EED), cela permet d'obtenir une approximation de la contribution du diffus. Cela correspondrait à un modèle de ciel isotrope : les passages nuageux sont supposés uniformes dans le temps et dans l'espace.

Contrairement à Citysim et à Daysim, Heliodon n'effectue pas ses calculs dans l'espace mais dans le plan afin d'obtenir un temps de calcul réduit. En effet, des projections sont utilisées pour représenter la géométrie sur un plan (Beckers, Masset, et Beckers, 2011). La géométrie peut être dessinée dans l'interface graphique si elle est simple, sinon elle peut être importée au format STL ce qui permet d'effectuer des simulations pour des scènes plus complexes.



*Figure II-34 : Résultat de la projection d'un triangle dans Heliodon
(crédit image : Luc Masset, Université de Liège)*

Le format STL a été historiquement utilisé pour décrire des géométries 3D pour une utilisation en stéréolithographie (impression 3D), mais est utilisé dans d'autres domaines du fait de sa simplicité. Pour le calcul, la géométrie est découpée en triangles (ce qui est déjà le cas du format STL). La projection d'un triangle est un triangle à bords circulaires comme le montre la Figure II-34. Il est possible, avec une projection stéréographique, de déterminer si ce triangle projeté crée une obstruction au soleil (points noirs) en ajoutant les positions du soleil (points jaunes) à intervalles réguliers. Cela fait intervenir des calculs simples de géométrie avec les cercles portants du triangle.

L'analogie de Nusselt est utilisée pour calculer le SVF (Nusselt, 1978). La Figure II-35 permet d'en comprendre le principe. Le point P_i est le point de vue dont on veut calculer le SVF. La surface j correspond à une obstruction au ciel. Cette surface est projetée sur une sphère de centre P_i . Cette surface projetée est projetée à son tour orthogonalement sur le disque situé sous la demi-sphère de surface A_D , appelée plan de base de l'hémisphère. Le facteur de vue de la surface j par rapport au point P_i correspond au rapport entre la surface A_j' résultant des deux projections successives et la surface A_D du disque.

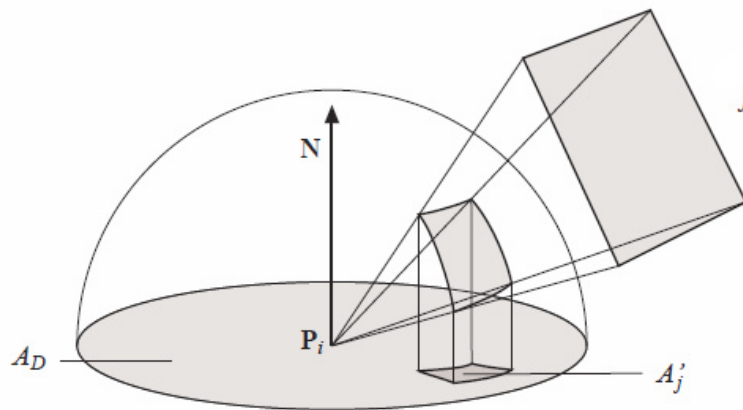


Figure II-35 : Schéma de l'analogie de Nusselt (Tobler, Neumann, Sbert, et Purgathofer, 1998)

Utilisation

La géométrie peut être importée au format STL, elle a été créée dans l'outil Google Sketchup capable de produire un fichier respectant ce format. Les dimensions ont été exportées avec un facteur 1000. En effet, Heliodon donne des valeurs de flux arrondies, si la surface réceptrice est trop petite, cet arrondi peut produire des erreurs importantes. Ainsi, en utilisant une maquette de virtuellement 2 km au lieu de 2 m, le flux reçu par chaque surface est suffisamment élevé pour que l'arrondi soit négligeable. Cela n'a pas d'influence sur la valeur de l'éclairement énergétique car il est donné pour une unité de surface.

Heliodon fournit pour les surfaces souhaitées des flux énergétiques. La modélisation des éclairagements énergétiques par Heliodon est décrite dans l'annexe M, ainsi qu'une équivalence avec le facteur de trouble de Linke. Afin de pouvoir comparer ses résultats avec nos mesures et les valeurs générées par les deux autres logiciels, il nous fallait obtenir des éclairagements lumineux. Pour cela, nous avons une constante d'efficacité lumineuse dont le choix est aussi décrit dans l'annexe M, sa valeur est de 98 lm/W.

Un traitement des valeurs calculées par Heliodon doit être effectué afin de pouvoir les exploiter facilement. En effet, pour chaque surface dont l'éclairement veut être connu, il faut exporter les données manuellement. Le format d'export utilisé par Heliodon a été prévu pour être compatible avec les anciennes versions du tableur Excel qui n'autorisaient pas plus de 256 colonnes. Dans ce format, les 365 colonnes d'une année sont par conséquent réparties sur deux "lignes". Les versions les plus récentes des tableurs permettant d'utiliser jusqu'à 1024 colonnes, les données exportées par Heliodon ont été reformatées de manière à ce que les 365 valeurs ne se trouvent plus que sur une ligne.

II.5.2.4. Comparaison des trois logiciels sur deux cas simples

Des comparaisons vont être effectuées pour deux cas triviaux : une surface horizontale sans obstruction et une surface verticale orientée vers le sud, sans obstruction. Ces simulations simples permettent de vérifier que les conditions climatiques sont correctement reproduites par les logiciels. Les valeurs obtenues seront comparées aux mesures de la station IDMP de l'ENTPE, les simulations ayant été configurées avec les mêmes coordonnées géographiques.

Des simulations d'éclairement lumineux global pour un plan horizontal ont été effectuées avec chaque logiciel pour une journée avec un ciel sans nuages (le 10/08/12) et une journée avec un ciel couvert (le 19/10/11). Pour chacun des cas, l'éclairement lumineux horizontal mesuré par la station IDMP est comparé avec l'éclairement lumineux calculé par chacun des logiciels sur un plan horizontal en l'absence d'obstruction. La Figure II-36 montre les valeurs obtenues pour une journée de ciel sans nuages.

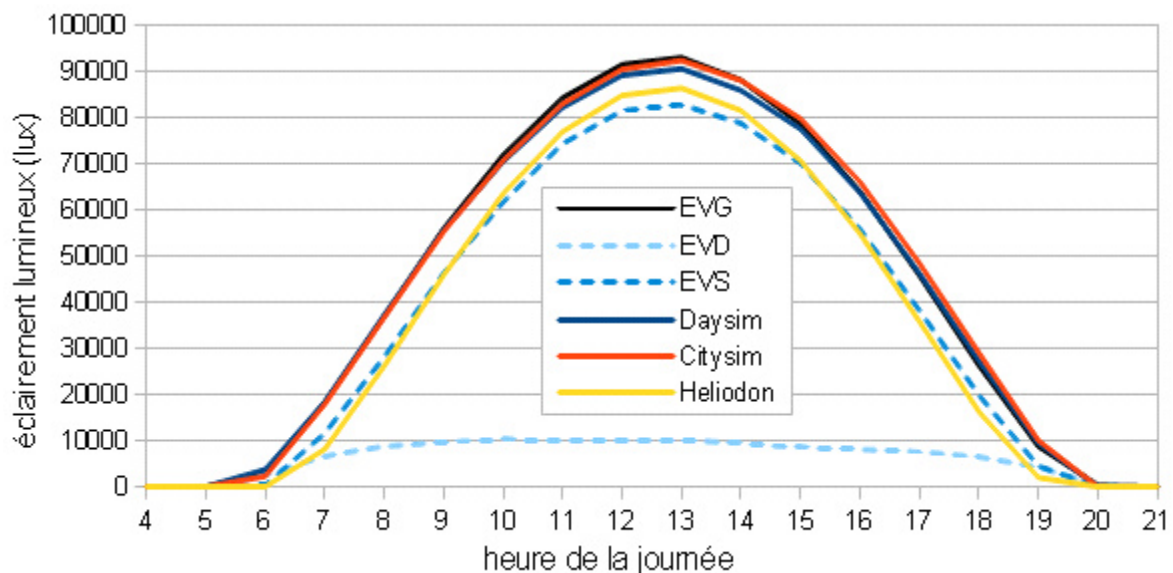


Figure II-36 : Éclairement lumineux horizontal, sans obstruction, pour la journée du 10 août 2012

La forme des courbes obtenues est très représentative de ce type de ciel pour lequel la quantité d'éclairement est directement liée à la hauteur du soleil dans le ciel. Les logiciels Citysim et Daysim sont très proches des valeurs mesurées par la station IDMP alors que les valeurs données par Heliodon sont systématiquement inférieures. Cela est dû au fait

qu'Heliodon ne considère que le rayonnement direct. En effet, ce dernier ne donne des valeurs supérieures à 0 qu'à partir de 6h du matin alors que les autres sources de données produisent des valeurs une heure avant, le même phénomène est constaté pour le soir. L'analyse des données de la station montre que ce jour-là, la hauteur angulaire du soleil a commencé à être positive à partir de 5h35. Avant que le soleil ne se lève, l'éclairement lumineux mesurable n'est dû qu'à la composante diffuse qui est bien prise en compte par Citysim et Daysim, lesquels nécessitent cette donnée en entrée pour pouvoir effectuer des simulations.

L'écart moyen pour la journée par rapport aux données de la station est de -1,2% pour Daysim, 0,5% pour Citysim et -14,8% pour Heliodon. Les écarts obtenus pour Citysim et Daysim sont faibles et sont inhérents aux approches de ces derniers. Par exemple, Daysim effectue un lancer de rayons, de ce fait sa précision dépend directement du nombre de rayons lancés. Si l'on ajoute l'éclairement lumineux diffus horizontal mesuré par la station, à l'éclairement lumineux direct horizontal calculé par Heliodon, cela produit un éclairement lumineux global horizontal dont l'écart moyen est de -0.12%. Cela montre qu'avec une prise en compte du diffus, Heliodon pourrait donner des résultats situés dans un ordre de grandeur satisfaisant dans le cas d'un ciel idéalement clair.

La différence entre Daysim et Citysim se joue sur les valeurs au lever et au coucher du soleil. La Figure II-37 montre la variation sur la journée de l'écart relatif entre les valeurs calculées par chaque logiciel et les valeurs mesurées par la station.

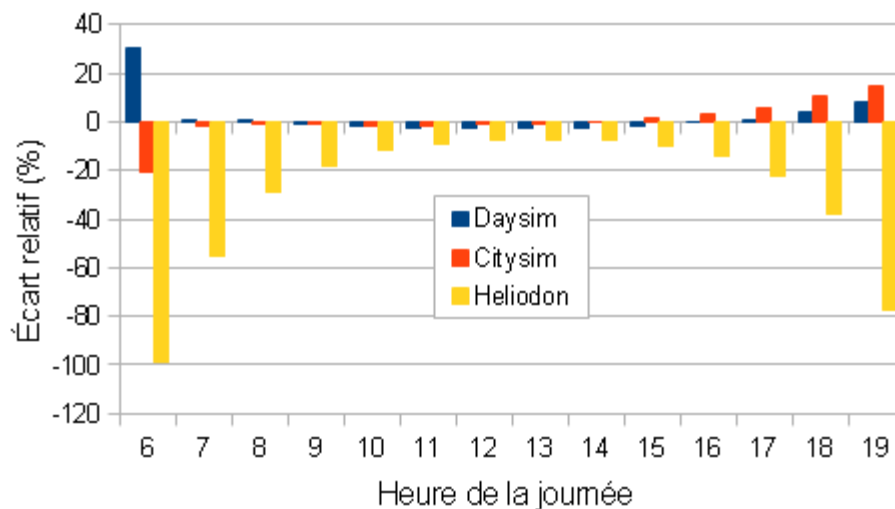


Figure II-37 : Écarts relatifs entre les mesures de la station IDMP et les logiciels, pour la journée du 10 août 2012

Les écarts relatifs de Daysim et Citysim sont très faibles en milieu de journée et prennent les valeurs les plus élevées lorsque le soleil est proche de l'horizon. Un écart relatif positif peut s'expliquer par le fait que les obstructions situées autour de la station n'ont pas été modélisées. Toutefois, les mesures de la station montrent que ces écarts importants interviennent lorsque l'éclairement énergétique direct normal est proche de 0. Il s'agirait donc plutôt d'une difficulté des modèles à représenter l'éclairement diffus pour ces conditions. Citysim et Daysim utilisent tous les deux le modèle de ciel "tout temps" de

Perez ainsi que le modèle d'efficacité lumineuse de Perez. C'est la raison pour laquelle ils affichent des valeurs très proches. Les variations de l'écart relatif obtenu avec le logiciel Heliodon traduisent bien le fait que sa précision est d'autant meilleure que le rayonnement solaire direct est élevé, puisque c'est la seule composante qu'il prend en compte.

Les écarts constatés peuvent aussi provenir de la position du soleil calculée par chaque logiciel. Malheureusement, ces valeurs ne peuvent pas être exportées pour être comparées. La hauteur angulaire et l'azimut du soleil sont calculés à partir de la déclinaison solaire. Or cette déclinaison peut être calculée avec différents algorithmes (cf. section II.3.1.1). Daysim utilise une formulation simplifiée retrouvée dans (Iqbal, 1983). Heliodon utilise une formulation plus précise qui prend en compte la trajectoire elliptique de la Terre (Beckers et Beckers, 2011). Citysim utilise la formulation plus complexe de Spencer (Spencer, 1971). L'écart de chacun de ces algorithmes par rapport à celui de Walraven utilisé pour calculer les positions du soleil pour les données de la station IDMP, est présenté dans la Figure II-38. Ces courbes indiquent que l'écart entre les valeurs calculées par Citysim et Daysim doit être plus grand durant l'automne. Pour un plan horizontal, étant donné que l'algorithme utilisé par Daysim donne une déclinaison solaire plus élevée durant cette période (de $0,1^\circ$ à $0,8^\circ$), la hauteur angulaire du soleil est plus élevée aussi et le logiciel doit donner des valeurs d'éclairement supérieures à celles calculées par Citysim. Dans le cas présent, la journée du 10 août 2012, il s'agit du 222^{ème} jour de l'année et les deux algorithmes donnent des déclinaisons quasiment identiques. Les différences observées proviennent d'un autre fait, comme mentionné précédemment, un paramétrage plus fin du lancer de rayons de Daysim aurait pu réduire l'écart entre les deux logiciels.

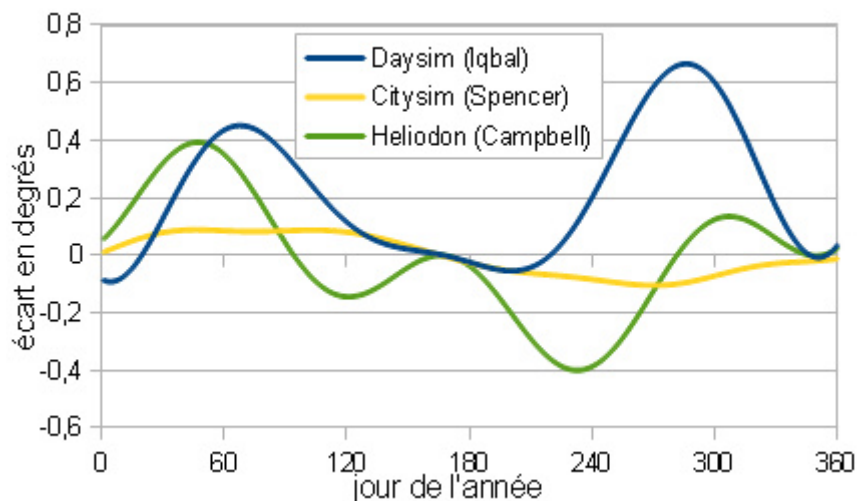


Figure II-38 : Écart entre la déclinaison solaire de différents algorithmes par rapport à celui de Walraven

La Figure II-39 montre cette fois-ci les éclairagements lumineux pour une journée avec un ciel couvert. Tout comme pour l'exemple précédent, les logiciels Citysim et Daysim donnent des valeurs proches de celles mesurées, si bien que les courbes se confondent. Heliodon ne modélisant que des conditions de ciel clair, ses éclairagements lumineux ne peuvent correspondre à ceux d'un ciel couvert. Pour cette journée, l'écart moyen obtenu avec Daysim est de -1% et de 0,85% pour Citysim.

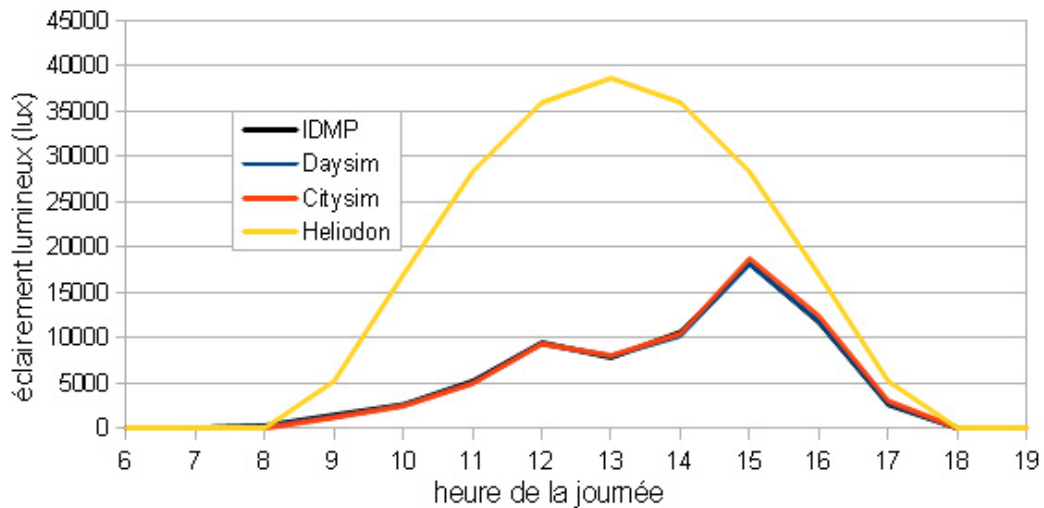


Figure II-39 : Éclairement lumineux horizontal pour la journée du 19 octobre 2011

Pour ces deux conditions extrêmes (ciel clair et ciel couvert), Citysim donne les meilleurs résultats, suivi de près par Daysim. Comme pour Citysim, nous avons utilisé les paramètres par défaut de Daysim. En modifiant certains paramètres de Daysim, tels que le nombre de rayons lancés, le poids minimal d'un rayon avant d'être ignoré, il serait peut être possible d'améliorer sa précision.

L'autre cas simple étudié est celui d'une façade verticale orientée plein sud, en l'absence d'obstruction. Le sol a été modélisé avec un facteur de réflexion lumineux de 0,05, ce qui se rapproche des conditions de la station IDMP. La Figure II-40 montre les résultats obtenus par les simulations pour la journée de ciel clair du 10 août 2012. Des mesures provenant de la station sont aussi présentées.

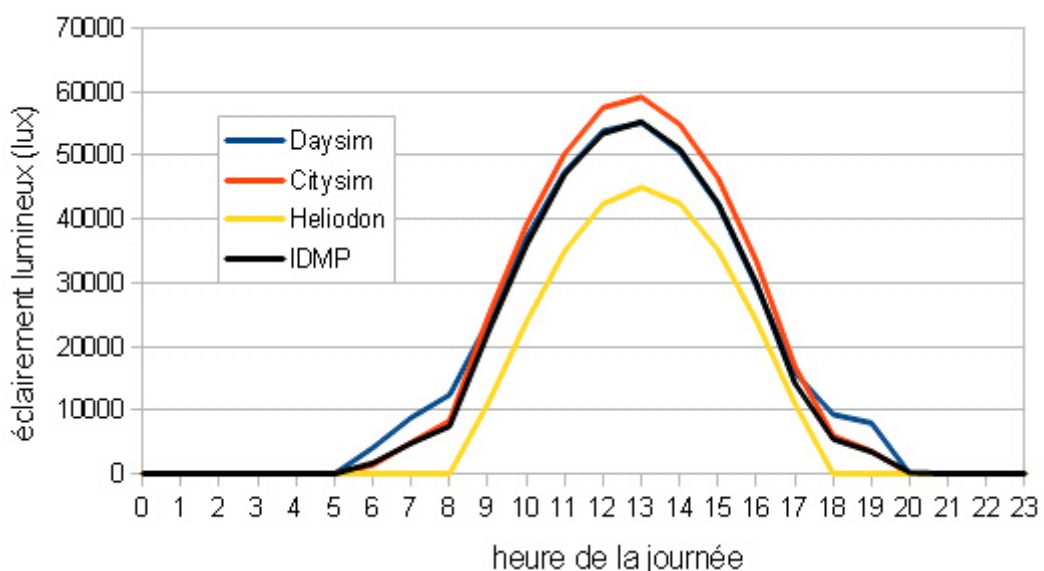


Figure II-40 : Éclairement lumineux sur une façade verticale plein sud, sans obstruction, pour la journée du 10 août 2012

La courbe des éclairagements lumineux calculés par Heliodon se trouve en-dessous de toutes les autres. À l'instar de l'exemple de l'éclairage lumineux global horizontal pour la même journée (cf. Figure II-36) cela provient de l'absence de prise en compte du rayonnement diffus. D'ailleurs, le matin entre 5h et 8h ainsi que le soir entre 18h et 20h, l'éclairage lumineux calculé est nul alors que la station (et les autres logiciels) donnent des valeurs non nulles. Étant donné que pour un ciel sans nuages, la distribution des luminances du ciel conduit à des valeurs généralement plus élevées à l'horizon qu'au zénith (cf. section II.3.4.1), la contribution du rayonnement diffus représente une part plus importante du global pour une surface verticale.

Daysim et Citysim donnent des valeurs supérieures à celles de la station IDMP, avec des écarts relatifs moyens respectifs de 6% et 8%. La contribution du sol peut être mise en cause, car les deux logiciels ne la traitent pas de la même façon. Dans Daysim, il faut simplement définir un albédo pour le sol alors qu'il faut en plus définir la surface du sol dans Citysim. En faisant varier dans Citysim la surface du sol autour de la façade verticale testée, les éclairagements lumineux calculés diffèrent. Cela provient du fonctionnement du solveur. En l'absence de sol, c'est-à-dire que le sol est plus petit que l'emprise au sol du bâtiment créé, la simulation se déroule sans erreur et l'écart relatif obtenu est de 125%, soit une surestimation plus importante de l'éclairage lumineux.

Nous remarquons aussi des différences entre les formes des courbes. L'écart entre les valeurs simulées par Daysim et celles mesurées par la station, est plus important lorsque le soleil est bas. Le contraire se produit entre les valeurs de Citysim et celles de la station. La station comprend une sonde qui mesure l'éclairage lumineux dans un plan orienté plein sud. Cependant, il existe un ombrage lointain qui cache le soleil lorsqu'il est bas comme le montre la Figure II-41.

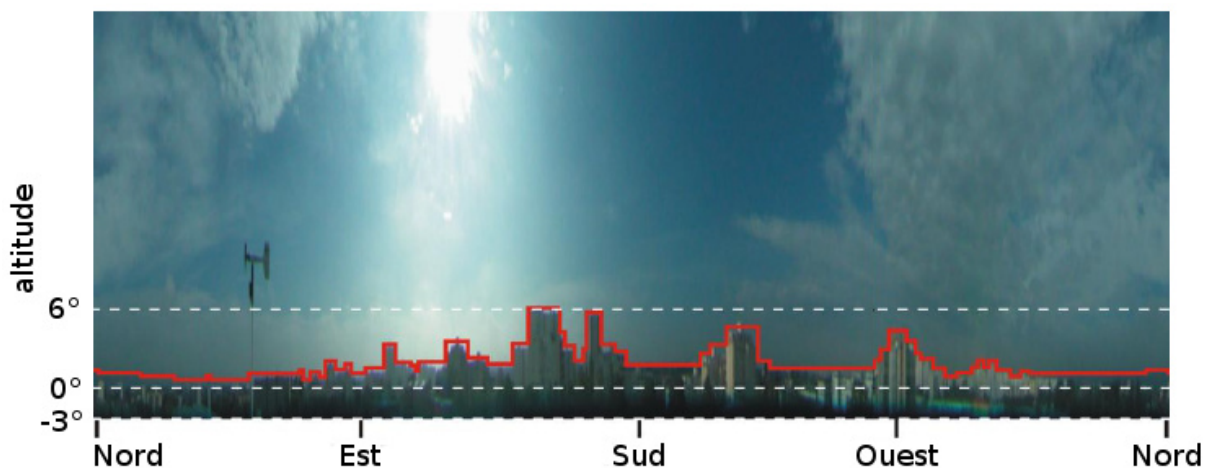


Figure II-41 : Ombrage lointain vu de la station IDMP de l'ENTPE (Kobav, 2009)

La sonde placée verticalement ne voit que la moitié de la voûte céleste et les obstructions occasionnées par les bâtiments situés au loin, se trouve en plein dans son champ de vision. L'influence de ces obstructions n'est pas perceptible pour le rayonnement solaire direct puisque le soleil est quasiment toujours plus haut. Cette influence peut cependant être remarquable dans le cas du rayonnement diffus. Cela peut d'ailleurs expliquer pourquoi

Daysim produit un éclairage lumineux plus important avant 8h et après 18h : il considère une portion de diffus qui est cachée dans la réalité.

Si la façade avait été orientée vers le nord, Heliodon aurait donné des valeurs nulles toute la journée, à l'exception du lever et du coucher du soleil en été. En effet, le soleil est directement visible par une surface orientée au nord pendant quelques minutes durant cette période de l'année à la latitude où se trouve la station. Citysim et Daysim prennent en compte le diffus mais donnent pourtant un écart relatif moyen différent de 5%. Pour les simulations d'un canyon urbain, il est peu probable que les écarts entre les logiciels soient inférieurs à cette valeur.

II.5.2.5. Synthèse des fonctionnalités des trois logiciels

Nous avons décrit le fonctionnement des logiciels Citysim, Daysim et Heliodon qui utilisent des approches et des degrés d'approximation différents. Le Tableau II-3 synthétise les différentes caractéristiques qui permettent de les différencier par rapport à leur utilisation.

| Fonctionnalité | Citysim | Daysim | Heliodon |
|---------------------------------|--|-----------------------|---------------|
| CAO | oui | non | oui |
| Import géométrie | kml,dxf,rad | 3ds,rif | stl |
| Données climatiques nécessaires | éclairagements énergétiques direct normal et diffus horizontal | | aucune |
| Résolution temporelle max | heure | heure | minute |
| Type de capteur | surface | point | surface |
| Réflexion des matériaux | diffuse | diffuse et spéculaire | aucune |
| Format de sortie | texte | texte | graphique/xls |

Tableau II-3 : Caractéristiques concernant l'utilisation des logiciels sélectionnés

Du point de vue de l'utilisateur, la simplicité de l'interface graphique reste un critère important. Daysim risque de donner le plus de difficultés à l'utilisateur non initié, car son interface est peu évidente à appréhender au premier abord. La configuration du lancer de rayons et le lancement d'une simulation peuvent être problématiques lorsqu'on ne connaît pas le logiciel. Néanmoins, des paramètres par défauts sont disponibles, ce qui facilite le lancement de simulations sans avoir à connaître le paramétrage de RADIANCE. L'interface de Citysim est prometteuse, ses versions les plus récentes n'ont pas pu être pleinement testées, cependant Citysim permet de dessiner les géométries et de les éditer, ce qui n'est pas le cas de Daysim. La visualisation de la géométrie est facile alors que Daysim n'offre qu'un aperçu de basse qualité. Enfin, Heliodon possède une interface graphique conviviale et plutôt intuitive notamment en ce qui concerne la visualisation de la géométrie. De plus, il permet de visualiser très rapidement et graphiquement les résultats des calculs, ce qui n'est pas le cas des autres logiciels dans les versions que nous avons utilisées.

La mise en œuvre des simulations a nécessité un certain nombre de manipulations de données pour générer convenablement les géométries au bon format, les revêtements et exporter puis traiter les données. Bien que les développeurs se soient attachés à permettre l'importation et l'exportation de formats standards, ce travail mérite d'être plus abouti conjointement à l'ergonomie. En l'état actuel, Heliodon, le logiciel le plus simple et rapide à prendre en main, ne produit des résultats que pour le rayonnement solaire direct,

inversement, Daysim, le logiciel offrant le plus de possibilités est aussi le moins évident à manipuler.

Concernant la précision des valeurs calculées, deux cas ont été analysés, celui d'une journée de ciel clair et celui d'une journée de ciel couvert. Heliodon ne peut être utilisé que pour des conditions de ciel clair en sachant que l'absence de prise en compte du rayonnement diffus induit une sous-estimation des éclairagements calculés. Citysim et Daysim ont donné des résultats proches de la réalité avec un écart moyen inférieur à 1,5%.

Par ailleurs, le Tableau II-4 donne les temps de calcul des éclairagements lumineux sur une représentation en 3D d'un canyon urbain, pour trois types de revêtement différents. Les simulations ont été effectuées sur un ordinateur équipé d'un processeur double cœur d'une fréquence d'horloge de 3,16 GHz avec 4 Go de mémoire RAM et un disque dur de 7200 RPM avec un taux de transfert de 150 Mo/s.

| Revêtement | Nombre de jours simulés | Citysim | Daysim | Heliodon |
|-------------------|--------------------------------|----------------|---------------|-----------------|
| Noir | 13 | 2 s | 134 s | 3 s |
| Crépi | 96 | 5 s | 130 s | 5,6 s |
| Crépi+fenêtres | 27 | 3,5 s | 250 s | 3,5 s |

Tableau II-4 : Temps de simulation pour H/W=1, au pas horaire

Le temps mis par Daysim est en moyenne 60 fois supérieur à celui de Citysim, avec les paramètres par défaut. Cependant ce temps inclut le calcul des DC. Une fois que les DC sont calculés, ils peuvent être sauvegardés et réutilisés, les simulations sont alors très rapides, du même ordre de grandeur que Citysim, c'est-à-dire entre 2 s et 3 s.

Nous venons de donner un premier aperçu des capacités de ces trois logiciels. Avec différentes approches et degrés d'approximation, les temps de calculs et la précision des résultats diffèrent en fonction de la géométrie et du climat. Nous allons nous attacher dans la suite à produire des mesures permettant de conclure sur leurs performances à simuler les éclairagements à l'intérieur d'un canyon urbain sous des conditions climatiques réelles.

Partie III - Mesures effectuées pour notre étude

Le but de cette partie est de mettre en place deux protocoles expérimentaux permettant de caractériser la répartition de la lumière naturelle à l'intérieur d'une rue et de valider les logiciels de simulation décrits dans la partie précédente.

Dans un premier temps, des mesures sur site ont été effectuées pour obtenir des informations permettant de caractériser les canyons urbains Lyonnais. Les hauteurs des bâtiments, la largeur et l'orientation des rues, ainsi que les facteurs de réflexion lumineux des façades, ont été estimés, afin de sélectionner des rues représentatives du tissu urbain Lyonnais. Ces paramètres ont une influence sur l'accès à la lumière naturelle en milieu urbain (cf. chapitre I.3). Ils ont ensuite été mesurés dans les rues sélectionnées. L'étude sur Lyon permet d'illustrer la gamme de valeurs que ces paramètres peuvent prendre sur le terrain. Les éclairiments lumineux ont aussi été mesurés au niveau des façades des bâtiments, à différentes hauteurs, et à intervalles réguliers sur toute la longueur des rues sélectionnées. Cette étape a permis d'évaluer une méthode de mesure sur site de la distribution des éclairiments lumineux des façades à partir de photographies.

Dans un second temps, un modèle réduit de canyon urbain a été réalisé avec deux objectifs. Le premier objectif était d'évaluer l'influence des paramètres retenus, et mentionnés dans le paragraphe précédent, sur la quantité de lumière à l'intérieur d'un canyon dont la géométrie était la plus simple possible : deux façades de même hauteur se faisant face. Les mesures sur maquette apportent une grande flexibilité par rapport à des mesures sur site. La géométrie de la maquette pouvait être modifiée et les revêtements de ses façades pouvaient être changés. Grâce à cela, il était possible de tester plusieurs combinaisons de paramètres qui influent sur la répartition de la lumière naturelle tels que le rapport d'aspect (H/W) et le type de revêtement des façades, pour plusieurs types de ciel, à plusieurs moments de l'année. Sans la maquette, il aurait fallu effectuer des mesures dans de nombreuses rues possédant toutes ces caractéristiques, si tant est qu'elles existent à Lyon. Le deuxième objectif était d'évaluer la qualité des simulations effectuées par des logiciels capables de calculer l'éclairissement lumineux à l'intérieur d'une représentation en 3D d'un canyon. La comparaison entre les mesures effectuées sur la maquette, sous des conditions de ciel réelles, dans un environnement contrôlé permettait de vérifier la capacité des logiciels sélectionnés à fournir des valeurs proches de la réalité pour un cas simple. La complexité du relief urbain réel est plus difficile à modéliser. L'influence de cette complexité a pu être analysée en effectuant des simulations avec les mêmes logiciels de simulation, mais en utilisant une géométrie et une photométrie des rues de références proches de la réalité.

III.1. Mesures sur le terrain

La quantité de lumière qui atteint les façades des bâtiments peut être mesurée suivant différents procédés utilisant des instruments de mesure tels que des albédo-mètres, des luminance-mètres, des sondes photométriques. Plusieurs études ont utilisé, en milieu urbain, des véhicules motorisés équipés d'appareils photos ou tout autre type d'instruments de mesure. Par exemple, un appareil initialement prévu pour analyser la densité du feuillage d'une canopée (Leaf Area Index) a été utilisé pour estimer le SVF en milieu urbain (Grimmond *et al.*, 2001). Une autre étude a utilisé un véhicule pour effectuer des relevés de température à intervalles réguliers dans le but de corrélérer les mesures, après les avoir intégrées dans un SIG, avec les valeurs de SVF correspondant aux points de mesure (Lindberg, Eliasson, et Holmer, 2003). L'utilisation d'un véhicule pose deux problèmes. Le premier problème concerne le type de mesure à effectuer. Certaines mesures comme celles des facteurs de réflexion nécessitent de se placer à seulement quelques centimètres du matériau à caractériser, elles ne peuvent être faites qu'en tant que piéton. Le deuxième problème est lié au respect des règles de circulation, ce qui rend difficiles les mesures au milieu de la rue et la présence d'autres véhicules rend délicat le déplacement à faible vitesse. Toutefois, si le véhicule roule à 30 km/h, la distance parcourue pendant la prise d'une photographie avec un temps d'obturation de $1/60^{\text{ème}}$ de seconde est de 14 cm. Le calcul du SVF peut être effectué à partir d'une seule photo (cf. section I.3.4), l'erreur est peu importante avec un tel écart durant l'intervalle de prise de vue. En revanche, cela devient gênant s'il faut effectuer plusieurs clichés. Il est possible de mesurer les luminances du ciel et des façades à partir d'images à grande gamme dynamique (HDRI), une technique qui nécessite effectivement la prise de plusieurs photos avec des réglages différents.

L'imagerie HDR est une technique qui permet d'obtenir des images couvrant une plus grande plage d'intensité lumineuse. En photographie numérique conventionnelle, il n'y a que 256 valeurs possibles pour chaque composante rouge, verte ou bleue d'un pixel de l'image. Cette quantité est insuffisante pour représenter des scènes dont l'écart de luminosité entre le pixel le plus clair et le plus sombre est grand. Étant donné que cela sort des limites du capteur d'un appareil photo standard, il est possible d'obtenir un tel résultat en combinant plusieurs photographies avec des expositions différentes. Chacune des photos peut être ainsi prise avec des indices de lamination (IL) différents. L'indice de lamination correspond à une mesure de l'exposition sur une échelle logarithmique de base 2, il se calcule à l'aide du temps de pose t en secondes et du nombre d'ouverture N :

Pour une sensibilité ISO 100 :

$$IL_{100} = \log_2 \frac{N^2}{t} \quad (III-1)$$

Pour une sensibilité S :

$$IL_S = IL_{100} - \log_2 \frac{S}{100}$$

L'IL dépend de la sensibilité de la pellicule, donnée sur une échelle appelée ISO. L'IL pour n'importe quelle sensibilité se calcule à partir de l'IL pour un ISO de 100. Le nombre d'ouverture correspond au rapport entre la distance focale et le diamètre du diaphragme, il s'agit donc d'une valeur sans unité. Ainsi pour un IL donné, IL+1 signifie que le capteur a reçu 2 fois moins de lumière, de même, IL-1 signifie deux fois plus de lumière. D'après la formule, il est possible de faire varier l'IL en modifiant soit le temps d'exposition soit l'ouverture. En réalité, lorsque l'ouverture est modifiée, l'angle de champ l'est aussi, or il est préférable de conserver un angle de champ entre les différentes images, c'est donc le temps d'exposition qui est modifié d'une image à l'autre alors que le nombre d'ouverture est constant. Une image HDR ne peut être imprimée ou affichée sur un écran conventionnel, des algorithmes dits de "tone mapping" doivent être utilisés pour reproduire cette image sur un écran standard tout en conservant un niveau de détail et de rendu des couleurs sans zones sombres ou saturées. Étant donné que la luminance du soleil est de l'ordre de 10^6 cd/m² et qu'il est possible de constater dans une même scène des quantités de lumière de l'ordre de la dizaine de cd/m² (dans des zones les plus ombragées), il est nécessaire de prendre plusieurs clichés avec des expositions différentes pour couvrir la totalité de la gamme qu'il est possible de rencontrer lorsqu'on photographie le ciel. Un minimum de cinq photos est généralement nécessaire. La photo de droite de la Figure III-1 est le résultat d'un tone mapping des trois photos de gauche selon l'algorithme de Fattal (Fattal, Lischinski, et Werman, 2002). L'utilisation de trois photos est suffisante ici car le soleil ne se trouve pas dans le champ de vision de l'appareil, ce qui réduit la gamme de luminances de la scène. Chacune des photos permet d'obtenir un niveau de détail satisfaisant pour des zones plus ou moins lumineuses de la scène : la photo IL=15 permet de voir en détail le mur du bâtiment, ce que ne permet pas la photo IL=11 qui en revanche permet de voir le détail de la végétation en bas.



Figure III-1 : Exemple de "tone mapping" d'une image HDR à partir de 3 photos

Sur le plan pratique, la mesure des luminances à partir de la technique d'imagerie HDR est difficilement concevable. Elle nécessite de s'arrêter à intervalles réguliers pour prendre plusieurs photos dont le temps d'exposition cumulé peut prendre plusieurs secondes. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres usagers de la route si l'appareil est placé sur un véhicule en circulation.

Le projet RECLUS pour "Rayonnement et bilan d'Énergie en CLimatologie Urbaine à Strasbourg" (Najjar *et al.*, 2004) peut être mentionné car il s'est accompagné d'une campagne de mesures des paramètres du climat urbain dans la ville de Strasbourg. Des instruments de mesure ont été installés sur un échafaudage placé contre la façade d'un bâtiment dans un canyon urbain de rapport d'aspect $H/W=0,9$. L'éclairement énergétique a été mesuré à l'horizontale, et parallèlement aux murs, sur 4 niveaux différents d'une façade de 25 m de haut. Le rayonnement infrarouge a aussi été mesuré à l'aide de pyr géomètres placés à l'horizontale, ainsi que la température et l'humidité. Des anémomètres soniques ont été installés pour pouvoir mesurer les vecteurs vents et le flux de chaleur sensible à l'aide de la technique de covariance des turbulences. Deux mâts possédant des instruments de mesure équivalents ont été installés dans un rayon de moins d'un kilomètre afin de pouvoir bénéficier de mesures à l'échelle du quartier. Parallèlement, des mesures de télédétection, réflectance, émissivité et température de surface à l'aide d'une caméra infrarouge ont été effectuées par avion. Enfin des mesures d'humidité et de température couplées à un GPS ont été faites à l'aide d'un véhicule mobile. Cette campagne de mesure est très complète, elle a permis par exemple de créer une carte de l'albédo de la ville (cf. Figure III-2).



Figure III-2 : Carte d'albédo du centre ville de Strasbourg (Najjar *et al.*, 2004)

La pertinence du choix du placement des instruments de mesure pour le projet RECLUS peut être remise en question dans l'environnement du canyon urbain. En effet, les instruments ont été placés sur un échafaudage situé à 5 m de la façade, cela revient à considérer que la rue mesurait 19 m de largeur au lieu de 24 m. De plus, les paramètres mesurés ont été influencés par la présence de l'imposant échafaudage. Enfin les données ne sont disponibles que pour une façade du fait que le dispositif est fixe, et conçu pour effectuer des mesures uniquement sur une façade.

Contrairement au projet RECLUS pour lequel des mesures à un endroit donné ont été effectuées pendant une longue période, nous allons décrire un protocole de mesure des éclairements lumineux et des luminances des façades en plusieurs points d'une rue, dans un temps le plus court possible. Cela permet de caractériser la répartition de la lumière dans la rue pour une condition de ciel donnée. La section suivante présente les rues sélectionnées pour effectuer ces mesures.

III.1.1. Sélection des rues

Plusieurs paramètres ont été pris en compte pour le choix des rues qui ont servi de références. Tout d'abord, il s'agit de rues représentatives du paysage urbain de la ville de Lyon. La Figure III-3 montre un découpage de la ville de Lyon en plusieurs zones à l'intérieur desquelles le tissu urbain présente une certaine homogénéité. Les zones ont été délimitées manuellement en tenant compte des photographies aériennes (Google Maps) et des vues de l'intérieur des rues (Google Street View).

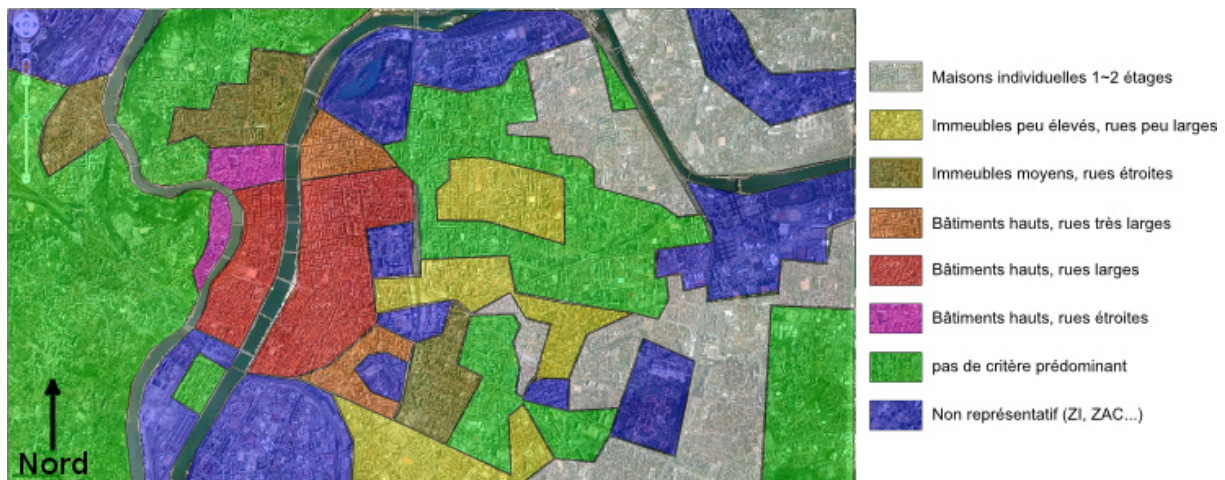
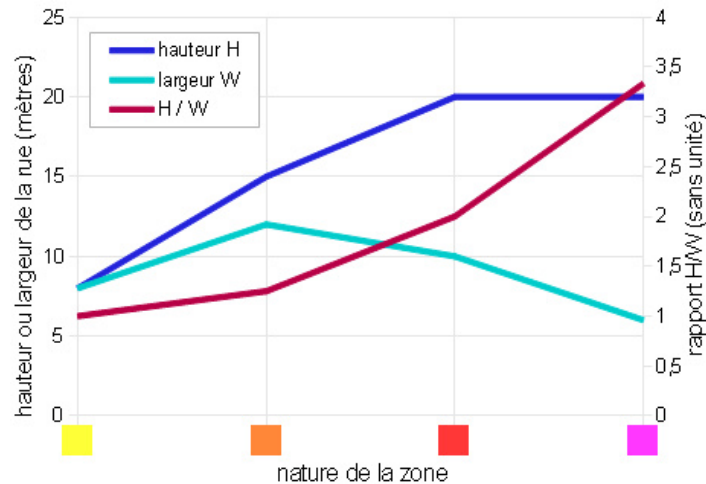


Figure III-3 : Caractérisation du tissu urbain Lyonnais réalisé par l'auteur

Le centre-ville se trouve dans la partie rouge, les rues y sont représentatives d'une grande ville avec une largeur supérieure à 10 m et des bâtiments d'environ 20 m de haut, le rapport d'aspect (H/W) moyen estimé sur site est de 2. Le centre historique en violet est constitué de rues étroites typiques avec des bâtiments d'environ 20 m de haut mais rapprochés de moins de 10 m, le rapport d'aspect oscille alors entre 3 et 4. Les surfaces jaunes caractérisent des quartiers regroupant principalement des logements, on y trouve des petits appartements de 1 à 2 étages organisés dans des canyons urbains de rapport d'aspect proche de 1. Les zones en gris représentent des quartiers résidentiels avec des maisons individuelles et de la végétation. Contrairement aux rues des zones précédentes, les rues de cette zone ne peuvent plus être assimilées à des canyons urbains. Les zones vertes restantes sont constituées d'immeubles de 10 à 20 étages et d'autres bâtiments de formes variées, disposés sans définir une géométrie de type canyon. La géométrie de ces rues, du fait de leur irrégularité, n'est pas suffisamment proche de celle représentée par notre maquette : un canyon urbain idéal. Parmi les zones en bleu, on trouve des zones d'activité industrielle, des friches ou des constructions en travaux, un centre commercial, un grand parc, un campus universitaire et un hôpital.

La Figure III-4 montre le détail du rapport d'aspect des rues de Lyon, les couleurs se rapportent à celles utilisées dans la Figure III-3. Les valeurs ont été obtenues à partir de la moyenne des mesures effectuées, à l'aide d'un télémètre (LEICA D3a, précision de l'ordre du millimètre), dans 8 rues situées dans des zones différentes. Ce graphique permet de caractériser les dimensions des canyons du tissu urbain Lyonnais. La hauteur des

bâtiments se stabilise à 20 m alors que le rapport d'aspect augmente, c'est donc la largeur des rues qui le fait varier, ainsi la canopée urbaine reste relativement plane.



*Figure III-4 : Détail du rapport d'aspect des rues de Lyon.
Les couleurs en abscisse se rapportent à celles utilisées dans la Figure III-3*

Les différents paramètres retenus pour choisir des rues de référence sont : l'orientation, la longueur, le rapport d'aspect et la régularité des hauteurs de façades. Ces rues doivent être proches des configurations possibles avec maquette (cf. section III.2.1) afin de pouvoir procéder à des comparaisons entre les valeurs mesurées sur la maquette et sur le terrain. L'orientation idéale de la maquette, selon l'axe nord/sud, n'a pu qu'être approchée sur le terrain. La Figure III-3 en donne la raison : dans la partie en rouge, les rues sont toutes parallèles et avec une orientation décalée par rapport aux axes recherchés. Il est donc difficile de trouver un canyon disposé correctement dans cette zone. Le second paramètre essentiel est le rapport d'aspect (H/W), rapport entre la hauteur H des façades et la largeur W de la rue : il s'agit de trouver des ratios représentatifs d'une catégorie. Enfin les rues choisies doivent être suffisamment longues et contenir des façades de hauteur constante sur toute leur longueur, afin de limiter les effets de bords.

Le choix des rues est aussi axé sur des critères plus pratiques, par exemple, pour effectuer des mesures de qualité, il faut choisir des rues assez peu fréquentées. En effet, étant donné que certains capteurs d'éclairage sont situés à hauteur d'homme, le passage d'un piéton ou d'un véhicule peut introduire un biais non négligeable dans les mesures. Cela se traduit par une obstruction partielle du champ de vision de la sonde (piéton), ou bien une contribution lumineuse non désirée (véhicule reflétant la lumière du soleil). Une rue calme possède aussi l'avantage de présenter peu ou pas de commerces au niveau des rez-de-chaussée, cela permet de conserver une homogénéité du revêtement des façades entre tous les étages. Une courte distance entre les rues est un critère important pour le choix car il faut transporter le matériel à pied, cela permet d'effectuer les mesures rapidement dans toutes les rues et d'éviter des différences trop importantes entre les positions du soleil.

Les rues ont enfin et surtout été choisies pour l'homogénéité de leurs revêtements de façades ainsi que pour l'uniformité de la hauteur de leurs bâtiments. Cela permet de se rapprocher d'un canyon typique, plus facile à modéliser et plus proche de celui utilisé sur la

maquette, tout en restant caractéristique du terrain. Si les résultats de simulation sont proches des mesures effectuées sur le terrain, notre étude pourrait être prolongée en menant une démarche équivalente à partir de rues plus complexes, avec des hauteurs de bâtiment variables et des revêtements très différents, voire en prenant en compte des façades entièrement vitrées.

La Figure III-5 représente le centre-ville de Lyon où se trouvent les 5 rues (en vert) dans lesquelles des mesures ont été effectuées. Pour chaque rue, le rapport d'aspect moyen est donné ainsi que l'orientation par rapport au nord, représenté par une flèche rouge. L'orientation a été mesurée à partir d'un outil de mesure d'angle disponible dans le logiciel Google Earth. Le nord a une orientation de 0° , l'est se trouve à 90° , le sud à 180° et l'ouest à 270° . Il y a deux rues orientées est/ouest (Leynaud et Fénelon) alors que les autres sont orientées nord/sud. Ces rues ne possèdent pas de végétation, la présence d'arbres pourrait rendre impossible les mesures sur site. Elles consistent en deux rangées de bâtiments collés les uns aux autres afin de représenter le plus fidèlement possible un canyon urbain. De même, leur longueur a été choisie la plus grande possible pour limiter l'influence des intersections avec d'autres rues qui créent des ruptures dans la forme du canyon.

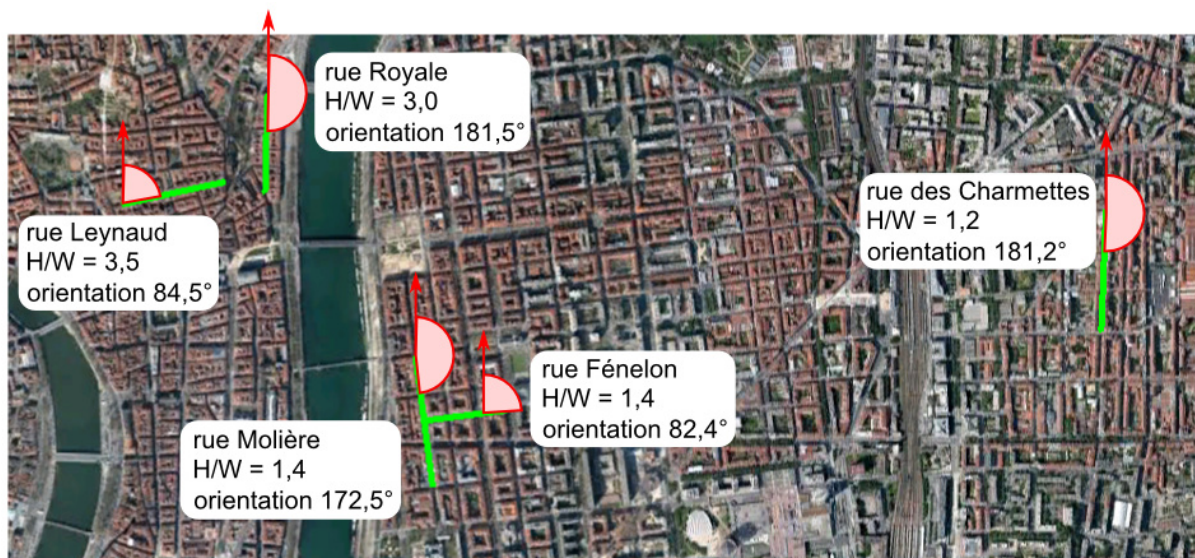


Figure III-5 : Localisation et propriétés des rues sélectionnées

III.1.2. Données mesurées

Afin de connaître l'influence des paramètres d'un canyon urbain sur les éclairagements lumineux disponibles à la surface des façades, des mesures ont été réalisées dans les rues choisies. Cette section décrit les trois types de mesures qui ont été effectuées ainsi que l'intérêt de posséder de telles données.

Facteurs de réflexion lumineuse de chacune des façades

Ce paramètre permet de décrire le comportement d'un matériau par rapport à la lumière, il a été décrit dans le chapitre II.2. Le facteur de réflexion lumineuse doit être connu pour deux raisons. La première est liée au fait que les mesures d'éclairement sur site seront comparées aux valeurs calculées par les logiciels, ceux-ci ont besoin de cette information. La deuxième est liée au fait que les éclairages lumineux sur les façades seront également calculés à partir des cartes de luminances des façades en utilisant leur facteur de réflexion. Ces facteurs de réflexion sont mesurés pour chacune des façades de la rue, ce qui permettra de faire la différence avec la maquette où toutes les façades possèdent le même revêtement.

Luminances des façades

Il est possible d'obtenir la luminance en un point donné d'une scène à partir de photographies. Cette technique utilise le même principe que les images HDR mentionnées au début du chapitre. En effet, en utilisant plusieurs photographies de la même scène avec des indices de lamination (IL) différents, il est possible d'obtenir une image unique contenant l'information de luminance en tout point de la scène. Pour cela, il faut que l'appareil photo ait été étalonné en luminances. Le principe repose sur le fait qu'il existe une relation entre la luminance d'un point de la scène et la luminosité du pixel qui le représente dans l'image. Cette luminosité correspond à la valeur L^* du pixel dans l'espace colorimétrique CIELAB (CIE, 1986). Ce modèle de représentation des couleurs est basé sur deux paramètres décrivant la perception de la vision humaine : la luminance et la chrominance. La luminosité L^* représente la capacité à percevoir l'intensité lumineuse, la chrominance permet de définir l'information de la couleur grâce aux coordonnées chromatiques a^* et b^* . Dans un premier temps, les images sont donc converties de l'espace colorimétrique RVB vers le modèle CIELAB.

La relation entre la luminance et la luminosité est établie grâce à un étalonnage de l'appareil photo (Canon EOS 50D) effectué en laboratoire. L'appareil est équipé d'un objectif fisheye (Sigma 4,5 f/2,8), l'étalonnage étant fait pour l'ensemble boîtier et objectif. La procédure d'étalonnage consiste à éclairer une cible blanche diffusante avec une source permettant d'obtenir la gamme de luminances la plus large possible (ici de 0,1 à 600 000 cd/m²). La source utilisée au laboratoire est en fait la lampe d'un vidéoprojecteur. La luminance de la cible est mesurée à l'aide d'un luminance-mètre calibré. Ensuite, plusieurs photographies sont prises avec des IL différents. Il est alors établi une relation entre la luminance de la cible et la luminosité des pixels de l'image pour chaque IL, comme le montre la Figure III-6.

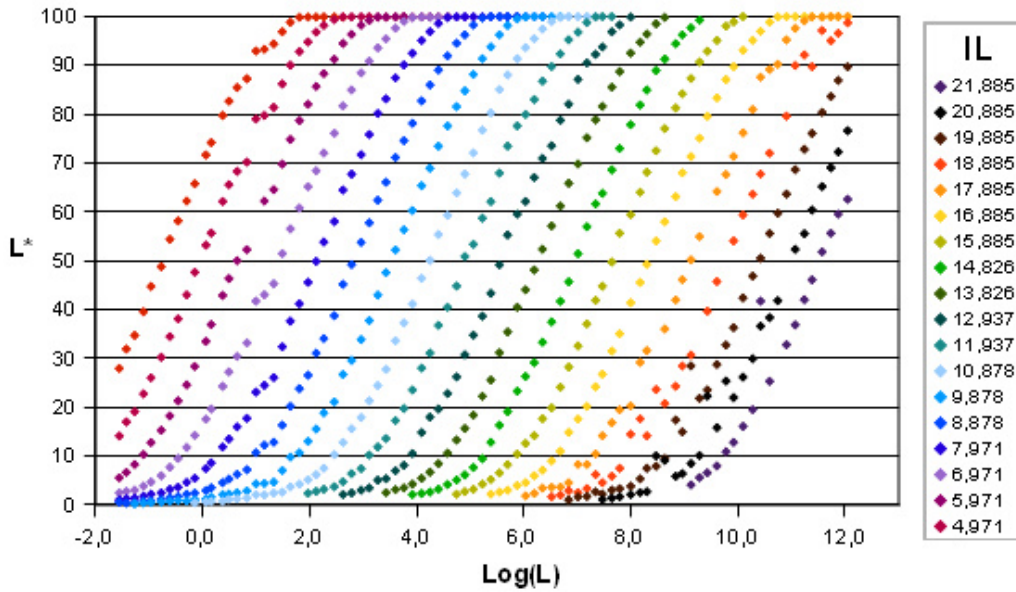


Figure III-6 : Correspondance entre la luminosité L^* des pixels et la luminance L , pour le boîtier Canon EOS 50D utilisé (numéro de série : #2060709339)

D'après les données montrées sur la Figure III-6, il est possible d'utiliser un ensemble d'IL afin de couvrir toute la gamme de luminances mesurables par l'appareil photo. La Figure III-7 représente cette gamme de luminance, qui s'étend de 0,1 cd/m² à 420 000 cd/m², laquelle peut être obtenue à l'aide de huit indices de lamination seulement.

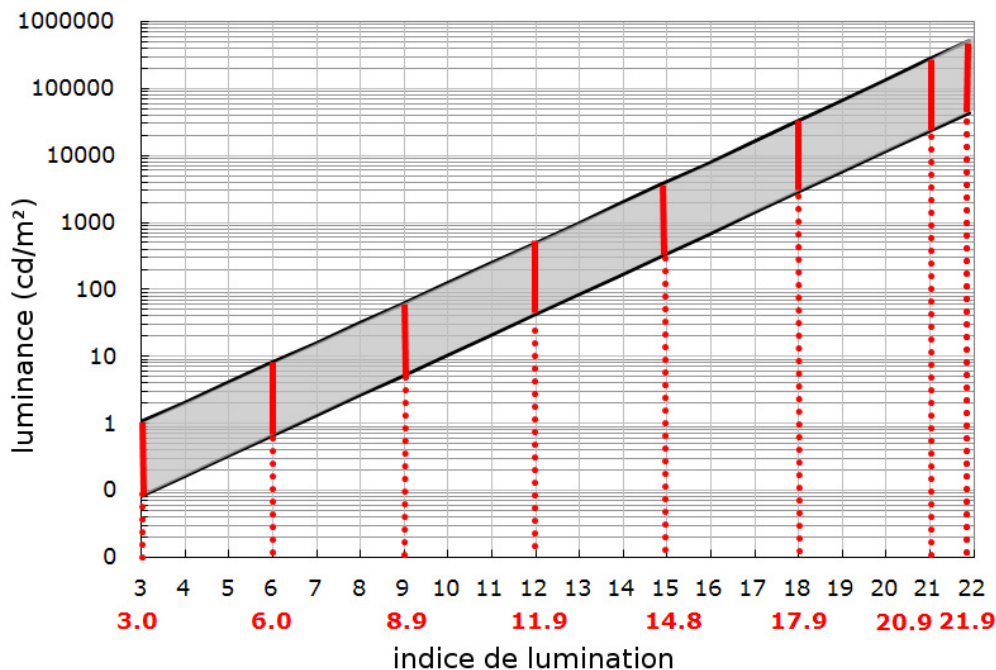


Figure III-7 : Gamme de luminances mesurable par le Canon EOS 50D #2060709339

Les cartes de luminances peuvent être générées à l'aide du logiciel PHOTOLUX (D Dumortier, Coutelier, Faulcon, et Roy, 2005) développé par le Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB).

Éclairiments lumineux à la surface des façades

Les éclairiments lumineux permettent d'évaluer la répartition de la lumière sur les façades du canyon et d'estimer ensuite la disponibilité de la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments. Ils seront mesurés directement en quelques points à l'aide de sondes photométriques. Ces mesures seront comparées aux valeurs obtenues à partir de simulations. Elles serviront aussi de valeurs de référence pour évaluer une méthode permettant de produire des cartes des éclairiments lumineux sur les façades, à partir des cartes de luminances des façades générées par les photographies HDR.

Ces trois paramètres jouent un rôle sur la disponibilité de la lumière à l'intérieur d'un canyon urbain, ou permettent de la quantifier. La section suivante décrit comment nous avons effectué les mesures dans les rues qui ont été sélectionnées.

III.1.3. Protocole de mesure

Ce chapitre permet de constituer une base de données de mesures *in situ* permettant de valider les logiciels de simulation. Les profils d'éclairiment sur les façades sont mesurés puis complétés par une cartographie des luminances de la façade à partir de laquelle nous génèrerons une cartographie des éclairiments sur les façades. Les facteurs de réflexion lumineux des façades ont été mesurés lors d'une autre campagne de mesures (cf. section III.1.5.1).

L'éclairiment lumineux peut être mesuré directement à l'aide d'un luxmètre. Dans notre étude, des sondes photométriques LI-COR LI-210 ont été utilisées (cf. Figure III-50, page 205). Il s'agit de petits capteurs, d'une surface sensible de 0,5 cm², permettant d'effectuer des mesures en un point. Ces sondes sont équipées d'un fil suffisamment long pour pouvoir les placer de manière à réduire l'influence de la personne qui mesure, contrairement à un luxmètre portable. Il est possible de connecter plusieurs de ces sondes à un système d'acquisition afin d'obtenir les éclairiments à différents endroits au même moment. Les cartes de luminances mentionnées dans la section précédente ont été générées à partir de photos. Ces photos ont été prises avec un appareil photo numérique Canon EOS 50D équipé d'un objectif fisheye Sigma 4,5 f/2,8, ce type d'optique sera décrit en détail dans la section III.2.2.2.

Les sondes photométriques ainsi que l'appareil photo ont été montés sur un mât télescopique d'une hauteur de 5 mètres, visible sur la Figure III-8. L'appareil se trouve tout en haut du mât. Grâce à l'objectif fisheye, ayant un angle de vue de 180°, il est possible d'obtenir une image de toute la façade du bâtiment malgré le peu de recul de l'appareil. Les sondes sont réparties sur toute la hauteur du mât aux hauteurs décrites dans le Tableau III-1.

| Sonde | Hauteur |
|-------|---------|
| A | 5,43 m |
| B | 3,99 m |
| C | 2,59 m |
| D | 1,28 m |

Tableau III-1 : Hauteur des sondes placées sur le mât lors des mesures

Les sondes sont toutes reliées à un système d'acquisition LI-COR LI-1400 qui permet une lecture des valeurs d'éclairement en temps réel. Les valeurs sont actualisées toutes les secondes sur l'afficheur de l'appareil, mais correspondent à la moyenne glissante des 15 secondes précédentes. Cela permet d'éliminer le risque de mesurer un reflet ponctuel (ouverture d'une fenêtre, passage d'un véhicule). Ainsi lorsqu'un évènement susceptible de perturber les mesures a été détecté (passage d'un piéton, d'un camion), un temps d'attente supplémentaire de 15 secondes a été marqué après son passage.

L'appareil photo est quant à lui connecté par liaison USB à un ordinateur portable (cf. Figure III-8) sur lequel est installé le logiciel PHOTOLUX Shooter. Ce logiciel exploite les résultats de l'étalonnage pour décider du nombre de photos et des réglages nécessaires pour produire la carte de luminances la plus complète possible. Par exemple, nous avons vu dans le chapitre III.1 qu'il était préférable d'utiliser une seule ouverture de diaphragme pour toutes les photos d'une même prise de vue. PHOTOLUX fait intervenir deux réglages d'ouverture car une seule ne suffirait pas à couvrir la plage de 20 unités d'IL qui peut être nécessaire pour couvrir une gamme de luminances allant de quelques cd/m^2 à plusieurs centaines de milliers de cd/m^2 . Pour une rue donnée, un marquage préalable au sol est réalisé à la craie tous les 10 mètres, cela permet de repérer la position dans la rue. La rue est ensuite parcourue en alternant chaque côté. Les sondes mesurent les éclaircissements à 30 cm de la façade se trouvant du même côté, alors que les photos prises au même moment servent à obtenir les éclaircissements de la façade se trouvant de l'autre côté. En passant rapidement d'un côté à l'autre, l'intervalle de temps est réduit. Cela permet de minimiser le risque de changement de conditions climatiques (nuage par exemple) entre les deux mesures servant à caractériser la même façade.

Cependant, il a tout de même été nécessaire d'attendre, pour certaines mesures, le passage d'un nuage entre deux mesures afin d'obtenir des données cohérentes entre les deux types d'instruments. De même, de courtes pauses ont dû être observées afin de laisser passer un piéton ou un véhicule qui aurait pu masquer la sonde la plus basse. Les véhicules et notamment les camions, peuvent en effet causer une obstruction à une ou plusieurs sondes. Ils peuvent aussi perturber les mesures des sondes les plus hautes, car leur carrosserie possède un facteur de réflexion lumineux plus élevé que celui de la chaussée.

Le mât est léger, ce qui permet de le manipuler facilement du fait de la contrainte mécanique que représente l'appareil photo avec un bras de levier de 5 mètres. Un niveau à bulle fixé sur le mât permet de régler l'horizontalité vers le bas de celui-ci mais il n'est pas possible d'agir à tous les niveaux. Le contrecoup de cette légèreté est un manque de rigidité qui a occasionné un déplacement de l'appareil de quelques centimètres produisant ainsi des images avec une déviation de quelques degrés par rapport à la verticale. Cette déviation est différente d'une série d'image à une autre.

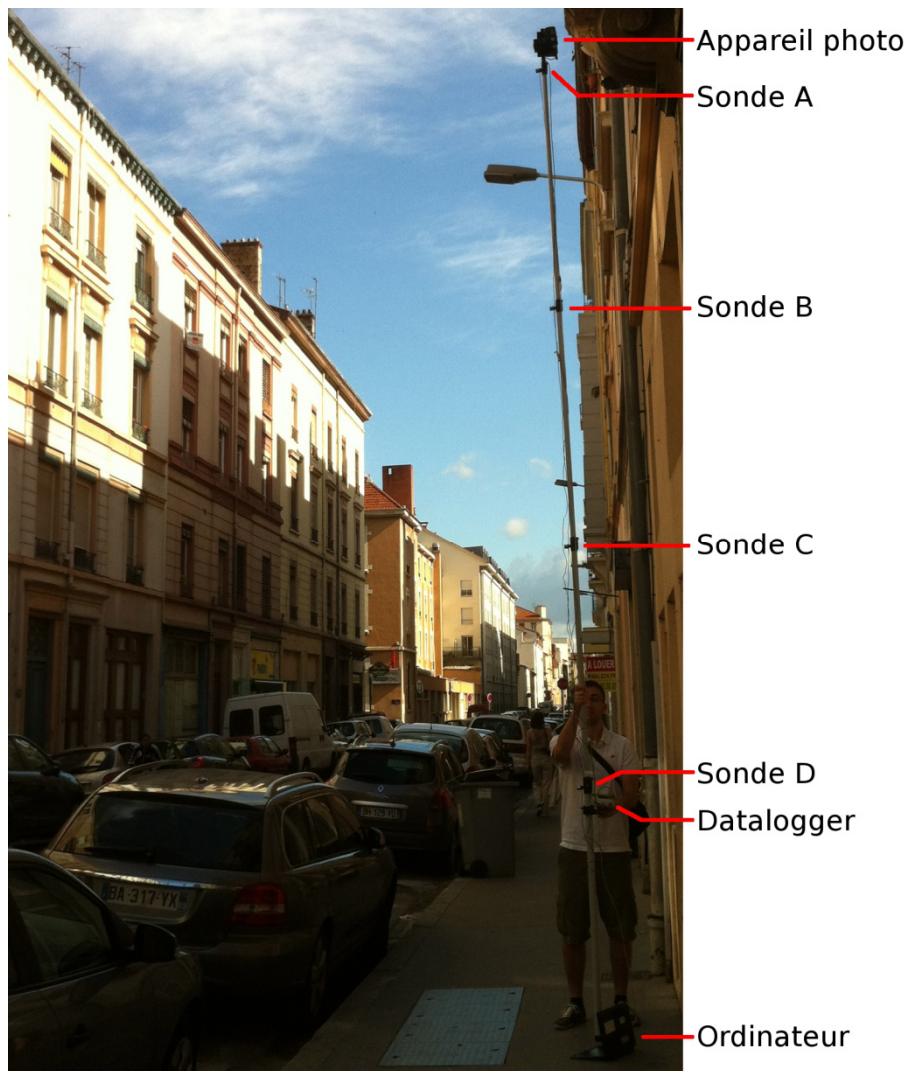


Figure III-8 : Photographie du mât sur lequel sont montés les instruments de mesure. Durant la mesure, celui qui tient le mât se place derrière pour ne pas cacher de sonde

Les mesures ont été effectuées durant des jours de ciels peu nuageux comme le montre la Figure III-9. Sur ce graphique, les types de ciels CIE (cf. section II.3.4) numérotés de 1 à 15 sont découpés en 3 parties pour simplifier la représentation. Il y a les ciels couverts (de 1 à 5), les ciels intermédiaires (de 6 à 10) et les ciels sans nuages (de 11 à 15). Pour la rue des Charmettes, bien que la journée ait présenté une forte proportion de ciels nuageux à couverts, les mesures ont été effectuées à des moments où le soleil n'était pas caché. La modélisation d'un ciel couvert est plus facile à réaliser mais ne permet pas d'obtenir des informations sur des situations pour lesquelles le soleil éclaire directement l'une des façades. Il y a eu au total 153 points de mesure répartis sur toutes les rues avec un temps moyen de 2,5 minutes entre chaque mesure (avec un écart type de 1,3 minute).

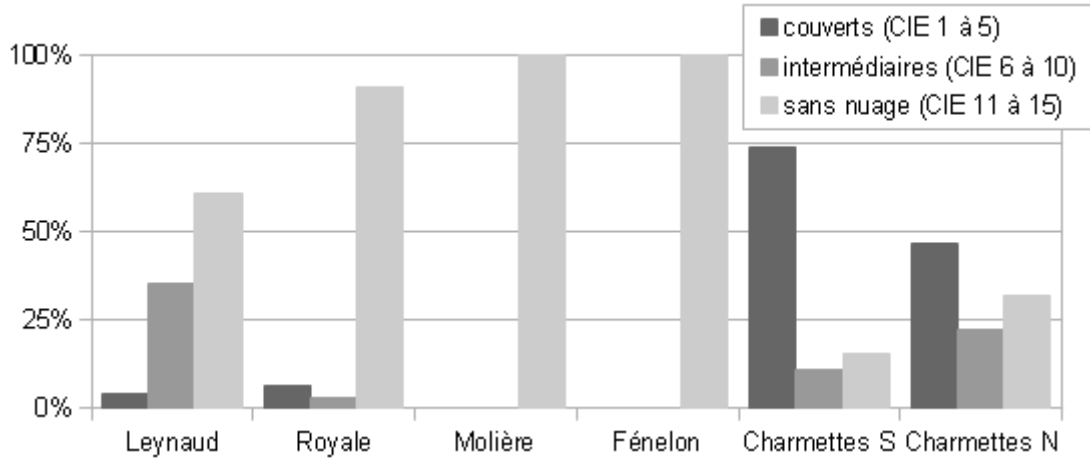


Figure III-9 : Distribution des types de ciel pour les trois journées de mesure sur site

Nous avons donc mis en place un dispositif expérimental permettant de mesurer tous les 10 m dans une rue, les éclairagements en 4 points de la façade, jusqu'à une hauteur de 5 m, et de mesurer les luminances de la façade. Le temps nécessaire pour effectuer les mesures des deux côtés de la rue (environ 3 minutes) peut difficilement être réduit, il est donc à prévoir que le mouvement du soleil entraîne des difficultés dans l'analyse *a posteriori* des mesures.

Nous allons décrire les différents paramètres qui caractérisent les rues, et qui nous intéressent pour les simulations comme le facteur de réflexion lumineux des façades ou le taux de vitrage.

III.1.4. Caractérisation de la géométrie des rues

La géométrie de la rue représente un ensemble de propriétés dont les variations sont connues pour influencer sur la quantité d'énergie reçue par les façades. C'est un paramètre important car il a une influence directe sur la pénétration de la lumière à l'intérieur de la rue, c'est aussi celui qui offre le moins de choix. En effet, nous avons vu dans la section précédente que sur Lyon, les zones présentant des canyons avec un rapport d'aspect élevé (en violet sur la Figure III-3), étaient réduites. De même, nous avons vu qu'il pouvait être difficile d'obtenir toutes les orientations souhaitées au sein d'une ville.

La largeur des bâtiments a été mesurée sur site à l'aide d'un télémètre laser (LEICA D3a, précision de l'ordre du millimètre). Ces mesures ont pu être comparées à des mesures effectuées sur différentes sources de données cartographiques publiques. Les longueurs ont été collectées sur les produits Google Earth, Geoportail et Mappy (cf. chapitre II.1). La Figure III-10 présente les écarts relatifs entre les longueurs des façades du côté Est de la rue Royale à Lyon pour chaque source de donnée.

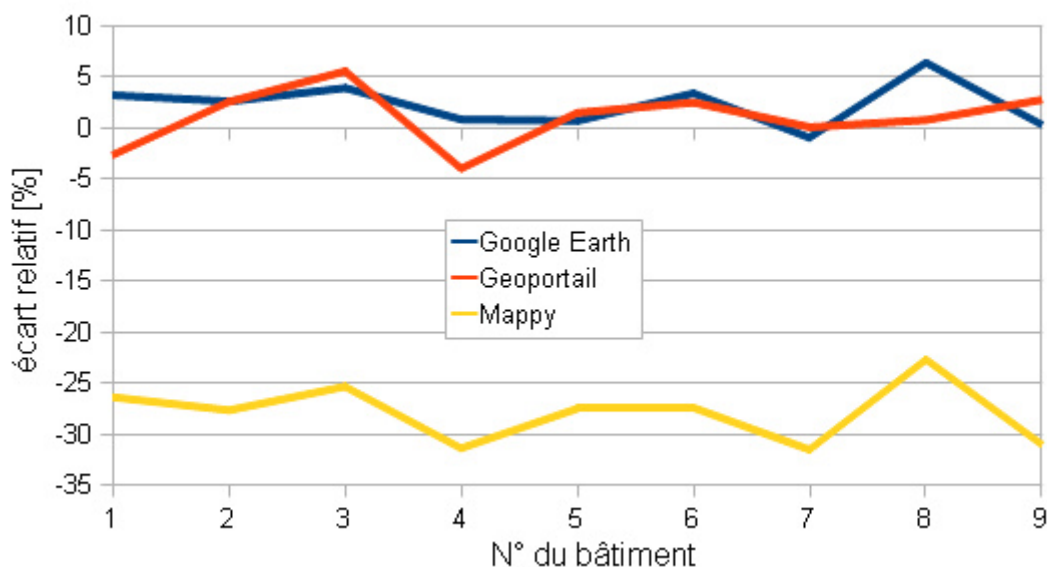


Figure III-10 : Comparaison des mesures de longueurs de façades pour 3 sources de données par rapport aux mesures sur le terrain

La corrélation avec les mesures sur le terrain est bonne pour Google Earth comme pour Geoportail, l'écart relatif est toujours inférieur à $\pm 7\%$ (soit un écart absolu inférieur à 1 m). En revanche, Mappy présente un écart relatif moyen de -28% . Cette différence s'explique surtout par les méthodes qui ont été employées pour calculer les distances. Les deux premiers produits disposent d'outils de mesure intégrés à leur interface graphique alors que le dernier n'en possède pas, la seule information disponible étant l'échelle de la carte. Ainsi, pour mesurer les distances à partir de Mappy, la seule solution consiste à effectuer une capture d'écran et à mesurer à partir de l'image obtenue la longueur de l'échelle et les longueurs des bâtiments, puis à appliquer un rapport de proportionnalité. Ce traitement peut être effectué dans un outil de dessin vectoriel (par exemple Inkscape) ou dans tout autre logiciel qui permet d'importer une image et qui dispose d'un outil "règle". Cependant ce procédé demande une manipulation qui nécessite plus de temps que les autres et nécessite d'effectuer la mesure de l'échelle en plus de la mesure de la longueur de façade, ce qui augmente le risque d'erreur.

Même si la méthode la plus précise est la mesure sur le terrain, l'outil Google Earth permet d'obtenir les dimensions de la rue avec une bonne précision, et sans avoir à se rendre sur place.

III.1.5. Caractérisation des façades

Il existe autant de revêtements que de bâtiments, les façades sont définies à partir des normes de construction, des choix architecturaux et des lois en vigueur. De plus, l'érosion et la pollution agissent sur les propriétés des surfaces. Lorsqu'une rue est assimilable à un canyon, les façades qui la constituent sont relativement analogues car elles suivent des

directives imposées par le règlement de la ville, via le Plan Local d'Urbanisation (PLU) par exemple.

Les paramètres qui varient le plus souvent sont la couleur de l'enduit, la hauteur des étages, la dimension des ouvertures et la différence entre le rez-de-chaussée et les étages. En effet, on constate souvent que le bas d'un immeuble n'a pas le même aspect, c'est parce qu'on y trouve les entrées communes et souvent des commerces ou des entrées de garage. Le reste de la façade est quasiment assimilable à une texture qui se répète, comme le montre la Figure III-11. Cela peut être problématique pour la mesure du facteur de réflexion lumineux lorsqu'il ne peut être effectué qu'à hauteur d'homme.



Figure III-11 : Différence de revêtement entre le bas de l'immeuble et le reste de la façade, séparés par un trait rouge

III.1.5.1. Mesure des facteurs de réflexion lumineux

Le facteur de réflexion lumineux a été déduit des mesures du facteur de réflexion spectral effectuées à l'aide d'un spectromètre (cf. annexe C). Dans les cinq rues de référence, la différence de revêtement entre le rez-de-chaussée et le reste de la façade a été majoritairement constatée. La Figure III-11 montre un exemple dans lequel le premier étage possède le même revêtement que le rez-de-chaussée, mais pas le même que les autres étages. Google Street View nous a permis d'observer que cette différence se retrouvait dans différentes rues de Marseille et Nice, mais pas à Bordeaux ou Paris. À Lyon, le revêtement typique du rez-de-chaussée est un ensemble de blocs de roche calcaire. Ces blocs sont de couleur gris clair et sont présents sur une hauteur d'environ 5 mètres, à l'instar des façades visibles sur la Figure III-11. La quasi-totalité des façades possède une porte de garage ou une porte d'entrée avec une grande surface vitrée (boutique, bureaux). Pourtant les revêtements sur le reste des bâtiments sont différents, il s'agit d'enduits de couleur claire dans les tons orangés ou rosés, éventuellement blanc cassés. Chaque bâtiment de la rue possède une couleur différente. La seule mesure qui a pu être techniquement effectuée à

l'aide du spectromètre (méthode appliquée à hauteur d'homme) a été celle des murs disponibles au rez-de-chaussée, donc la plupart du temps sur un revêtement qui n'est pas représentatif de la façade entière. La Figure III-12 représente la distribution en fréquence des facteurs de réflexion lumineuse par tranche de 5% pour les 68 façades, des cinq rues, sur lesquelles ils ont été mesurés. À l'exception des valeurs extrêmes, c'est à dire au-delà de 80% ou en dessous de 20%, la fréquence d'apparition est quasiment identique. Des valeurs équivalentes ont été mesurées au sein d'une même rue.

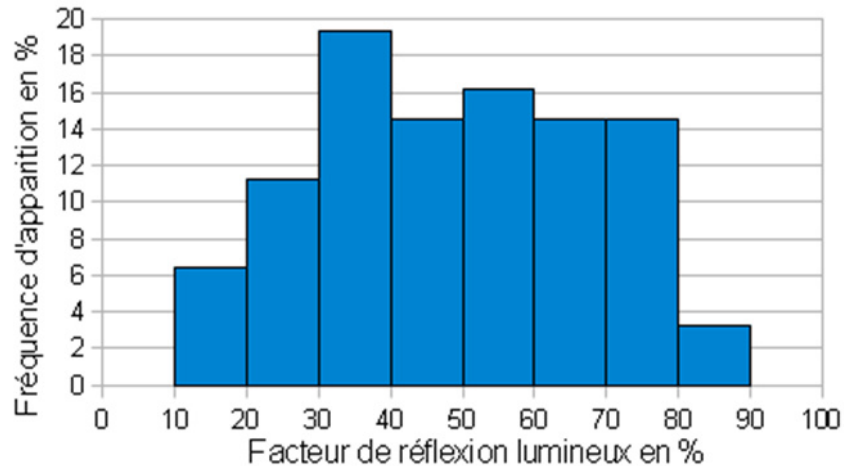


Figure III-12 : Distribution en fréquence des facteurs de réflexion lumineuse mesurés dans les rues de Lyon

Dans chacune des rues, le même type de distribution peut être observé, il n'y a pas une rue avec des façades toutes claires ou toutes foncées. Sur notre échantillon, chaque rue possède une large gamme de facteurs de réflexion de façades. Cela implique qu'il n'est pas possible de définir une valeur unique pour caractériser les façades d'une rue, d'un quartier et encore moins d'une ville. Dans une étude plus ancienne rapportant des mesures de facteur de réflexion énergétique de matériaux de façades, des valeurs comprises entre 10% et 75% avaient été mesurées (Reagan et Acklam, 1979). Même s'il ne s'agit pas du même facteur de réflexion, la gamme de valeurs était large également.

Pourtant, il est courant d'utiliser une valeur fixe dans les études qui ont pour but d'estimer la quantité de lumière ou d'énergie solaire disponible en milieu urbain. Brotas et Wilson utilisent une valeur de 20% pour le sol et les façades pour effectuer des simulations de lumière du jour dans un canyon avec RADIANCE (Brotas et Wilson, 2006). Li *et al.* utilisent aussi 20% pour les façades de bâtiments dans des simulations avec Citysim (D. Li *et al.*, 2012). Bozonnet *et al.* utilisent une valeur de 80% pour le sol et les façades avec le logiciel Solene (Emmanuel Bozonnet, Belarbi, et Allard, 2005). Ces choix se justifient par la nécessité de simplifier la description de la rue de manière à réduire le temps de calcul ainsi que par la difficulté à se déplacer sur le terrain et à mesurer les facteurs de réflexion de toutes les façades d'une rue. Comme le montrent nos mesures, il n'y a pas vraiment de valeur représentative. L'utilisation d'une valeur constante a donc un impact sur la qualité de la modélisation.

Le facteur de réflexion lumineux de la chaussée de la rue a aussi été mesuré. En effet, nous avons vu dans la section I.3.2, que dans un canyon urbain, la contribution du sol sur l'éclairement lumineux des façades n'est pas négligeable. Dans les cinq rues de référence, la valeur moyenne obtenue est de 10,3% avec des valeurs allant de 6% à 15%. Comme nous l'avons vu précédemment, la majorité des études considèrent un facteur de réflexion lumineux de 20% pour la chaussée. Cette valeur usuelle n'est donc pas représentative des revêtements rencontrés dans les rues de Lyon. Des campagnes de mesures du facteur de réflexion lumineux à grande échelle, pour une ville ou plusieurs villes, permettraient d'obtenir la distribution des valeurs possibles sur un plus grand nombre de cas que ce que nous avons pu faire. Si elle est pratique, l'utilisation d'un facteur de réflexion unique pour le sol ou pour les façades semble, comme pour les façades, non représentative de la réalité.

III.1.5.2. Évaluation du taux de vitrage

La surface totale des ouvertures de la façade d'un bâtiment constitue un paramètre remarquable de sa morphologie qui a une influence évidente sur l'accès à la lumière du jour dans les pièces, mais aussi sur le comportement thermique du bâtiment (cf. sections I.2.3.2 et I.3.2). Il est possible de calculer le taux de vitrage à partir des dimensions des fenêtres. Pour simplifier la tâche, il faut supposer que toutes les fenêtres sont de même taille, ce qui reste probable au sein d'un même bâtiment. Le taux de vitrage pour une façade se calcule alors aisément à l'aide de l'équation suivante :

$$WWR = \frac{(nbFen\hat{e}treX \times nbFen\hat{e}treY) \times (H_{fen\hat{e}tre} \times L_{fen\hat{e}tre})}{H_{fa\hat{c}ade} \times L_{fa\hat{c}ade}} \quad (III-2)$$

Méthode de mesure

Des mesures ont été effectuées pour déterminer les dimensions des fenêtres dans les rues de référence. Étant donné que la majorité des fenêtres se trouvent au-dessus du rez-de-chaussée, une méthode basée sur des mesures avec un télémètre laser LEICA D3a (précision revendiquée par le fournisseur de l'ordre du millimètre) a été mise en œuvre pour effectuer un grand nombre de mesures. La Figure III-13 schématise les deux procédés qui ont été utilisés.

Le détail de la méthode est décrit dans l'annexe H, son application est possible seulement si le télémètre dispose d'un inclinomètre intégré, ce qui est le cas du modèle utilisé. À gauche de la Figure III-14 se trouve la distribution des rapports entre la largeur et la hauteur des fenêtres qui ont été mesurées. Lorsque la valeur de ce rapport est inférieure à 1, cela signifie que la fenêtre est plus haute que large, ce qui est systématiquement le cas. L'histogramme montre que dans 85% des cas, ce rapport est compris entre 0,4 et 0,7. La partie droite de la Figure III-14 montre la distribution des largeurs de fenêtres pour les fenêtres dont le rapport largeur/hauteur est compris entre 0,4 et 0,7 (soit la majorité des cas).

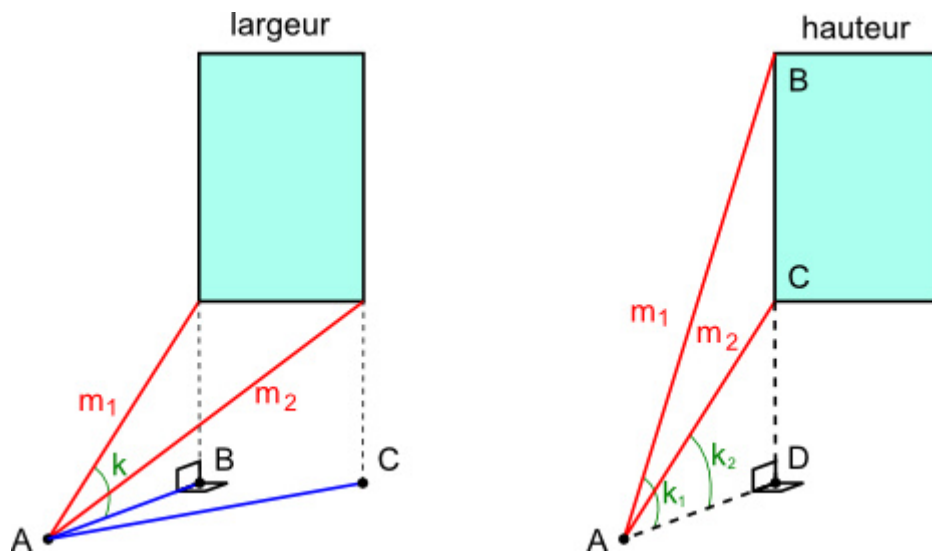


Figure III-13 : Schéma des méthodes permettant de mesurer la largeur (à gauche) et la hauteur (à droite) d'une fenêtre à l'aide d'un télémètre

La largeur de ces fenêtres est comprise entre 0,8 m et 1,1 m dans 80% des cas. Ces dimensions ne peuvent être utilisées seules car il existe un grand nombre de proportions et de dimensions différentes, cette hétérogénéité provient de l'architecture des bâtiments qui varie en fonction de l'époque de construction et des choix architecturaux. Il n'existe pas vraiment de standard en matière de dimensions de fenêtres. Dans ce cas et dans l'analyse des échanges radiatifs dans un canyon urbain, il est plus pertinent d'utiliser ces dimensions pour calculer le taux de vitrage.

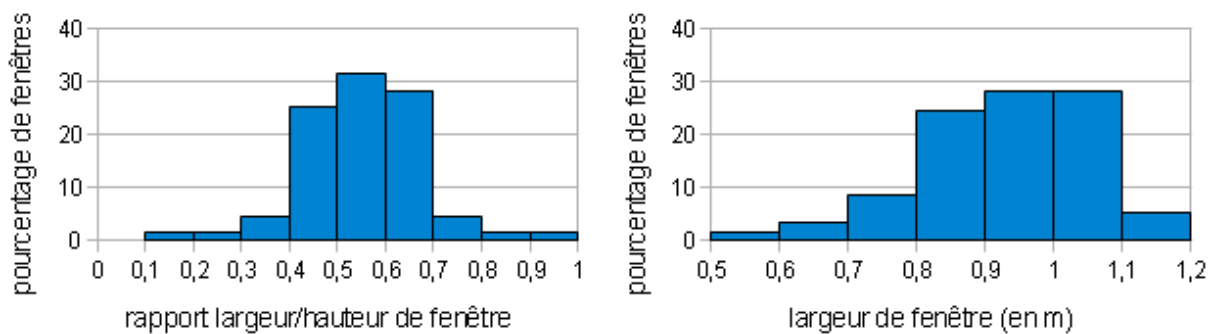


Figure III-14 : Distribution des valeurs mesurées du rapport largeur/hauteur (à gauche) et des valeurs de largeur (à droite) de 68 fenêtres dans les rues sélectionnées

Le calcul du taux de vitrage a été effectué à partir des données des 68 bâtiments dont une fenêtre représentative a été mesurée systématiquement. La quantité de fenêtres pour chaque bâtiment a été déterminée au moment de la mesure. Les résultats sont visibles sur la Figure III-15 pour les cinq rues de référence. Le taux de vitrage moyen est de 22,6% avec des valeurs allant de 12% à 37%. La méthode LT (cf. section II.4.2) appliquée au milieu urbain a permis de calculer un taux de vitrage optimal (par rapport à la consommation d'énergie pour l'éclairage, le chauffage, la climatisation et la ventilation) variant de 20% à 55% pour des échantillons de centre-ville de Londres, Toulouse et Berlin. La plage de valeurs mesurées est légèrement inférieure à cette plage de valeurs optimales.

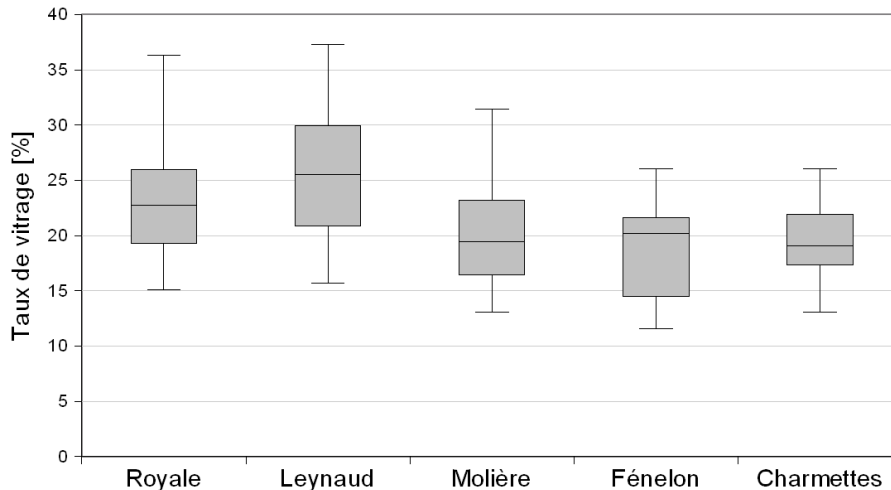


Figure III-15 : Taux de vitrage calculés à partir des mesures pour chacune des rues

Discussion de la méthode de mesure

Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode sont discutables car la précision de la mesure est incertaine, le télémètre est situé à environ 10 mètres de la fenêtre, le moindre mouvement de la part de la personne qui prend la mesure peut faire varier fortement le résultat. D'autant qu'il faut appuyer sur un bouton pour mesurer, ce qui fait bouger l'appareil à l'instar du "flou de bougé" d'un appareil photo. Ce terme correspond à un flou observé sur le cliché résultant d'un mouvement de l'appareil pendant l'exposition. Au moment de prendre la mesure, il est ainsi possible de voir le point rouge du laser sur le mur osciller fortement dans toutes les directions si l'appareil est tenu dans les mains. Sachant qu'il faut au moins prendre 4 mesures pour obtenir la surface de la fenêtre, la somme des erreurs peut rapidement devenir gênante. L'utilisation d'un trépied permet cependant de réduire fortement cet effet et se révèle indispensable mais implique une augmentation du temps de mesure pour une rue entière.

Afin de juger de la qualité de cette méthode, des mesures ont été effectuées à l'aide d'un mètre à ruban sur une fenêtre située à hauteur d'homme sur une façade de bâtiment dont toutes les fenêtres sont identiques (14 rue Rhin et Danube). Une mesure au télémètre donne des valeurs identiques, en l'utilisant depuis l'intérieur de l'encadrement de la fenêtre, soit une largeur de 119 cm et une hauteur de 204 cm. Cela confirme la précision donnée du fabricant qui est de l'ordre de 1 mm. Les dimensions de la fenêtre du premier étage ont été mesurées à l'aide des méthodes décrites précédemment à une distance de 14 m du mur, puis à une distance de 4 m, afin d'évaluer l'influence de la position de l'appareil sur la précision des mesures. À 14 m, la largeur obtenue est de 97 cm et la hauteur de 212 cm. À 4 m, la largeur obtenue est de 130 cm et la hauteur de 213 cm. Les valeurs obtenues traduisent une incertitude élevée. En effet, l'écart relatif pour la largeur à 14 m est de -18,5% et de +9,3% à 4 m. Non seulement l'écart est important, mais le signe est différent entre les deux valeurs. Cela est dû à la difficulté de maintenir l'appareil stable au moment de la mesure, d'autant que plus la distance de mesure est grande, plus le point de mesure réel est

susceptible d'être éloigné du point de mesure souhaité. Pour la hauteur, les valeurs sont quasiment identiques mais avec un écart relatif d'environ 4%. L'erreur est plus importante pour le calcul de la largeur, cela peut provenir de l'utilisation de l'inclinomètre dont la précision est de $\pm 0,3\%$. Cela implique qu'à 14 m, la mesure est précise à $\pm 0,7$ cm, soit un écart maximal de près de 3 cm sur la largeur en considérant une distance mesurée de 1,2 m. Cet écart est ramené à 0,9 cm à une distance de 4 m.

D'après ce que nous venons de voir, on peut estimer que cette méthode de mesures nous donne les dimensions des fenêtres avec une précision de $\pm 20\%$, ce qui est assez élevé. Toutefois, les valeurs de WWR obtenues se trouvent dans un ordre de grandeur cohérent. Étant donné que le rez-de-chaussée présente des parties vitrées non représentatives du reste de la façade (vitrines, fenêtres condamnées), il n'a pas été pris en compte. La hauteur considérée pour le calcul du WWR de la façade s'étend du premier étage au toit.

La méthode la plus fiable consiste à mesurer directement au mètre à ruban les dimensions des fenêtres. Mais elle est compliquée à mettre en œuvre : il faut pouvoir disposer d'une grande échelle dans une rue, avec un trottoir éventuellement étroit, ne permettant pas d'avoir le recul suffisant pour effectuer les mesures. Il faut pouvoir monter assez haut (au-delà de 5 m), car au moins à Lyon, les façades des bâtiments présentent des caractéristiques différentes entre premiers étages et les étages supérieurs. Enfin, le fait de se trouver, pour la mesure, face à la fenêtre d'un habitant constitue une violation du droit à l'intimité (article 9 du code civil français).

Méthode graphique

Une autre méthode a donc été mise en place afin de calculer le taux de vitrage plus facilement et avec une plus grande précision. Celle-ci est basée sur des photographies des façades prises depuis le trottoir à hauteur d'homme. Une fois validée, elle pourrait être utilisée en ligne avec un produit de type Google Street View pour obtenir le taux de vitrage, pour n'importe quelle rue, sans avoir à s'y rendre physiquement.

La méthode consiste à prendre une photographie de la façade (étape 1) depuis le côté opposé de la rue sur le trottoir, à hauteur d'homme. La photo est ensuite importée dans un logiciel de traitement d'images dans lequel elle constitue un calque. Le logiciel Gimp (GIMP, 2004) a été utilisé, il a l'avantage d'être gratuit. Un traitement manuel de l'image est ensuite effectué pour extraire la façade en question (étape 2). Ce type de logiciel permet généralement de créer des masques sur lesquels on peut effectuer des modifications. Dans notre cas, le masque est créé à partir du contour de la façade avec l'outil "lasso polygonal". La perspective due à la position en contrebas de l'appareil photo est ensuite corrigée (étape 3). Cela est possible car Gimp offre la possibilité d'effectuer des transformations géométriques sur les calques. L'image est donc déformée manuellement dans le but de mettre à l'horizontal les côtés haut et bas et à la verticale les côtés droite et gauche. La déformation peut être réduite si la photo est prise avec un objectif grand angle (pas de fisheye) et en maintenant l'appareil le plus horizontal et le plus haut possible. Une fois que les côtés haut/bas et droite/gauche des fenêtres sont tous parallèles, les fenêtres sont détournées et coloriées à la main à l'aide d'un outil du type "pot de peinture" (étape 4). La Figure III-16 illustre les 4 étapes du traitement de l'image.

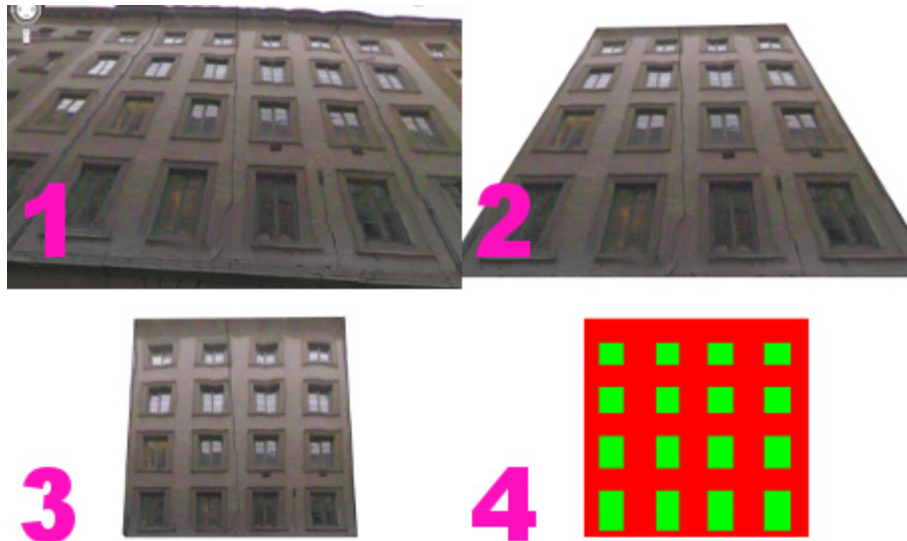


Figure III-16 : Étapes du calcul du taux de vitrage à partir d'une photographie

Un programme informatique a été développé pour exploiter l'image résultant du traitement manuel. Il compte le nombre de pixels de la couleur représentant les fenêtres et le nombre de pixels de la couleur représentant les parties opaques de la façade. Le taux de vitrage est le rapport entre le nombre de pixels fenêtre et le nombre total de pixels de l'image. Le reste de la façade a été colorié pour pouvoir apprécier visuellement les proportions après déformation de l'image et aussi pour vérifier que la somme des deux ensembles de pixels est égale au nombre total de pixels de l'image. Cela permet d'être sûr qu'une erreur n'a pas été commise lors de la coloration. Les résultats obtenus pour les 9 façades, choisies dans les rues de référence, sont présentés dans le Tableau III-2. Ces façades ont été considérées comme représentatives des autres façades. La moyenne des valeurs est de 31%.

| Bâtiment | Taux de vitrage |
|------------------|-----------------|
| N°25 rue Royale | 17 % |
| N°19 rue Royale | 25 % |
| N°37 rue Leynaud | 25 % |
| N°13 rue Royale | 27 % |
| N°31 rue Royale | 33 % |
| N°2 rue Fénelon | 33 % |
| N°51 rue Molière | 34 % |
| N°3 rue Fénelon | 39 % |
| N°35 rue Leynaud | 47 % |

Tableau III-2 : Taux de vitrage calculé à partir de la méthode photographique

Sur la Figure III-16 la déformation trapézoïdale est très importante, l'erreur produite en considérant un étage supérieur doit être évaluée. La projection induit une perte des proportions lesquelles sont directement liées au calcul du ratio. Pour deux rues d'environ 20 m de large avec un rapport H/W=1, l'écart est de -2% pour l'une et +4% pour l'autre si tous les niveaux sont utilisés au lieu du premier uniquement. Pour une rue plus étroite avec un H/W=3 pour une largeur de voie de 8 m, l'écart est de -28%. Ces résultats indiquent bien que plus la déformation est importante, plus l'erreur est grande.

Bien que le premier étage présente une déformation moindre par rapport aux autres niveaux, il existe certainement une erreur par rapport à une photo qui serait faite perpendiculairement à la surface au niveau des fenêtres. Cette vérification a pu être effectuée en trouvant une façade représentative de celles qui ont déjà subi le calcul à l'aide de la méthode photographique. La distance qui permet de considérer que la photo a été prise à la perpendiculaire de la façade a pu être prise le long des quais du Rhône, en effet le bâtiment considéré se trouve à environ 40 m des bords du fleuve et ce sans obstruction. Une photo a été prise à 3 distances de la façade : 40 m, 15 m et 5 m. La méthode a été appliquée sur chacun des clichés pour le premier étage seulement, la valeur du taux de vitrage calculé est respectivement de 25,2%, 24,7% et 24,5%. Ces résultats confirment la tendance observée au paragraphe précédent, c'est-à-dire que plus la déformation est grande, plus le taux de vitrage est sous-estimé. Cela s'explique aussi par le fait que : plus la photo est prise près du bâtiment, moins les fenêtres deviennent visibles du fait qu'elles sont en retrait par rapport à la façade : cette visibilité se perd d'autant plus rapidement que les fenêtres sont situées en hauteur. Cependant l'écart de 0,7% entre la photographie optimale et celle dans les mêmes conditions que dans les rues étroites est tout à fait acceptable.

Quoiqu'il en soit, pour minimiser la déformation de l'image, il vaut mieux se contenter de cadrer la photographie pour ne voir que les fenêtres du premier étage (premier niveau au-dessus du rez-de-chaussée). Or, nous avons vu que ces dernières pouvaient être différentes de celles du reste de la façade. Il se peut donc qu'une erreur soit commise à ce niveau. C'est pourquoi les bâtiments qui ont été choisis pour représenter le taux de vitrage moyen qui caractérise les façades des bâtiments des rues sélectionnées ont la propriété d'avoir des fenêtres identiques entre le premier étage et les autres.

Validation de la méthode

Cette méthode a été évaluée de la même façon que celle basée sur les mesures avec un télémètre, c'est-à-dire en confrontant les valeurs obtenues avec les valeurs mesurées pour un bâtiment situé dans une autre rue (14 rue Rhin et Danube) qui a l'avantage d'avoir toutes ses fenêtres identiques, y compris au rez-de-chaussée. Les dimensions ont pu être mesurées au télémètre laser et au mètre à ruban et ont été présentés quelques paragraphes plus haut. Le taux de vitrage calculé à l'aide de l'équation (III-2) et des mesures prises au mètre à ruban est de 17,6%. Le taux de vitrage obtenu à partir de la méthode graphique avec une photo prise à 14 m est de 18,3% soit un écart relatif de 4% ce qui est tout à fait acceptable.

Utilisation de données disponibles en ligne

En France comme dans de nombreux pays du monde, il est possible de naviguer virtuellement à l'intérieur des rues d'un grand nombre de villes grâce aux services Street View de Google et UrbanDive de Mappy. Il s'agit de services proposés gratuitement en ligne dont les données ont été collectées à l'aide d'un ensemble d'appareils photos montés sur le toit d'un véhicule en mouvement. Google est le précurseur dans le domaine avec son service Street View et couvre la plupart des villes et villages ainsi que la plupart des routes.

La Figure III-17 montre la photo d'une façade de la rue Royale prise avec un appareil photo numérique de moyenne gamme depuis le trottoir d'en face, et la même façade telle qu'il est possible de la voir dans Street View. La perspective de la photo Street

View est plus plongeante car les appareils étant sur le toit d'une voiture, ils se trouvent au milieu de la rue soit à une distance deux fois moins grande. Si nous avons vu que la distance pouvait avoir une influence moindre sur le taux de vitrage calculé, il existe une distance à partir de laquelle la valeur va chuter rapidement du fait du manque de visibilité des fenêtres qui se trouvent en retrait par rapport à la façade. D'autre part, les images de Street View ayant vocation à être utilisées pour la navigation en ligne, elles sont toutes liées les unes aux autres afin qu'il y ait une continuité, pour cela les images ont subi une déformation supplémentaire.



Figure III-17 : Photographie d'une façade avec un petit appareil photo numérique (en haut) et vue de la même façade proposée par Google Street View (en bas)

Le résultat peut donc être mauvais comme le montre la photo de la Figure III-17 dans laquelle les fenêtres du premier étage présentent un cisaillement correspondant au passage d'une image à l'autre. Ce type de déformation est gênant dans le cas du calcul du WWR car il devient difficile de déterminer les contours des fenêtres. De plus, les étages supérieurs présentent une ondulation qui fait que les côtés des fenêtres ne sont pas rectilignes. Enfin, il est difficile d'obtenir une image située juste au milieu de la façade, le pas de temps auquel les photos sont prises ne permet pas de cibler une façade en particulier. D'ailleurs, sur la photo, le bâtiment n'est pas centré, lorsque le véhicule sur lequel se trouvent les appareils photo est passé dans cette rue, seulement deux photos ont pu être prises, l'une avant que le véhicule ne soit devant la façade et l'autre après qu'il soit passé devant. C'est la deuxième

photo qui est visible sur la Figure III-17 car elle permet d'obtenir la déformation la moins importante. Dans ces conditions, la valeur de WWR obtenue à partir de la méthode graphique décrite précédemment risque d'être assez éloignée de la réalité. Pour en juger, les WWR obtenus à partir de ces deux images ont été calculés : 31,5% avec la photo prise par l'auteur contre 31,4% avec la photo Street View. La déformation important semble avoir un impact relativement faible sur le calcul du WWR selon la méthode proposée. Un grand nombre de comparaisons pourrait permettre de vérifier si ce résultat est statistiquement représentatif. Nous disposerions alors d'une méthode permettant d'obtenir des valeurs assez précises sans avoir à se déplacer sur le terrain.

La Figure III-18 montre une vue obtenue à partir de UrbanDive, l'équivalent de Street View proposé par Mappy. La qualité de l'image est nettement meilleure : il n'y a pas d'ondulations sur les étages supérieurs et le contour des fenêtres peut être distingué facilement car la photo est moins floue que celle de Street View. Le calcul du WWR avec la méthode graphique pourrait donner des résultats précis avec une telle image. Cependant, à l'instar de Street View, les images sont agencées entre elles afin de fournir un contenu permettant la navigation sans discontinuité. Ainsi, il est possible d'observer des anomalies liées à la qualité des algorithmes qui effectuent cette tâche, par exemple sur la photo, un ensemble de fenêtres situées à droite sont à cheval sur deux images avec une jonction qui entraîne une forte discontinuité de la façade. Cela n'implique pas nécessairement que l'image est inutilisable, mais qu'il est nécessaire de déterminer une règle permettant de délimiter le contour des fenêtres impactées. Enfin, si cette photo est relativement mieux centrée par rapport au bâtiment que celle de Street View, cela n'est pas intentionnel, mais dû au fait que la voiture était plus ou moins devant cette façade lors de l'un des déclenchements de photo effectués avec un pas de temps déterminé.



Figure III-18 : Même façade que sur la Figure III-17 donnée par UrbanDive de Mappy

Ces observations montrent qu'en l'état actuel des données disponibles, il est possible d'obtenir l'information du WWR pour n'importe quelle façade de bâtiment sans se déplacer sur le terrain. Le calcul du WWR basé sur les photos prises sur le terrain reste le plus précis, même s'il entraîne une erreur par rapport à des mesures effectuées au télémètre. Google a déjà utilisé trois générations de caméras pour mettre en place sa base de données Street View, cela implique des qualités d'images différentes en fonction du pays considéré, et de

la date à laquelle ont été capturées les images. Google prévoit de renouveler intégralement les données Street View à partir d'une quatrième génération d'appareils photo dotés d'une précision encore meilleure. L'évolution des capacités de stockage et des temps d'écriture des données numériques pourra permettre de réduire le pas de temps entre chaque cliché. De ce fait, les images de cette nouvelle génération Street View pourraient bien être utilisées pour déterminer le WWR avec suffisamment de précision.

La valeur moyenne des taux de vitrage obtenus à partir de la méthode graphique (Tableau III-2) a été retenue comme étant la valeur représentative des WWR dans les rues de référence. Cette valeur de 31% sera utilisée pour concevoir les façades de la maquette offrant une partie vitrée (cf. section III.2.1.3).

III.1.6. Détermination du facteur de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel (SVF) a été décrit dans la section I.3.4. Étant donné qu'il s'agit d'un indicateur de référence, ce dernier a été calculé pour les cinq rues dans lesquelles des mesures ont été effectuées. La méthode qui a été choisie est basée sur les équations d'une méthode analytique (Watson et Johnson, 1987). Cette méthode permet de calculer le facteur de vue du ciel en un point situé sur le sol, au milieu de la rue (*i.e.* transversalement et longitudinalement). L'influence de la présence de chaque bâtiment sur le SVF est calculée indépendamment. Le SVF résulte de la somme des influences de chacun des bâtiments. La Figure III-19 schématise une façade de bâtiment ainsi que les dimensions utilisées par cette méthode. Le quadrilatère formé par la façade d'un bâtiment est projeté sur la voûte céleste à partir du point situé au milieu de la rue. La méthode consiste à calculer le pourcentage de cette surface projetée par rapport à la surface totale de l'hémisphère.

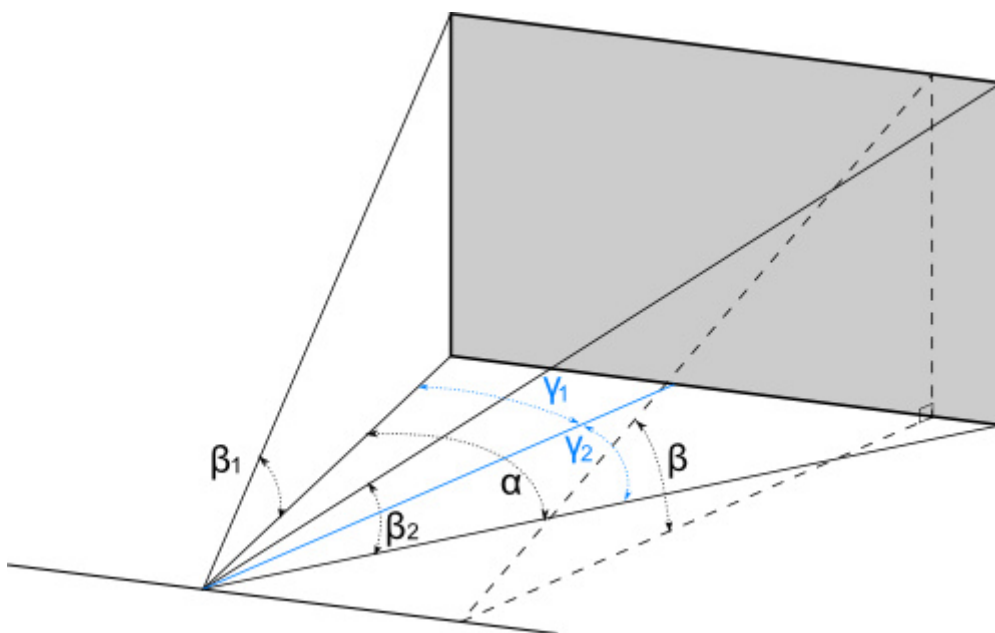


Figure III-19 : Schéma utilisé pour calculer le SVF d'une façade

Il est possible de calculer l'azimut γ des points P_1 et P_2 de la façon suivante :

$$\gamma_2 = \text{atan} \left(\frac{\tan \beta_1 - \tan \beta_2 \times \cos \alpha}{\tan \beta_2 \times \sin \alpha} \right) \quad (\text{III-3})$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 - \alpha$$

Il faut ensuite calculer l'angle β de l'élévation du mur par rapport à un point situé sur une ligne passant par le point de vue et perpendiculaire au mur :

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{\tan \beta_1}{\cos \gamma_1} \right) \quad (\text{III-4})$$

Il est ensuite possible de calculer l'influence de la présence du mur sur le SVF à l'aide de l'équation suivante :

$$\psi_w = \frac{1}{2\pi} ((\gamma_2 - \gamma_1) + \cos \beta \times [\text{atan}(\cos \beta \times \tan \gamma_1) - \text{atan}(\cos \beta \times \tan \gamma_2)]) \quad (\text{III-5})$$

Ce facteur de vue du mur doit être calculé pour chacun des n murs qui créent une obstruction au ciel, ainsi le SVF s'obtient à partir de la formule suivante :

$$SVF = 1 - \sum_{k=1}^n \psi_{w_k} \quad (\text{III-6})$$

Cette méthode peut donc être appliquée de façon simple en mesurant sur le terrain les hauteurs des bâtiments pour obtenir les angles β_1 et β_2 .

Ces angles peuvent aussi être obtenus à partir de photographies prises avec un objectif fisheye, qui couvre l'espace à 180°, et un léger traitement d'image effectué manuellement. Il existe en effet une correspondance entre l'angle d'un point dans la scène et le plan focal de l'appareil, et la distance du pixel correspondant sur l'image par rapport au centre de l'image (cf. section III.2.2.2). Ainsi, il est possible de pointer manuellement la position des coins supérieurs des bâtiments en coloriant le pixel leur correspondant dans une couleur qui n'existe pas sur la photo. La Figure III-20 montre la position des coins d'un bâtiment à repérer sur la photo de gauche. La surface occupée par le projeté de cette façade sur l'hémisphère est mise en évidence par l'image de droite.

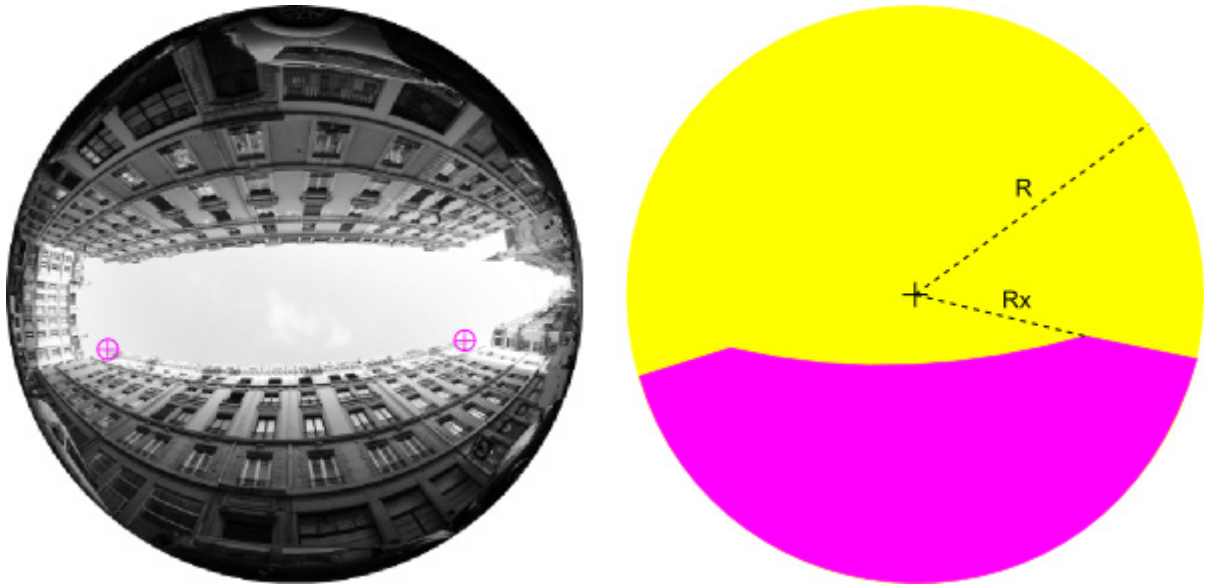


Figure III-20 : Repérage des coins d'un bâtiment à pointer (à gauche), et aperçu de la portion de ciel occultée par ce même bâtiment (en violet à droite)

Une fois que les points ont été repérés sur l'image, il suffit de calculer les angles β_x , à partir de l'équation (III-7).

$$\beta_x = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{R_x}{R} \right) \quad (III-7)$$

Avec R_x la distance en pixels du point x par rapport au centre, R le rayon de l'image, et β_x en radians. J'ai développé un programme en Java qui parcourt toute l'image selon un déplacement en coordonnées polaires dans un repère ayant pour origine le centre de l'image. Pour chaque angle de 0° à 360° , la couleur des pixels est analysée en partant du centre de l'image et en allant vers le bord. Lorsqu'un pixel violet est rencontré, la valeur de R_x peut être relevée. L'équation (III-7) considère que la projection effectuée par l'objectif est équidistante, or ça n'est pas forcément le cas selon l'objectif utilisé. En ignorant ce fait, une erreur est commise, pour l'éviter il faut intégrer la déformation spécifique de l'objectif dans l'équation (III-7), ce type d'opération est décrit dans l'annexe I et utilisé plus tard dans la section III.2.2.2.

Cette méthode de calcul du SVF a été utilisée car elle est simple à mettre en place, même si elle nécessite un repérage des points dans un logiciel de traitement d'image. Avec les autres techniques, il est souvent nécessaire d'effectuer un prétraitement manuel des photographies fisheye, comme consistant par exemple à déterminer la valeur seuil permettant de distinguer le ciel des bâtiments (Chapman et Thornes, 2004).

L'appareil photo a été monté sur un pied afin de contrôler au mieux son l'horizontalité, le pied a été choisi le plus petit possible (30 cm) afin de réduire l'erreur de calcul du SVF qui dépend de la hauteur à laquelle est prise la photo (Grimmond *et al.*, 2001), erreur d'autant plus grande que le canyon est étroit. Afin de pouvoir utiliser l'image pour déterminer les angles d'élévation des bâtiments, il est important que l'appareil soit

situé bien au centre de la rue. En effet, si l'appareil est situé trop près d'une façade, cette dernière sera considérée plus haute qu'elle ne l'est réellement et celle d'en face moins haute, ce qui va donc introduire une erreur dans le calcul du SVF. Cette contrainte est réelle car il est difficile de se situer exactement au centre de la rue, avec un appareil exactement à l'horizontal, lorsqu'il s'agit de prendre des photos entre deux passages de véhicules.

La Figure III-21 montre les photographies qui ont été utilisées pour calculer le SVF de chacune des rues. Un seul point de vue a été choisi pour chaque rue, de préférence le plus éloigné possible des intersections, et là où la hauteur des bâtiments est représentative du reste de la rue. Les images ont été converties en niveaux de gris pour pouvoir utiliser des couleurs pour définir les positions des points représentant les coins supérieurs des bâtiments.

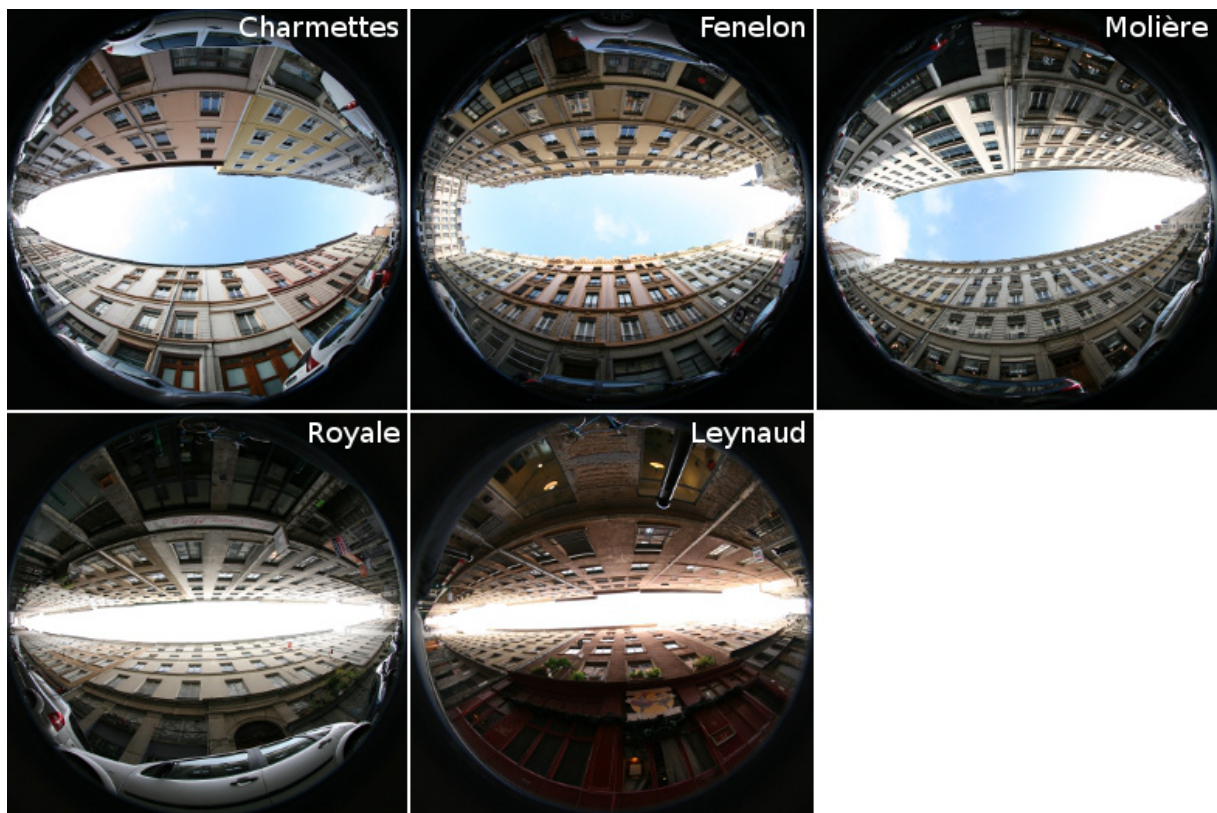


Figure III-21 : Photographies fisheye utilisées pour calculer le SVF de chaque rue

Le résultat des calculs de SVF à partir des photographies est visible dans le Tableau III-3 ainsi que la valeur du rapport d'aspect H/W mesuré à l'aide d'un télémètre laser pour chacune des rues de référence. Il est ainsi possible de constater que la valeur de SVF diminue avec l'augmentation du rapport d'aspect, ce qui est normal, plus la rue est étroite, moins le ciel est visible.

| Nom de la rue | SVF | H/W |
|---------------|------|-----|
| Charmettes | 0,36 | 1,2 |
| Fénelon | 0,32 | 1,4 |
| Molière | 0,27 | 1,4 |
| Royale | 0,14 | 3,0 |
| Leynaud | 0,06 | 3,5 |

Tableau III-3 : Valeurs de SVF calculées à partir des photos fisheye

La Figure III-22 montre la relation entre SVF et rapport d'aspect (H/W) pour les rues de référence. Les valeurs de SVF ont été obtenues à partir de la méthode photographique et de l'équation (I-9) (page 63). Cette équation, résultant d'un calcul mathématique, établit une relation entre le SVF et le rapport d'aspect pour un canyon de longueur infinie et dont tous les bâtiments sont de hauteur identique. La corrélation entre les valeurs obtenues par les deux méthodes semble plus forte pour les rapports d'aspect les plus faibles. Cette conclusion doit être relativisée par rapport au peu de données disponibles. Néanmoins, l'influence de la façade varie principalement avec le cosinus de l'angle β , lequel varie en fonction de la distance par rapport au centre de l'image selon l'équation (III-7). La variation de $\cos(\beta)$ augmente donc en se rapprochant du centre de l'image. Ainsi, plus la rue est étroite, plus le positionnement des points représentant les coins supérieurs des façades est critique. De même, le centrage de l'appareil est plus critique dans ces rues au rapport d'aspect élevé. D'une manière générale, les rues de référence sont géométriquement assez proches d'un canyon théorique : les bâtiments sont collés les uns aux autres avec une hauteur de façade qui varie peu. Si les photos avaient été prises aux intersections des rues ou avec des bâtiments de hauteurs très différentes, cette corrélation aurait été plus faible.

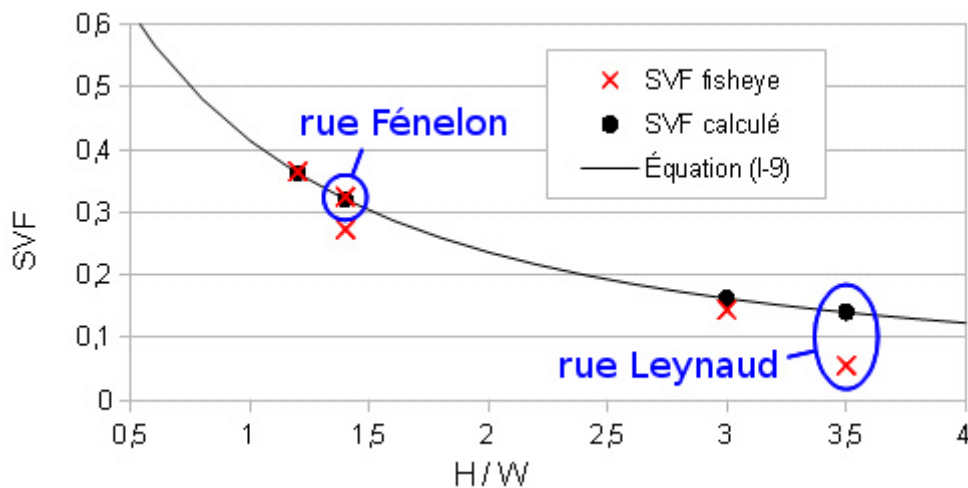


Figure III-22 : Valeurs de SVF obtenues à partir des deux méthodes, pour les rues de référence

Ces résultats montrent que la formule de calcul simplifié du SVF dans un canyon idéal fonctionne assez bien pour les rues sélectionnées. Paradoxalement, l'écart le plus important est constaté pour la rue Leynaud qui s'apparente bien à un canyon idéal, contrairement à la rue Fénelon dont la photo montre bien que la longueur du canyon est finie. Cet écart peut

être le fait d'un mauvais centrage de l'appareil photo, comme mentionné dans le paragraphe précédent, mais pas à un mauvais calcul du rapport d'aspect. En effet, pour le SVF obtenu à partir de la méthode photographique, le rapport d'aspect d'un canyon infini correspondant serait de 9, ce qui est 2,5 fois supérieur à la réalité.

Cette méthode permet donc de calculer le SVF avec une erreur acceptable dans la mesure où un grand soin est pris dans le positionnement de l'appareil photo et dans le positionnement des points représentant les coins de la façade. Le bon positionnement de l'appareil reste un critère essentiel pour toutes les méthodes basées sur des photographies fisheye. La qualité du résultat dépend de la capacité à obtenir des images superposables à des grilles en coordonnées polaires, ce qui implique aussi une déformation nulle ou caractérisée de l'objectif. Cette conclusion montre qu'il est plus difficile d'obtenir des valeurs de SVF fiables sur le terrain que des valeurs de rapport d'aspect.

En effet, ce dernier nécessite des mesures qui peuvent être effectuées rapidement et avec peu de moyens ainsi qu'une incertitude aisément calculable dans le cas de l'utilisation d'un télémètre laser par exemple. Au contraire, les méthodes de calcul du SVF nécessitent de prendre une photo et analyser l'image, ou de disposer de la géométrie 3D des bâtiments (cf. section I.3.4).

Néanmoins, le SVF est un paramètre qui apporte, pour un point de vue donné, plus d'informations sur la visibilité du ciel, que le rapport d'aspect, qui représente plutôt une moyenne pour toute la rue. Le choix de l'utilisation de l'un de ces deux indicateurs de la géométrie urbaine par rapport à l'autre doit donc être effectué en fonction des besoins et du contexte. Plus la rue s'apparente à un canyon urbain, moins le choix du SVF est pertinent par rapport aux contraintes de mesure. Cependant l'existence d'une méthode fiable permettant de caractériser les obstructions au ciel causées par l'environnement urbain, pour tout type de rue, pourrait inverser la tendance. Par exemple, les méthodes d'acquisition d'image à l'aide d'un appareil monté sur le toit d'une voiture pourraient permettre d'obtenir des SVF à l'échelle d'une ville très rapidement sans avoir à disposer de sa représentation 3D (moyennant la prise en compte de la position de l'appareil qui n'est pas obligatoirement au milieu de la rue). Étant donné que les rues choisies s'apparentent relativement à des canyons idéaux avec une grande longueur et des bâtiments de hauteurs identiques, le rapport d'aspect sera utilisé comme critère géométrique pour présenter dans la suite les résultats des mesures.

III.1.7. Traitements appliqués aux mesures

Cette section décrit les étapes qui ont été nécessaires pour obtenir des données avec un bon niveau de confiance. Cela concerne tout d'abord l'étalonnage des appareils de mesure. En effet, tous les appareils utilisés pour les mesures dans les rues ont fait l'objet d'un calage par rapport à la station IDMP. Ensuite cela concerne la récupération et le traitement des données mesurées.

III.1.7.1. Étalonnage des appareils de mesure

Les sondes LI-COR produisent un courant proportionnel à l'éclairement lumineux auquel elles sont soumises. Elles fournissent des valeurs en milliampères qui doivent être converties pour obtenir des lux. Pour cela, il est nécessaire d'appliquer un coefficient d'étalonnage. Ce dernier est donné par le fabricant, mais il a été remis en cause pour que les sondes soient cohérentes avec celles de la station IDMP. Afin de déterminer ce coefficient, les sondes ont été regroupées et placées horizontalement, les valeurs de courant mesurées ont été comparées avec l'éclairement lumineux global horizontal mesuré par la station IDMP (cf. section II.3.2.4). La Figure III-23 montre la correspondance entre les valeurs de courant mesurées par les sondes placées à l'horizontal, et les valeurs d'éclairement lumineux global horizontal mesurées par la station IDMP.

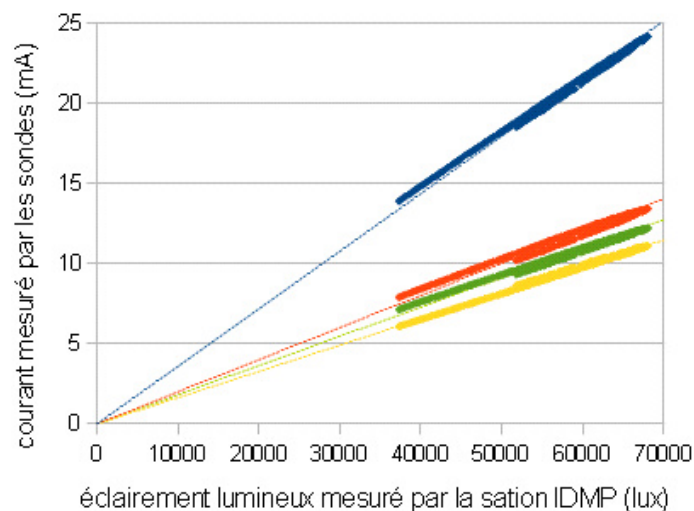


Figure III-23 : Correspondance entre les valeurs de courant mesurées par les quatre sondes utilisées sur le terrain, et les éclairements mesurés par la station IDMP. Données du 10/02/12 entre 10h et 16h

Des droites traversant chaque nuage de points, et passant par zéro, sont tracées pour mettre en évidence la linéarité de la réponse des sondes. En effet, le fabricant des sondes prévoit qu'il n'y a qu'un coefficient à appliquer sur les valeurs de courant mesurées pour obtenir des éclairements lumineux. La pente de ces droites correspond à ce coefficient d'étalonnage qui a été déterminé de la façon suivante : pour chacune des sondes, il s'agit de la valeur moyenne des rapports entre l'éclairement lumineux de la station IDMP et le courant mesuré par la sonde.

Concernant le système de mesure des luminances, une adaptation de l'étalonnage initial au spectre de la lumière naturelle est nécessaire car le système n'a pas de correction en $V(\lambda)$ (cf. section I.2.3.1). Cela provient de la difficulté d'insérer un filtre entre l'appareil photo et l'objectif fisheye. Pour cela, un coefficient est appliqué afin de corriger sa réponse spectrale par rapport à la lumière du jour. En effet, l'appareil a été étalonné à l'aide d'une source de lumière artificielle (un vidéoprojecteur) adaptée aux conditions d'éclairage intérieur. Le spectre de la lumière du jour étant différent, il est nécessaire de prendre en compte cet écart afin d'obtenir des valeurs de luminances plus proches de la réalité. Le

coefficient d'étalonnage de l'appareil photo correspond au rapport entre l'éclairement lumineux calculé à partir de cartes de luminances et l'éclairement mesuré à l'aide d'une sonde LI-COR pour plusieurs situations. La sonde LI-COR est étalonnée suivant la méthode décrite dans le paragraphe précédent afin de produire des valeurs en lux. L'éclairement lumineux peut être calculé en intégrant les luminances provenant de toutes les directions de la scène, ce calcul est effectué par le logiciel PHOTOLUX au moment de la génération de la carte. La Figure III-24 montre les valeurs d'éclairement lumineux mesurées à partir d'une sonde LI-COR étalonnée, et à partir de cartes de luminances. Ces données ont été utilisées pour déterminer le coefficient d'étalonnage. L'éclairement semble être surestimé par la carte de luminances, le coefficient obtenu à partir de ces données est 0,94.

La Figure III-24, à droite, montre la corrélation qui résulte entre les deux sources de données une fois que le coefficient d'étalonnage a été appliqué, le coefficient de corrélation de Pearson est de 0,98 ce qui correspond à une corrélation linéaire forte.

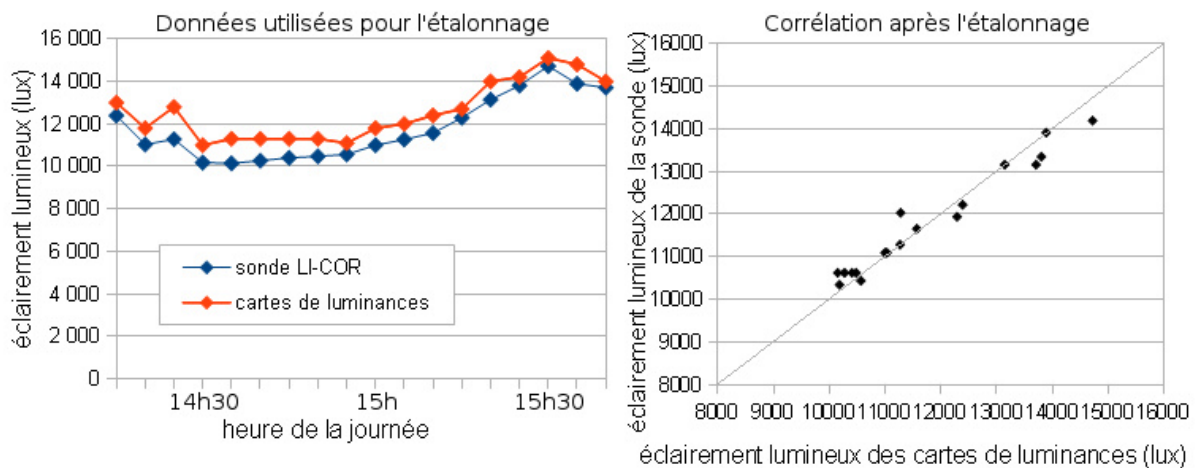


Figure III-24 : Données utilisées pour calculer le coefficient d'étalonnage (à gauche) et résultat de la corrélation après application de ce coefficient (à droite)

III.1.7.2. Production des cartes de luminances des façades

Des cartes de luminances ont été générées à partir des photos de façades prises depuis leur façade opposée. Le logiciel PHOTOLUX fournit un utilitaire qui permet de générer les cartes de luminances pour un ensemble de photos situées dans un même dossier. Grâce à l'automatisation de cette tâche, 153 cartes de luminances ont été réalisées à partir de 765 photographies toutes rues confondues. L'image située à gauche de la Figure III-26 montre un exemple du résultat obtenu. Pour des raisons pratiques, l'appareil est installé verticalement, ainsi pour voir les images correctement il faut effectuer une rotation de l'image de 90° en sens antihoraire. Pour connaître la valeur de la luminance en un point, il faut se reporter à l'échelle de couleur visible sur la même figure.

Pour des raisons logistiques, l'appareil photo est placé verticalement sur le mât, ce qui a pour effet de produire une image de la façade d'en face avec une rotation de 90° dans le sens horaire. Cela est schématisé sur l'encadré de gauche de la Figure III-25. Le mât n'étant pas rigide, le poids de l'appareil photo induit une flexion de ce dernier qui a pour résultat d'ajouter une rotation d'angle arbitraire de l'image comme le montre l'encadré de droite de la Figure III-25.

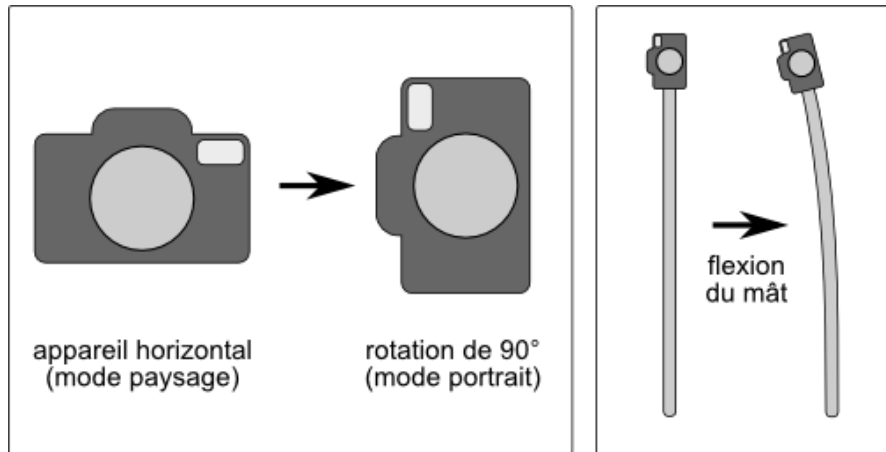


Figure III-25 : Schémas de la position de l'appareil sur le mât, permettant d'expliquer la rotation des images obtenues

Afin de corriger cette inclinaison du mât, une rotation des images doit être effectuée, ce processus étant impossible à automatiser, il a été réalisé au cas par cas. Une rotation des images a donc été réalisée depuis le logiciel Gimp permettant d'obtenir l'image de droite sur la Figure III-26 à partir de l'image de gauche. Dans ce cas, il s'agit d'une rotation de 5° dans le sens antihoraire.

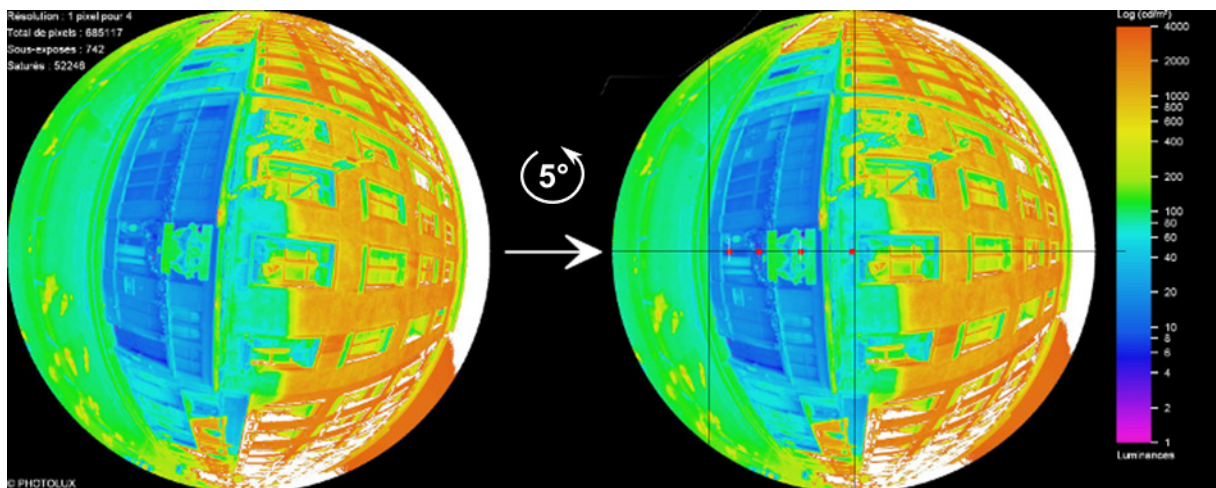


Figure III-26 : Rotation de la carte de luminances et repérage de la position du pied du bâtiment et du centre de l'image ainsi que de la position des sondes (points rouges)

L'angle de rotation est déterminé de telle sorte que la ligne verticale du bâtiment principalement visible grâce aux fenêtres soit alignée avec la droite passant par le centre de

l'image. Les zones en blanc représentent des luminances qui n'ont pas pu être calculées par manque d'une ou deux photos permettant de couvrir la gamme des luminances du ciel. Sur l'image de droite, la jonction entre le trottoir et la façade du bâtiment a aussi été repérée à l'aide d'un axe noir vertical, cela est nécessaire pour déterminer la position des sondes.

Les valeurs d'éclairement sur les sondes sont calculées à partir des luminances de la carte en utilisant la loi de Lambert. Il faut donc, dans un premier temps, déterminer la position des pixels de l'image correspondant à la position des sondes dans la réalité. Ceci est possible grâce à la particularité de l'objectif fisheye qui permet de couvrir un champ de vision de 180° et réalise une projection des points de l'espace suivant une règle bien précise proche de l'équidistance (cf. section III.2.2.2 page 199). La relation entre la distance d'un point sur l'image et l'angle entre ce dernier et la droite focale de l'appareil photo, est illustrée par la Figure III-27.

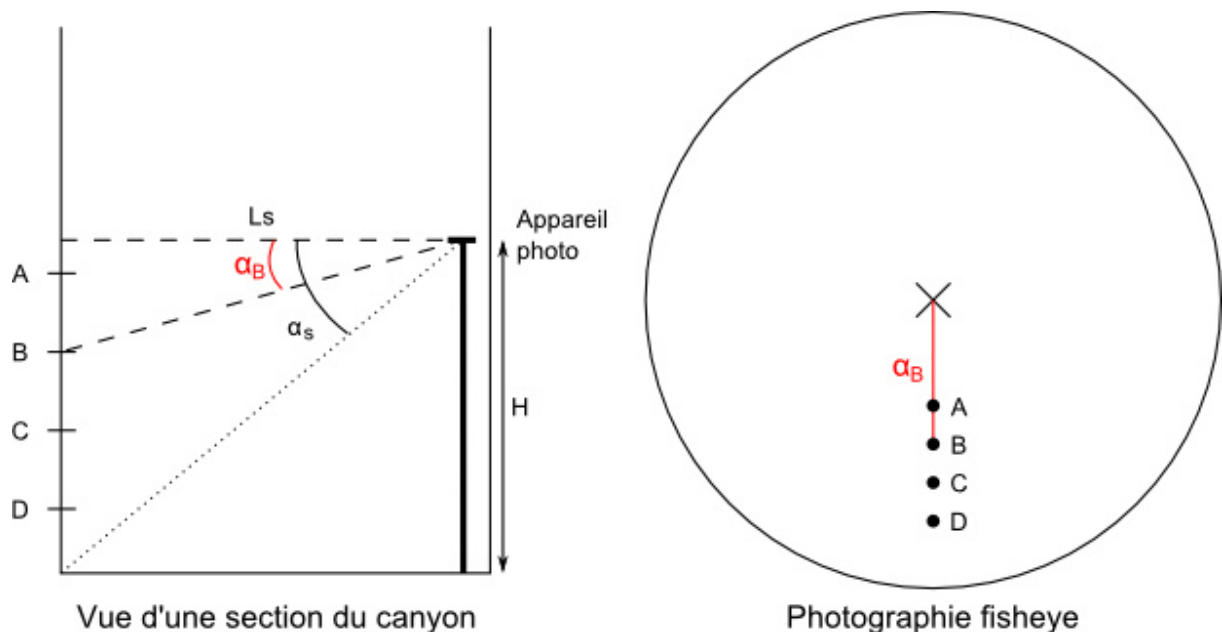


Figure III-27 : Correspondance entre la position de la sonde B dans le canyon (à gauche) et sa position sur l'image (à droite)

La première étape consiste à déterminer la distance L_s qui sépare l'appareil photo de la façade d'en face. L'appareil photo n'est pas placé à la même distance du mur à chaque fois, à cause de divers obstacles (enseignes en drapeau, balcon très saillant...). De plus, les opérateurs doivent se tenir entre le mât et la façade afin de ne pas perturber la mesure de la sonde située à 1,25 m de hauteur. L_s est obtenue à partir de l'angle α_s et de la hauteur H de l'appareil photo qui est constante étant donné que le mât est toujours déplié à fond soit 550 cm :

$$L_s = \frac{H}{\tan(\alpha_s)} \quad (III-8)$$

La valeur de α_s est obtenue à partir de la distance qui sépare le pixel qui se trouve à la limite entre le trottoir de la façade et le centre de l'image corrigé à l'aide des équations (III-7) et (III-8). La valeur de l'angle α_x , avec x l'une des quatre sondes A, B, C ou D, se calcule à partir des fonctions réciproques permettant d'obtenir la distance en pixels d'un point par rapport au centre, à partir de l'angle par rapport à la droite focale.

La valeur de la luminance peut ensuite être extraite à partir de la fonction inverse de celle utilisée par PHOTOLUX pour coder les luminances dans une couleur visible sur l'échelle à droite sur la Figure III-26. Cette échelle de couleur du logiciel est logarithmique et ne contient que 121 couleurs. Le format JPEG utilisé par PHOTOLUX pour sauvegarder les cartes de luminances a l'inconvénient de ne pas maintenir la palette des couleurs à 121 seulement. Ce phénomène peut être constaté au niveau des zones blanches qui représentent les zones saturées dans lesquelles la luminance est inconnue mais supérieure à celle de l'échelle utilisée. Si l'on effectue un zoom de 1600% sur la Figure III-26, on constate qu'il ne s'agit plus uniquement de pixels blancs (cf. Figure III-28).

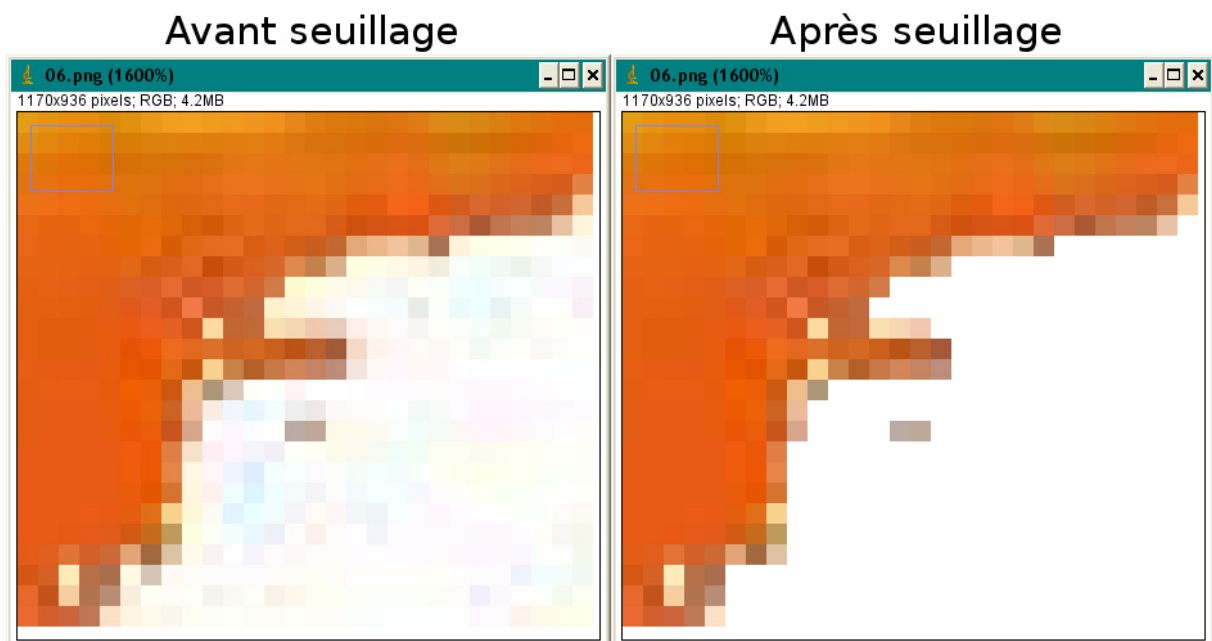


Figure III-28 : Élimination des pixels aberrants dans les zones blanches

Il est important de pouvoir maîtriser ce traitement d'image pour obtenir des valeurs d'éclairement justes sur toute la surface de la façade. Cette carte de luminances est non seulement utilisée pour retrouver les valeurs d'éclairement lumineux des 4 sondes de mesures, mais elle est aussi utilisée pour produire une carte aussi complète et juste que possible des éclairagements sur la façade.

Un autre traitement d'image doit alors être effectué afin de corriger la couleur de ces pixels. La couleur blanche est réservée aux couleurs indisponibles, ces pixels n'étant pas blancs, ils sont traités comme n'importe quel autre pixel et associés à la couleur la plus proche de l'échelle de couleur. Il en résulte des valeurs de luminance fausses. Le logiciel ImageJ (Rasband, 2008) a été utilisé pour corriger ce problème. Ce logiciel possède un outil permettant de sélectionner un ensemble de pixels de l'image dont les valeurs de teinte,

saturation et luminance (TSL) se trouvent dans une plage de données définie par l'utilisateur. Cet outil a donc été utilisé pour sélectionner les pixels faiblement saturés ($0 < S < 50$) et très lumineux ($200 < L < 255$) et les remplacer par des pixels blancs. Ces seuils ont été définis manuellement après contrôle visuel du résultat sur un ensemble de cartes de luminances. Le résultat est visible sur la partie droite de la Figure III-28.

Nous disposons ainsi d'un moyen d'obtenir une base de données de luminances des façades de chacune des rues de Lyon que nous avons sélectionnées. Ces données correspondent à un jour, et un instant donné dont les conditions climatiques peuvent être caractérisées grâce aux mesures de la station IDMP.

III.1.7.3. Calcul des éclairements à partir des luminances

L'éclairement lumineux en un point de la façade peut être dérivé à partir de la luminance, obtenue selon le procédé décrit dans la section précédente. Pour obtenir cette valeur, il est nécessaire d'effectuer l'hypothèse que les revêtements des façades sont parfaitement diffusants, c'est-à-dire qu'ils sont Lambertiens (cf. chapitre II.2). Ainsi il est possible de calculer l'éclairement E à partir de la relation suivante :

$$E = \frac{\pi \times L}{\rho} \quad (III-9)$$

Avec L la luminance de la façade et ρ son facteur de réflexion lumineux, tous deux obtenus à partir des mesures effectuées en ville. Les cartes de luminances ont été générées de façon à ce que cette échelle soit toujours la même et couvre une gamme de luminances de 1 cd/m² à 4000 cd/m². En utilisant l'équation (III-9), l'erreur concernant la valeur d'éclairement lumineux est de 520 lux avec un facteur de réflexion lumineux de 0,2. Cette erreur est de 130 lux pour un facteur de réflexion lumineux de 0,8.

Nous avons donc décrit deux méthodes de mesure des éclairements lumineux sur site ainsi que les étapes permettant de rendre les données exploitables pour une analyse comparative. La section suivante traite donc de la mise en place du protocole permettant d'obtenir des valeurs d'éclairement lumineux à partir de simulations pour pouvoir procéder à cette comparaison.

III.1.8. Préparation des simulations Daysim

Les éclairements lumineux mesurés par les 4 sondes peuvent être comparés aux éclairements lumineux obtenus à partir de simulations. Il faut pour cela que le logiciel offre la possibilité de produire des valeurs en des points précis. Parmi les trois logiciels sélectionnés, seul Daysim en est capable (cf. section II.5.2.2). Les deux autres logiciels (Citysim et Heliodon) permettent d'obtenir des valeurs uniquement sur des surfaces. Certes, une très petite surface pourrait être assimilée à un point, mais Citysim ne permet pas de placer facilement des surfaces réceptrices n'importe où sur la géométrie, et Heliodon ne

permet pas d'utiliser un fichier climatique en entrée. C'est la raison pour laquelle seul Daysim a été retenu. Il a d'autres avantages comme le fait de pouvoir utiliser facilement la géométrie disponible et de produire des éclairagements lumineux du même ordre de grandeur que Citysim (cf. section II.5.2.4).

III.1.8.1. Données de géométrie 3D

La communauté urbaine du Grand Lyon dispose de données LIDAR sur la totalité de son territoire, il s'agit d'une déclinaison du projet Bati3D de l'IGN. La BDD a été créée à partir de données collectées par photogrammétrie aérienne en août 2009. Elle présente l'avantage de décomposer les toitures en plusieurs volumes. Le fichier disponible au format AutoCad DWG dispose ainsi de plusieurs couches permettant de distinguer par exemple les arêtes des bâtiments, les toits horizontaux ou les toits inclinés. La précision est de 40 cm en X, Y et Z. La Figure III-29 montre la fidélité de cette BDD. Sur cette image, le modèle 3D a été texturé manuellement. Cela permet de comparer visuellement les différents types de toits reconnus et de faciliter la comparaison du fait que l'angle de vue n'est pas identique.



Figure III-29 : Vue 3D provenant de Bati3D avec textures ajoutées (à gauche) et photo aérienne de la vraie rue (à droite)

Nous disposons donc d'une géométrie 3D de bonne qualité, de plus le format DWG des données permet une importation dans différents logiciels permettant de vérifier la qualité du modèle 3D. Par exemple, la Figure III-30 montre que la présence d'un balcon dans l'une des rues de référence a été mal représentée dans la géométrie. Cela n'est pas gênant pour notre étude car ce bâtiment est situé au-delà de la zone mesurée, mais cela permet de montrer que malgré la qualité des données, un contrôle visuel doit être effectué pour éviter d'obtenir des valeurs erronées.

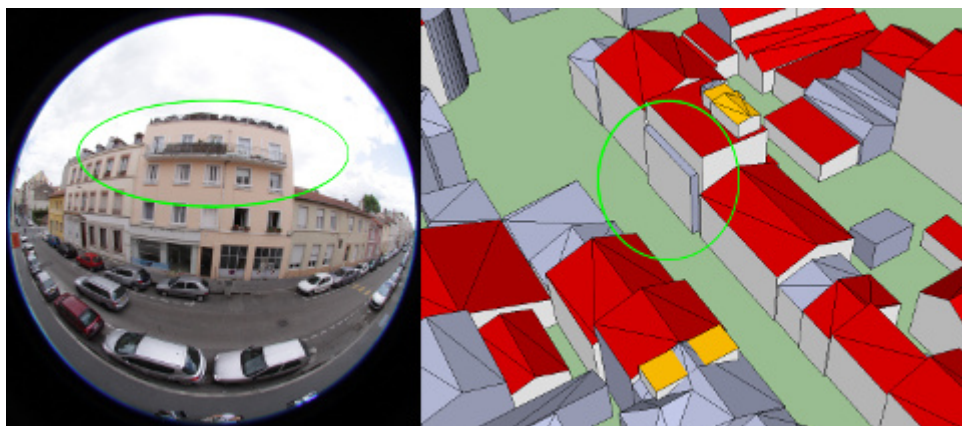


Figure III-30 : Erreur dans la géométrie provenant de relevés LIDAR

La section suivante décrit les étapes permettant de configurer le logiciel Daysim pour effectuer les simulations à partir de cette géométrie.

III.1.8.2. Description des fichiers d'entrée

Afin de pouvoir effectuer des simulations dans le logiciel Daysim, il est nécessaire de générer 3 types de fichiers. Ces derniers sont nommés selon leur extension : PTS, RAD et WEA (cf. section II.5.2.2).

Daysim permet d'obtenir des valeurs d'éclairage lumineux en des points donnés, pour cela il est nécessaire de définir la position de ces points dans la géométrie. Les fichiers PTS contiennent cette information. La position dans l'espace ainsi que l'orientation de ces sondes virtuelles ont été calculées à l'aide d'un programme informatique que j'ai développé à cette occasion. Dans un premier lieu, les coordonnées de la première série de points de mesure ont été repérées dans la géométrie 3D manuellement. Ensuite, les positions des autres séries ont été calculées en considérant un écart de 10 mètres entre chaque série sur un même trottoir et en prenant en compte la largeur de la rue pour déterminer les coordonnées des séries correspondantes pour les façades d'en face. Cela peut être effectué à condition que l'orientation de la rue soit connue, les rues choisies étant droites. Une marge de 30 cm a été considérée afin d'éviter que les points de mesure ne se trouvent à l'intérieur d'un mur, en effet, les façades n'étant pas toutes exactement dans le même plan, ce type de problème est susceptible de se présenter. Cela n'est pas gênant étant donné qu'en réalité, le mât n'était jamais collé au mur durant les mesures comme il a été mentionné précédemment (distance d'environ 30 cm). Sur la Figure III-31, les lignes au sol ont été tracées (en magenta) entre les premières et dernières séries de mesures de la rue, les positions des sondes se trouvent donc tous les 10 mètres perpendiculairement à ces lignes.

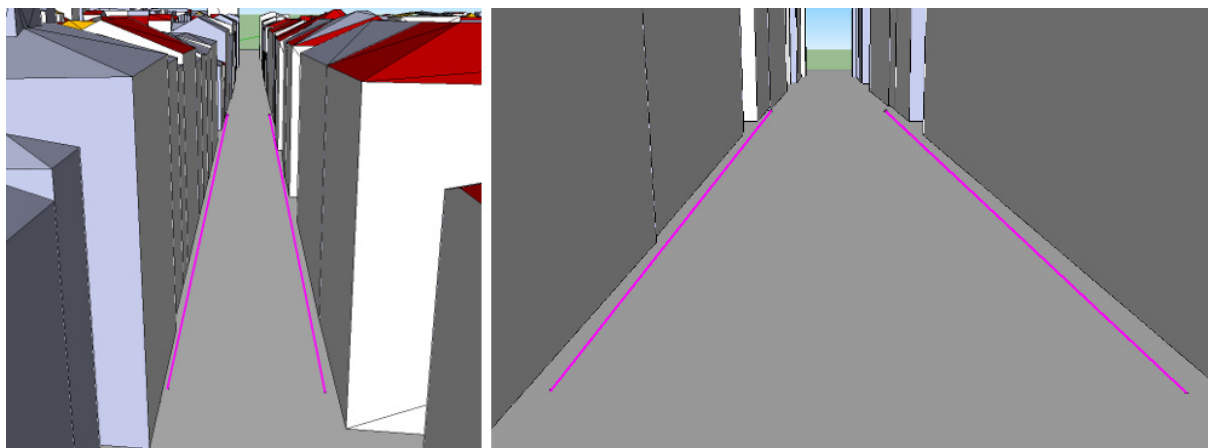


Figure III-31 : Lignes selon lesquelles sont alignées les positions du mât dans la rue Royale (à gauche) et Fénelon (à droite)

Les fichiers RAD permettent de décrire la géométrie de la scène ainsi que les textures appliquées aux éléments. La géométrie ayant été fournie au format DWG, il a été possible de l'importer dans le logiciel Google Sketchup. Le plugin *su2ds* (Kjenner, 2010) permet de générer les fichiers RAD correspondant à la géométrie et aux textures appliquées à cette dernière. La géométrie peut être utilisée directement mais le fichier décrivant les textures doit être édité manuellement. En effet, il est possible d'attribuer des textures à des éléments dans le logiciel, mais ces textures ne sont pas reconnues par RADIANCE (cf. section II.4.1.1) qui est utilisé par Daysim. Ainsi, il est nécessaire de modifier les valeurs correspondant à chacune des textures pour leur donner les attributs souhaités. Pour des raisons de simplification, les textures nommées *rhoXX* ont été créées dans Sketchup avec *XX* prenant les valeurs : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80. Il existe donc 8 textures différentes représentant des facteurs de réflexion allant de 10% à 80% avec un pas de 10%. Le matériau est défini suivant le type de base "plastic" de RADIANCE. Ce dernier est défini par les facteurs de réflexion rouge, vert et bleu ainsi que deux paramètres permettant de définir la specularité et la rugosité du matériau. La valeur de chaque paramètre est comprise entre 0 et 1. Les valeurs des facteurs de réflexions sont les mêmes pour chaque couleur, cela correspond au facteur de réflexion diffus. La valeur de la specularité est de 0 pour tous les matériaux à l'exception des parties en verre pour lesquelles la valeur a été mise à 0,9, pour simuler le comportement de la lumière tel que mesuré sur un échantillon de verre (cf. section III.2.1.4). Des simulations effectuées avec des valeurs de rugosité différentes n'ayant pas donné de résultats différents, ce paramètre a été laissé à 0 quel que soit le matériau. Les textures ont été attribuées manuellement aux façades de bâtiments par rapport aux valeurs mesurées. Cette étape ne peut être automatisée car la géométrie obtenue à partir de données LIDAR ne représente pas les façades de bâtiments telles qu'elles sont en réalité. En effet, les délimitations des façades sont faites en fonction des dimensions des toitures. Or en réalité, il est possible que plusieurs façades de revêtements différents partagent la même toiture. Il y a donc ici une perte d'information par rapport aux mesures effectuées, d'une part en utilisant des valeurs de facteur de réflexion arrondies et d'autre part en considérant moins de façades qu'en réalité. Lorsque des façades mitoyennes étaient représentées par une seule façade, une délimitation a été ajoutée pour se rapprocher de la réalité de la rue.

Les fichiers WEA contiennent les informations sur les conditions climatiques. Daysim est *a priori* prévu pour fonctionner avec des données climatiques dont le pas de temps est fixe. Toutefois, après analyse du code source et échange par mail avec le développeur du logiciel (C. Reinhart), il s'avère que les positions du soleil sont calculées directement à partir de l'heure indiquée dans le fichier. Étant donné qu'il n'y a pas besoin de connaître la valeur précédente ou suivante pour calculer l'éclairement sur une surface à un instant donné, le logiciel peut calculer des éclairagements pour n'importe quelle valeur dans le fichier WEA, tant que la ligne est bien formatée. Cela permet d'utiliser un fichier climatique avec uniquement les valeurs correspondant aux moments où les mesures ont été effectuées en ville.

Les étapes de préparation des simulations ont été décrites ainsi que les données d'entrée, il est désormais possible de comparer les éclairagements lumineux calculés par Daysim avec les valeurs mesurées sur le terrain. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans la section IV.3.5. Le chapitre suivant traite de la mise en œuvre du second dispositif expérimental concernant le modèle réduit de canyon urbain.

III.2. Mesures sur maquette

La maquette est un modèle réduit d'un canyon urbain constitué simplement de deux rangées de bâtiments se faisant face. Les façades des bâtiments ont toutes la même hauteur et sont alignées sur un même côté. En utilisant un modèle réduit, l'ensemble des paramètres géométriques et photométriques des matériaux peut être répliqué fidèlement dans les logiciels utilisés. En effet, dans une rue réelle, comme nous avons pu le voir dans le chapitre III.1, de nombreux paramètres varient fortement d'un bâtiment à l'autre comme le taux de vitrage, la nature du revêtement, voire la hauteur des bâtiments. Il est donc plus difficile de mettre en place des modèles 3D fidèles à la réalité avec des propriétés identiques. Ce cadre maîtrisé permet d'effectuer des comparaisons entre les mesures sur la maquette et les résultats de simulations. La maquette apporte aussi une approche simplifiée et flexible du canyon urbain qui permet d'étudier l'influence d'un paramètre en particulier en gardant le contrôle sur les autres paramètres. Nous évaluerons ainsi l'influence de la distance qui sépare les deux rangées de façades sur la pénétration de la lumière dans le canyon. Nous mettrons aussi en évidence la relation entre le facteur de réflexion du revêtement des façades et la quantité de lumière disponible à une hauteur donnée de la rue.

III.2.1. Description de la maquette

La construction de la maquette représente une partie importante du dispositif expérimental car c'est d'elle que dépend la qualité des mesures. Les précautions qui ont été prises afin de minimiser le risque que le support influe sur les données collectées sont décrites dans les paragraphes suivants.

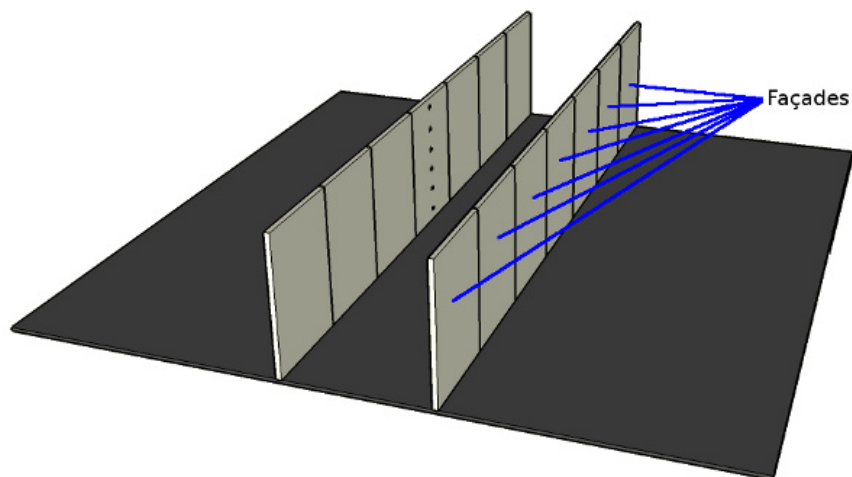


Figure III-32 : Schéma de la maquette en 3D

La Figure III-32 représente un schéma en 3D de la maquette, réalisé avec Google Sketchup. Il s'agit de deux rangées de façades placées sur une base carrée. Sur cet exemple, le rapport d'aspect H/W est égal à 1. Chaque rangée est constituée de 7 façades. La plupart des rues de Lyon possèdent environ 6 bâtiments d'une intersection à l'autre, cependant un nombre

impair a été choisi afin de pouvoir disposer des sondes au milieu de la façade centrale (cf. section III.2.3).

Afin de minimiser l'ombrage dû au relief urbain proche, la structure a été positionnée sur le toit du laboratoire aux coordonnées suivantes : latitude $45,77846^\circ$ et longitude $4,9238^\circ$. A cette position se trouve un local technique sur le toit duquel la maquette a été placée. Ce local d'une hauteur de 3 mètres permet de s'affranchir des obstacles situés sur le toit tels que le champ de panneaux photovoltaïques ou le système de chauffage/ventilation. Cela protège aussi la maquette du passage des techniciens effectuant l'entretien des installations. La surface du toit du local est équivalente à un carré d'un peu plus de deux mètres de côté. Cette dimension est donc à l'origine du choix de la longueur du canyon. Durant la période où la maquette était en place, les photos aériennes et satellites de Google ont été mises à jour, il est donc possible de la voir sur la Figure III-33, elle est orientée selon l'axe nord/sud, le contour blanc correspond au toit de l'abri sur lequel elle se trouve.

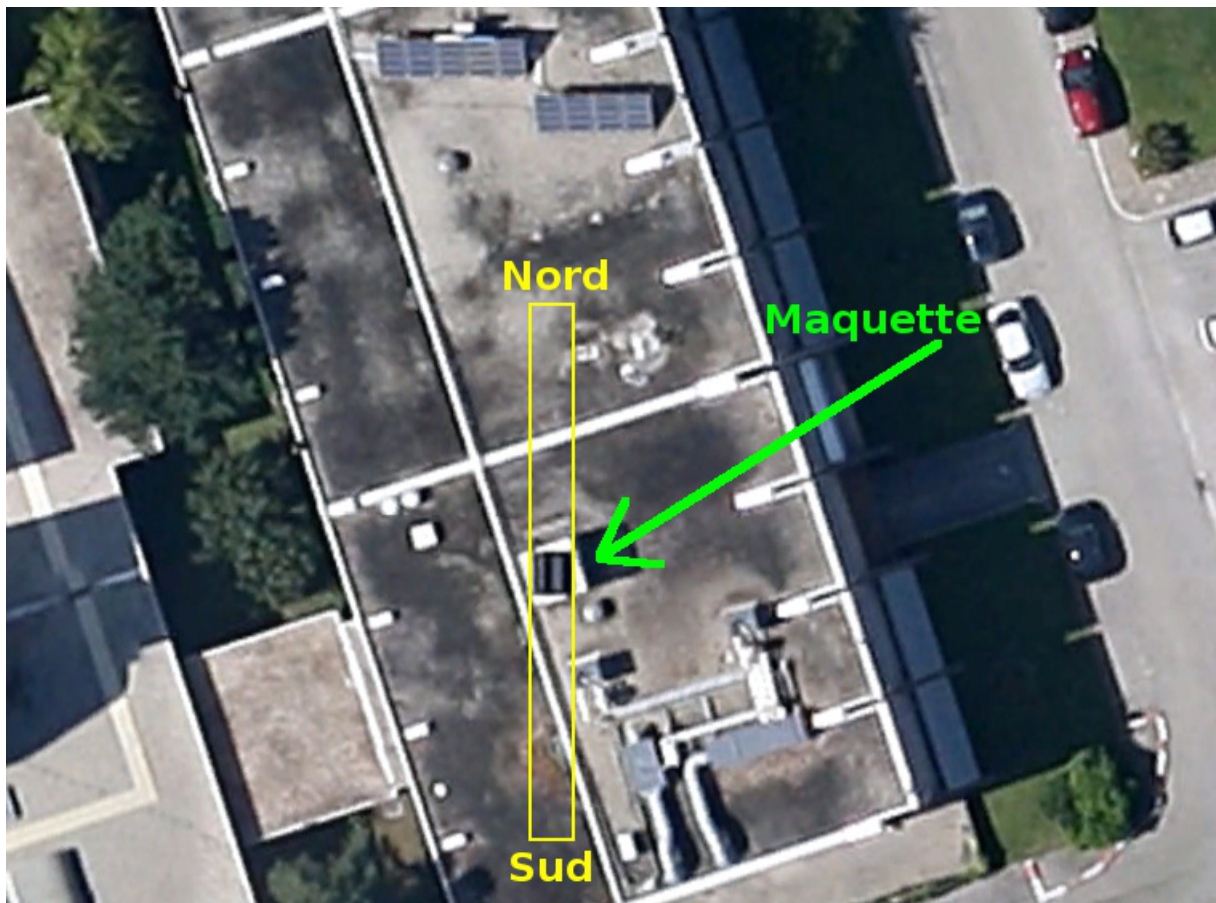


Figure III-33 : Photographie aérienne de la maquette

III.2.1.1. Conception et installation de la structure

La maquette est constituée de deux parties essentielles : la structure et les parties pleines. La structure a été fabriquée à partir de profilés en aluminium anodisé (Combitech Coaxis de Alfer) capables de résister aux intempéries. Les profilés ont une structure spécifique qui les rend très solides et capables de supporter le poids des parties pleines allant de 60 kg à 75 kg en fonction du type de façade.

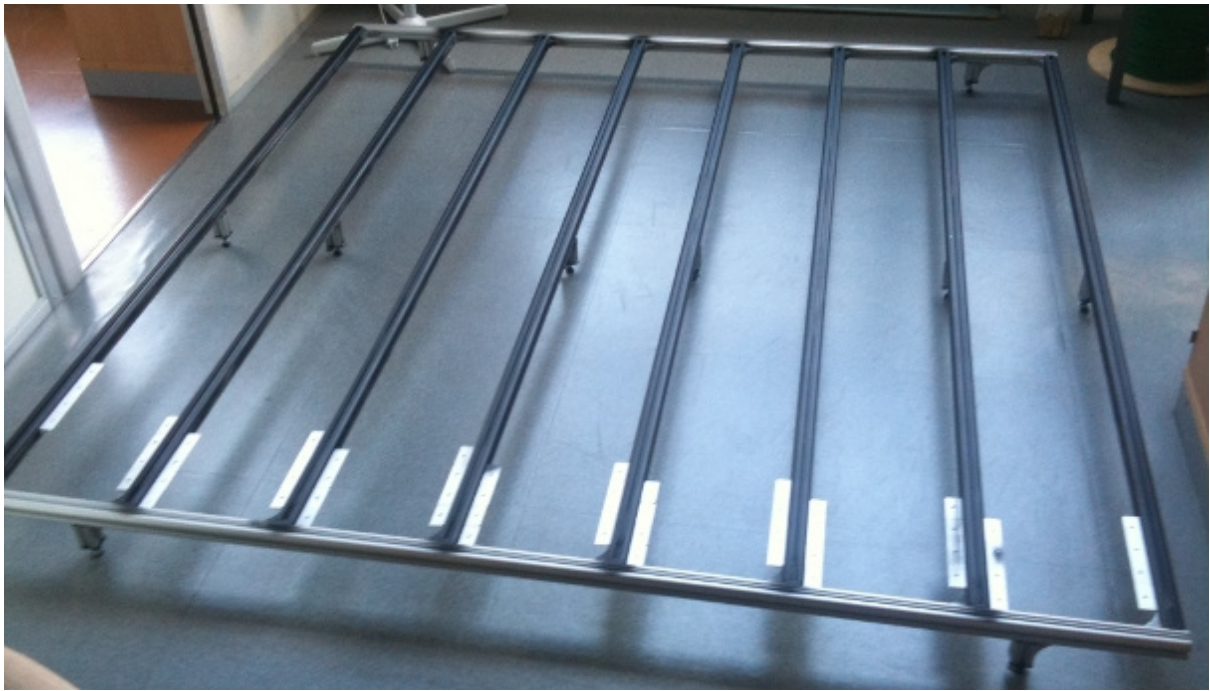


Figure III-34: Structure de la maquette

La maquette a été posée sur le toit d'un local technique, lui-même situé sur le toit d'un bâtiment. Le toit de ce local n'est pas parfaitement horizontal, ainsi, la structure repose sur 10 pieds afin de garantir une meilleure stabilité. Chaque pied est réglable en hauteur pour compenser la non-horizontalité du toit du local. Les pieds permettent aussi de minimiser l'influence de la flexion des pièces qui mesurent 2 m de long. Les éléments qui constituent la maquette sont compatibles, ce qui permet de faire des assemblages simplement tout en conservant une structure solide. Les flèches rouges de la Figure III-35 montrent la façon dont les façades peuvent être déplacées sur la structure. La photo de gauche indique le déplacement qui permet de modifier la largeur du canyon et donc son rapport d'aspect. La photo de droite indique la façon dont les façades peuvent être enlevées pour être remplacées par d'autres avec un revêtement différent. Dans tous les cas, les éléments coulisent sur les rails (les profilés alu) grâce à des éléments fixés sur les façades en bois.

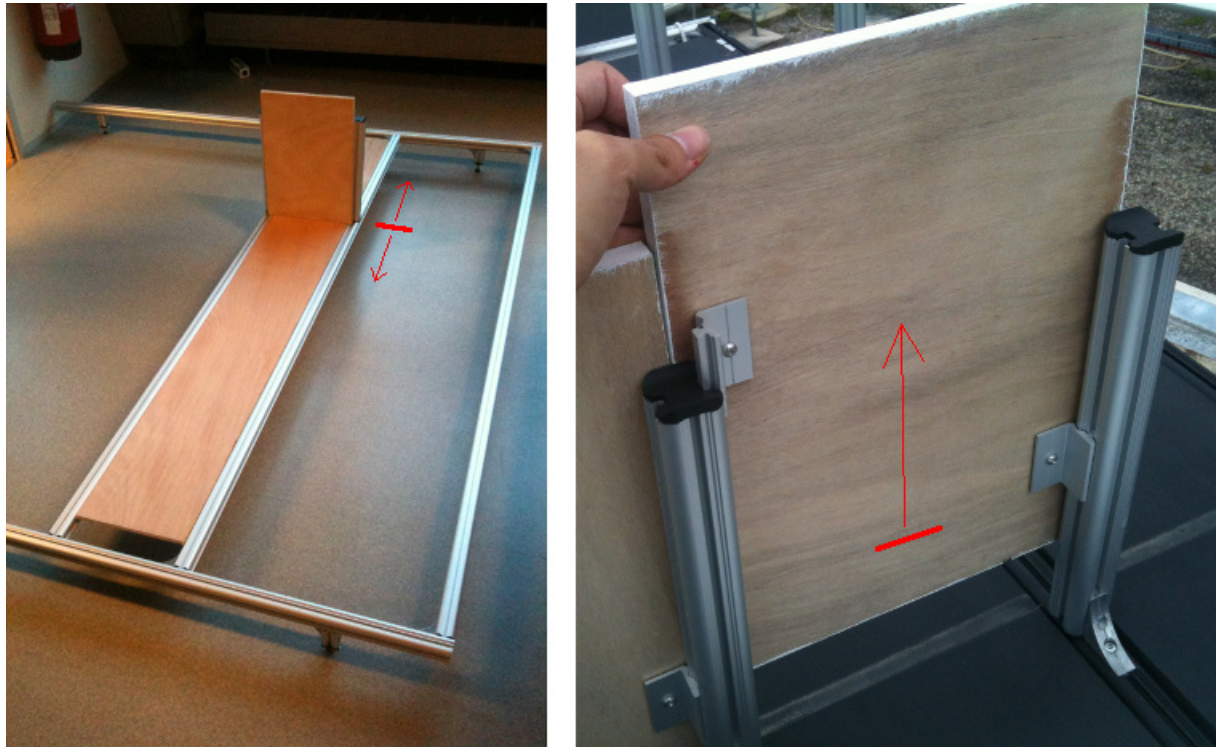


Figure III-35 : Adaptabilité de la maquette permettant de modifier le rapport d'aspect (à gauche) et de changer les façades (à droite)

Les parties pleines devant résister à l'humidité, elles ont été réalisées à partir de contreplaqué de bois exotique. Pour renforcer leur résistance à l'humidité, les planches ont été traitées avec deux couches de vernis, un soin particulier a été apporté au champ le plus exposé à la pluie. Les bâtiments sont représentés par des façades uniquement car notre étude est focalisée sur l'éclairage lumineux. Il n'est donc pas nécessaire de prendre en compte des longueurs d'ondes en dehors du spectre solaire considéré, entre l'UV et l'IR proche. Les échanges radiatifs considérés n'engagent que la surface des éléments, les bâtiments n'ont pas besoin d'avoir un comportement thermique réaliste. Cela dit, le choix de l'épaisseur des façades a devant répondre à deux contraintes ; elle devait être suffisante pour éviter une flexion de la plaque avec les intempéries (vent, humidité, variation de température) et pour ne pas se détériorer lors des trois démontages prévus ; elle devait être suffisante pour pouvoir accueillir les sondes photométriques à la manière d'un fourreau. Les sondes dont les dimensions sont données dans la section III.2.3 devaient rester à la verticale (façades) ou à l'horizontale (sol du canyon) malgré les intempéries.

La base de la maquette est un carré de 2 mètres de côté, ce paramètre a été imposé par la situation de la maquette (cf. section III.2.1). Le canyon a été centré sur cette base et mesure donc 2 mètres de long. Sa largeur est variable afin de simuler une rue plutôt étroite ou plutôt large. La hauteur des façades a été choisie pour permettre d'obtenir des rapports H/W correspondant à des rues existantes. Sachant que la hauteur moyenne mesurée sur un échantillon de 90 bâtiments est de 20,5 mètres, la hauteur des façades en bois est de 40 cm. Cette configuration permet d'obtenir n'importe quel rapport hauteur/largeur (H/W) compris entre 0,25 et 10 (cf. Figure III-36). Cependant, les valeurs H/W qui ont été choisies pour la campagne de mesures sont 0,5, 1 et 2 car elles sont représentatives des valeurs mesurées

dans les rues de Lyon, et donc d'un tissu urbain réel. La maquette peut ainsi être assimilée à un canyon urbain typique de Lyon à l'échelle 1/50^{ème}.

| | | | | | | |
|--------|------|------|-----|-----|-----|------|
| W/L | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,8 |
| H/W | 10 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 |
| schéma | | | | | | |

Figure III-36 : Quelques de valeurs de H/W et W/L que peut prendre la maquette

Dans une étude précédente mettant en œuvre une maquette similaire (Swaid, 1993), l'effet d'échelle n'a pas été considéré comme perturbant dès lors que la géométrie du canyon exprimée à travers le rapport d'aspect (H/W), correspondait à des valeurs réalistes. De plus, les effets de bord dus à la longueur limitée de la maquette n'ont pas été considérés comme gênants pour des rapports L/H grand, avec L la longueur du canyon. Swaid a utilisé un rapport $L/H = 4$; notre maquette utilise un rapport plus grand $L/H = 5$ ($L = 200$ cm et $H = 40$ cm). Une autre étude (E. Bozonnet, 2005) préconise que le rapport W/L, soit le plus inférieur à 1 possible, afin d'approcher le comportement d'un canyon de longueur infinie. Dans notre cas, ce rapport peut prendre les valeurs de 0,1 à 0,4 comme le montre la Figure III-36. La longueur du canyon ne pouvait pas être plus grande en raison de la dimension de la structure utilisée comme support.

III.2.1.2. Erreurs de mesure potentielles liées à la structure

Décalage entre les façades

Ce décalage est lié à la difficulté de concevoir un dispositif tout à la fois robuste et adaptable. Cela provient en partie de l'horizontalité du plancher de la maquette. En effet, malgré les précautions prises avec l'utilisation de nombreux pieds réglables en hauteur, la surface qui représente le sol du canyon n'est pas un plan car elle n'est pas horizontale en tout point à cause du poids des éléments qui reposent dessus. Le défaut d'alignement des façades peut avoir une influence sur le moment où une sonde reçoit du rayonnement solaire direct. Un écart maximal de 3 mm a pu être observé et mesuré entre les panneaux constituant les façades. À titre d'exemple, un écart de 4 mm représente seulement 1% de la hauteur totale d'une façade, cependant le temps mis par le soleil dans sa trajectoire pour couvrir cet écart doit être théoriquement pris en compte. La Figure III-37 montre une photo de la maquette avec les façades noires et un rapport d'aspect $H/W=2$, qui met en évidence l'existence de ces décalages.

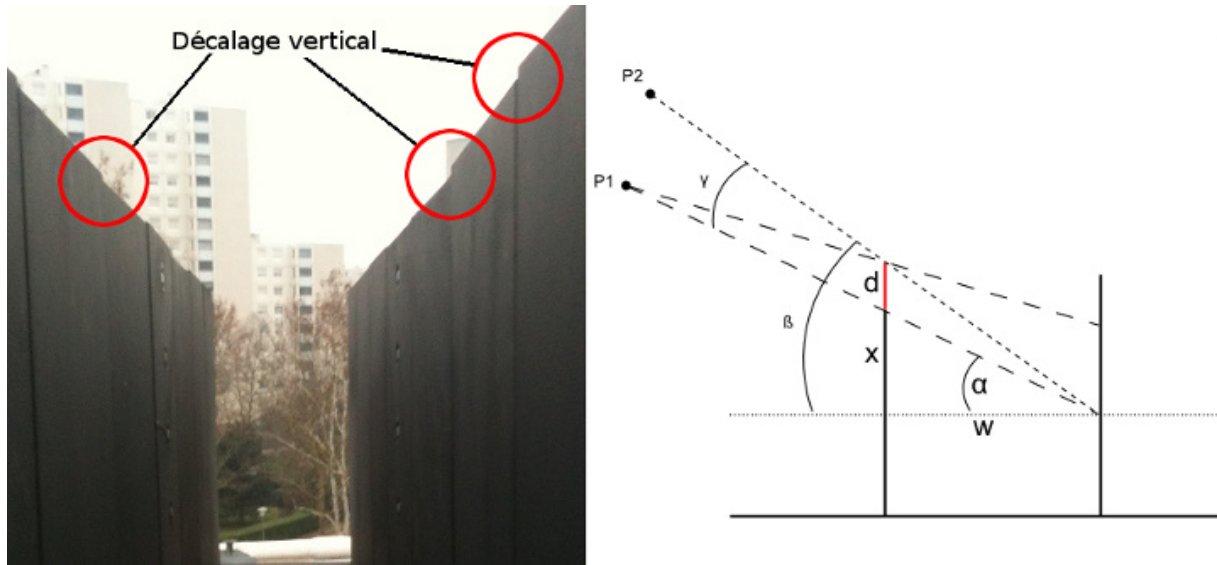


Figure III-37 : Photo du décalage vertical (à gauche), schéma de la conséquence sur l'éclairement au sein du canyon (à droite)

Les zones entourées en rouge mettent en évidence l'existence d'un décalage vertical entre certaines façades. Ce type d'anomalie peut être réduit lors du montage en alignant les façades à l'aide d'un maillet, mais il existe un point limite au-delà duquel toutes les façades sont bloquées entre elles. L'analyse suivante a été menée pour estimer l'impact de cette particularité sur l'incertitude des mesures effectuées par les sondes. Dans un premier temps il suffit de calculer l'angle γ visible sur le schéma de la Figure III-37 à l'aide des équations (III-10).

$$x = w \times \tan(\alpha)$$

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{x + d}{w}\right) \quad (III-10)$$

$$\gamma = \beta - \alpha$$

L'angle α représente en réalité la hauteur angulaire du soleil. Ainsi l'angle γ représente la distance angulaire parcourue par le soleil entre le moment où il passe de la position $P1$ à la position $P2$. La vitesse de déplacement du soleil dans le ciel est de 15° par heure. Mais la vitesse de déplacement vertical du soleil dépend de la latitude du lieu et du jour. Cette vitesse de déplacement vertical a été calculée en utilisant les données de la station IDMP pour toute l'année 2012. Sa valeur est minimale lorsque le soleil est au plus haut dans le ciel, mais l'alignement des façades n'est plus un problème à ce moment puisque le canyon est orienté nord/sud. L'azimut du soleil joue donc un rôle dans le calcul, et l'azimut maximal à considérer dépend de la largeur du canyon. Nous allons considérer les façades dont le désalignement est susceptible d'avoir une influence significative sur la visibilité du soleil par une sonde, elles sont numérotées de 1 à 3 comme le montre la Figure III-38.

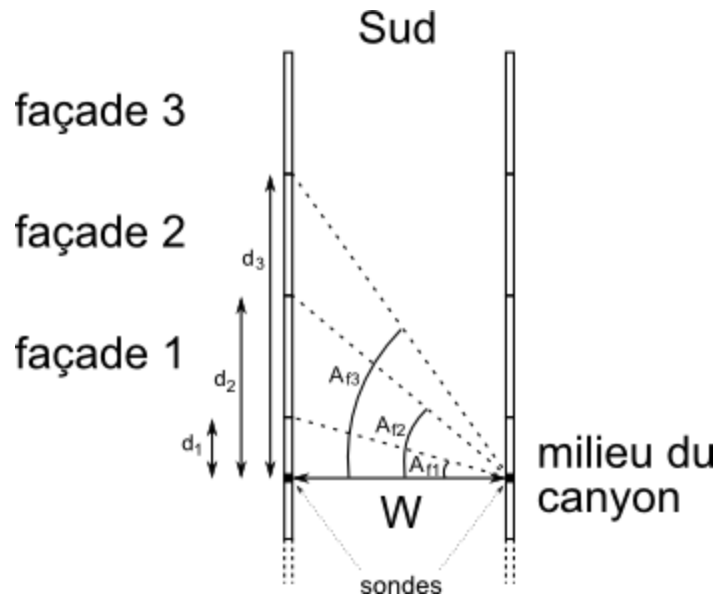


Figure III-38 : Schéma de la maquette vue de dessus

La valeur d'azimut maximale à considérer pour chaque façade, en fonction du rapport d'aspect, s'obtient en ajoutant 90 à la valeur d' A_{fx} , en degrés, obtenue à partir de l'équation (III-11), en remplaçant x par le numéro de la façade.

$$A_{fx} = \text{atan}\left(\frac{d_x}{W}\right) \quad (\text{III-11})$$

À partir de là, il est possible d'extraire la vitesse angulaire verticale minimale v_{fx} du soleil entre le lever et le moment où il atteint la valeur A_{fx} , à partir données de la station IDMP. Enfin, le temps t en minutes mis par le soleil pour compenser le décalage vertical des façades est donné par l'équation suivante :

$$t = \frac{\gamma \times 60}{v_{fx}} \quad (\text{III-12})$$

Sachant qu'il n'a pas été relevé d'écart supérieur à 3 mm durant toute la campagne de mesures, le plus grand décalage possible est de 8,7 minutes comme le montre le Tableau III-4. La durée augmente avec le rapport d'aspect : plus le canyon est étroit, plus le décalage vertical des façades a une influence importante sur le moment où une sonde est ensoleillée. La durée augmente aussi en fonction de la façade considérée. Lorsque le soleil est aligné avec la façade 3, sa hauteur angulaire est moins élevée que lorsqu'il est aligné avec la façade 1. Cela signifie que l'influence du décalage vertical des façades risque d'être plus marquée durant l'hiver.

| H/W | Façade 1 | Façade 2 | Façade 3 |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0,5 | 1,1 min | 1,1 min | 1,2 min |
| 1,0 | 2,2 min | 2,5 min | 3,1 min |
| 2,0 | 4,6 min | 6,8 min | 8,7 min |

Tableau III-4 : Temps mis par le soleil pour couvrir le décalage vertical de 3 mm d'une façade en fonction du rapport d'aspect

Le moment où le soleil devient visible pour une sonde est donc un point délicat pouvant occasionner des divergences entre les éclairagements lumineux mesurés et ceux calculés par les logiciels de simulation, à ce moment précis. Si les valeurs des décalages verticaux avaient été connues à chaque instant, le décalage de temps correspondant aurait permis d'obtenir de meilleurs résultats de comparaison entre mesures et simulations. Or les écarts des façades durant les périodes relatives à différentes configurations n'ont pas été journalisés. Il est donc impossible de prendre en compte ce décalage dans la base de données. De plus, il serait délicat d'intégrer ce paramètre dans les mesures, du fait du caractère dynamique de l'éclairagement solaire et d'autres incertitudes telles que l'orientation de la maquette par rapport au nord, ce qui est l'objet du paragraphe suivant.

Orientation de la maquette

La maquette a été placée de façon à ce que le canyon soit aligné avec l'axe nord/sud. Dans un premier temps, une boussole a été utilisée pour effectuer ce réglage, mais elle était fortement perturbée et ne permettait donc pas de déterminer le nord avec certitude. L'abri sur lequel se trouve la maquette est construit dans un matériau métallique, de plus il contient les ondulateurs du champ de panneaux photovoltaïques. Dans un second temps, le canyon a été orienté en utilisant l'ombre projetée par le soleil. Pour l'orienter selon l'axe nord/sud, il suffit de le placer de façon à ce qu'aucune des deux rangées de façades ne projette une ombre à l'intérieur du canyon à la minute où le soleil se trouve exactement au sud.

La maquette a donc été orientée le 23 juin 2011 selon cette méthode. Nous avons utilisé l'azimut solaire indiqué dans les fichiers de la station IDMP de la veille (le 22 juin) pour trouver l'instant où le soleil était orienté plein sud (13h42). Au moment du solstice d'été, l'heure à laquelle le soleil est orienté plein sud varie peu d'un jour à l'autre. Par exemple, à 13h42 le 22 juin 2011, l'azimut du soleil était de $179,9^\circ$ alors qu'il était de $179,7^\circ$ le lendemain. Sachant que le soleil se déplace dans le ciel à raison de 15° par heure, $0,25^\circ$ par minute, un écart de $0,2^\circ$ correspond à un intervalle de temps d'environ 48 secondes. Afin d'être le plus précis possible, il est donc nécessaire d'orienter la maquette en moins d'une minute, ce qui a pu être effectué aisément. Il est possible de vérifier l'alignement de la maquette sur l'axe nord/sud à partir de la photographie aérienne de Google présentée dans la Figure III-33 (page 185). L'axe vertical de ces photographies est toujours nord/sud.

Étant donné que l'acquisition pour l'orientation nord/sud n'a commencé que durant la deuxième année de thèse, et qu'il a fallu un an pour obtenir les données pour une seule orientation, la deuxième orientation est/ouest initialement envisagée n'a pas pu être étudiée.

Altitude

L'altitude à laquelle se trouve la maquette a été déterminée. Les formats de fichiers climatiques utilisés par Citysim et Daysim imposent de spécifier une valeur d'altitude du lieu, mais cette donnée n'est pas utilisée pour les simulations : des tests ont été effectués pour un plan horizontal avec une altitude de 0 m et de 5000 m, les éclairements lumineux calculés ont été identiques. Le logiciel Heliodon n'utilise pas de fichier climatique, mais il a besoin de l'altitude du lieu pour modéliser l'éclairement énergétique direct.

L'altitude de la maquette est la somme de l'altitude du terrain, de la hauteur du bâtiment et de la hauteur du local. Le local a une hauteur de 3 mètres mesurée au mètre à ruban et le bâtiment a une hauteur de 10 mètres mesurée au télémètre LASER. L'altitude du terrain est plus délicate à prendre en compte. Elle a été estimée à l'aide d'un programme développé dans le cadre de la thèse qui utilise la base de données altimétriques SRTM de la NASA (cf. section II.1.2). Étant donné le pas de discrétisation, pour obtenir l'altitude en tout point du globe, une interpolation linéaire entre les 4 voisins les plus proches est effectuée. La valeur obtenue pour les coordonnées où se trouve la maquette est de 174 mètres. L'altitude indiquée par Google Earth est aussi de 174 mètres. Sachant que les deux sources utilisent la même base de données SRTM, cela valide le programme développé et permet d'assurer que la valeur choisie est correcte. L'altitude totale de la maquette est donc de 187 mètres. C'est la valeur utilisée dans les logiciels de simulation.

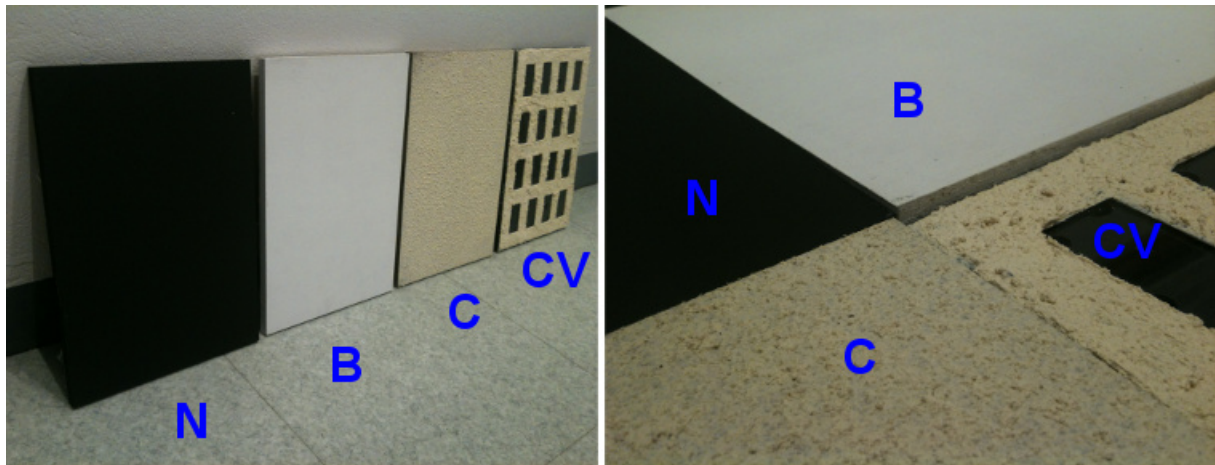
III.2.1.3. Conception des façades interchangeables

Notre étude se focalise sur les deux paramètres qui ont le plus d'influence sur la quantité de lumière naturelle disponible à la surface des bâtiments : le rapport d'aspect et le revêtement des façades. Le rapport d'aspect varie d'une rue à l'autre, alors que le revêtement des façades varie en réalité d'un bâtiment à l'autre. Dans le cadre de notre étude, nous allons utiliser des types de revêtements homogènes sur toute la rue. Cela permet de se rapporter à un cas simple, car les mesures effectuées sur la maquette seront destinées à être comparées avec des simulations. En s'affranchissant de cette complexité naturelle, nous nous éloignons quelque peu d'une configuration réaliste, mais nous réduisons les sources de biais. Quatre types de façade présentant des couleurs ou des états de surface différents ont été utilisés, ils sont visibles sur la Figure III-39.

Les types N et B consistent en une peinture de couleur unie, leur surface ne présentant pas de relief. Le type C est un crépi dont le facteur de réflexion lumineux est compris entre les deux précédents (cf. Tableau III-5), l'intérêt de ce matériau est de représenter plus fidèlement ce que l'on peut trouver en milieu urbain, tant au niveau de la texture qu'au niveau de la couleur. Le type CV est basé sur le même crépi et présente des surfaces vitrées, c'est le seul qui possède cette caractéristique. Pour chaque revêtement, deux couches ont été appliquées afin de garantir la tenue dans le temps.

Les deux premiers types de façade : noir mat (N) et blanc mat (B), permettent de borner la contribution du rayonnement diffus au sein du canyon. Ces limites permettent de contrôler la cohérence des mesures effectuées avec le crépi (C). Ce dernier étant beige, les mesures ne peuvent théoriquement pas être inférieures à celles des façades noires, ni être

supérieures à celles des façades blanches. La comparaison entre les types : crépi (C) et crépi verre (V) permettra d'étudier l'impact des réflexions spéculaires causées par le revêtement vitré. Le type CV est aussi celui qui se rapproche le plus de la réalité.



*Figure III-39 : Façades utilisées sur la maquette (à gauche)
et vue rapprochée des revêtements (à droite)*

Les façades CV sont constituées d'une plaque de verre collée sur du bois peint en noir. Le tout est recouvert d'un crépi laissant apparaître le verre afin de simuler des fenêtres. La lumière pénètre dans le volume des pièces et n'en ressort pas, d'où l'utilisation d'une peinture noire.

Les dimensions des surfaces vitrées ont été choisies en tenant compte de mesures effectuées sur le terrain (cf. section III.1.5.2). Le taux de vitrage retenu est donc de 31%. Une valeur de 30% a été utilisée dans la méthode LT appliquée au milieu urbain (C Ratti *et al.*, 2000) et décrite dans la section II.4.2. Des "ouvertures" de dimensions identiques sur toute la façade ont été réalisées pour obtenir cette valeur, le résultat est visible sur la Figure III-40.

Les dimensions des fenêtres sont 1,5 fois supérieures à celles que l'on peut trouver dans les rues de Lyon (cf. section III.1.5.2) si elles sont ramenées à l'échelle réelle. Ce facteur s'explique par la morphologie des vraies façades de bâtiment. Le rez-de-chaussée comprend généralement moins de surfaces vitrées que le reste du bâtiment. Les fenêtres sont remplacées par des portes de garages, des portes d'entrée imposantes, voire condamnées. Or, pour des raisons pratiques, le taux de vitrage a été calculé par rapport à des photos excluant le rez-de-chaussée. Sur la maquette, les fenêtres se trouvent sur la totalité de la façade, y compris là où se trouve normalement le rez-de-chaussée et son revêtement peu vitré. Visuellement, c'est comme si seuls les étages supérieurs d'une vraie façade étaient représentés. Le but est de représenter un taux de vitrage global, la prise en compte de la même morphologie que celle constatée dans les rues de Lyon n'est pas essentielle à l'étude de l'influence du vitrage au sein d'une rue. De plus, l'intérêt de la maquette est d'obtenir un modèle simplifié de la réalité, avec ainsi un revêtement uniforme sur toute la hauteur des façades.

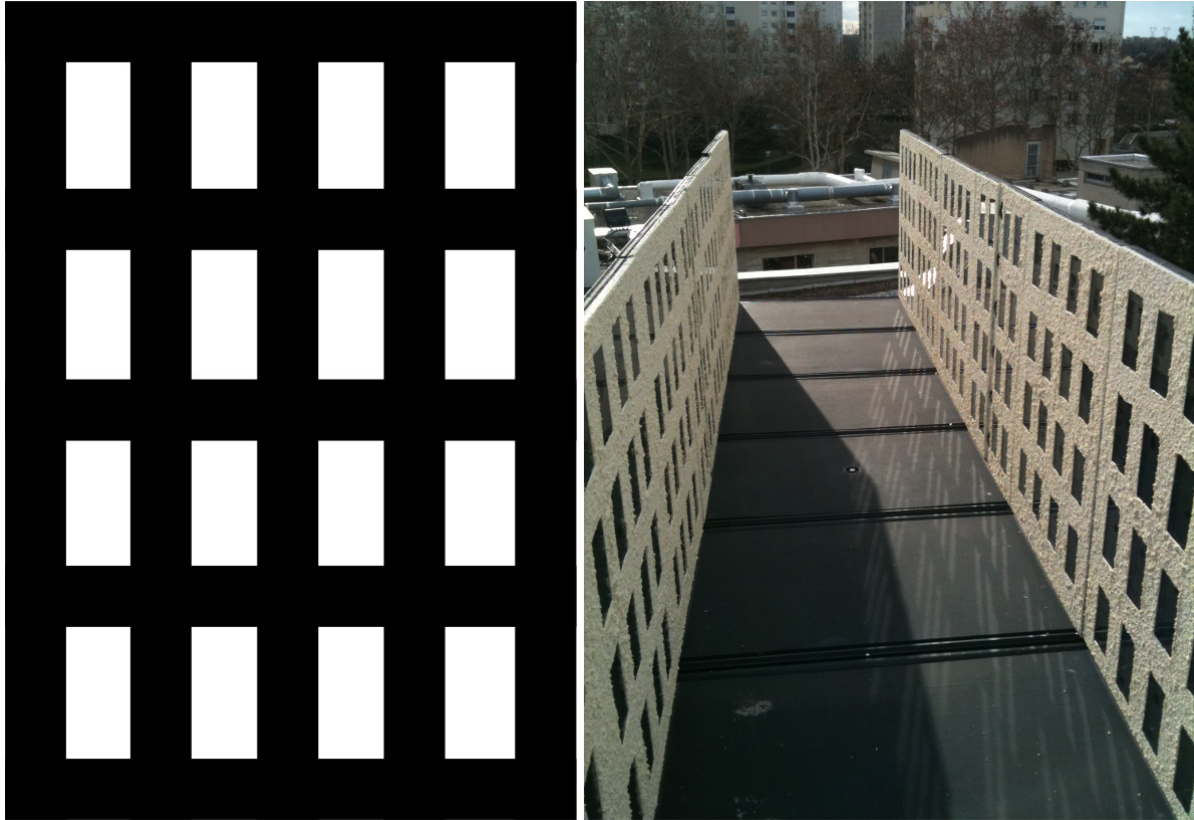


Figure III-40 : Gabarit pour la disposition des fenêtres et rendu dans le canyon

III.2.1.4. Mesures du facteur de réflexion des façades

Un protocole a été mis en place pour mesurer le facteur de réflexion lumineux des revêtements. En effet, la prise en compte des valeurs réelles est nécessaire pour obtenir une bonne corrélation entre les mesures et les simulations dans les logiciels utilisés qui offrent la possibilité de configurer ce paramètre. Les facteurs de réflexion lumineux ont été mesurés avant la campagne de mesures, mais aussi après, pour caractériser l'éventuelle dégradation du revêtement entraîné par l'exposition au soleil et aux intempéries.

Facteur de réflexion lumineux

Le facteur de réflexion lumineux a été mesuré pour chaque façade en utilisant un spectromètre (cf. annexe C). Le Tableau III-5 contient le détail de chacun des facteurs pour les types de revêtement utilisés sur la maquette. Le crépi se trouve bien entre le blanc et le noir, bien qu'il soit plus proche du blanc, cela est réaliste car les façades des bâtiments qui présentent des propriétés visuellement équivalentes possèdent un facteur de réflexion lumineux compris entre 60% et 70% (cf. section III.1.5). Sur la maquette, le revêtement de la chaussée est identique à celui des façades noires.

| Revêtement N (noir) | Revêtement B (blanc) | Revêtement C (crépi) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 5% | 87% | 65% |

Tableau III-5 : Facteurs de réflexion lumineux mesurés pour les revêtements des façades de la maquette

Pour les parties vitrées du revêtement CV, la mesure du facteur de réflexion est plus délicate. En effet, il s'agit de l'association d'une surface transparente spéculaire et d'une surface opaque diffusante. Mardaljevic a mentionné la nécessité de pouvoir caractériser correctement les propriétés optiques des fenêtres des façades, particulièrement lorsque des résultats très précis sont attendus (Mardaljevic, 2004b). Nous avons mesuré le facteur de réflexion spéculaire de la partie vitrée en suivant la méthode recommandée par la CIE (CIE, 1998). Nous avons trouvé une valeur de 95%. Cela signifie que lorsqu'une source directe est utilisée, la majeure partie du rayonnement incident est réfléchi. Nous avons aussi mesuré en lumière incidente diffuse, le facteur de réflexion total de cette partie vitrée. Nous avons trouvé une valeur de 4,9%. Lorsque le soleil n'éclaire pas directement ces surfaces, elles peuvent bien être assimilées au revêtement noir.

Points de colle

Les façades possédant une partie en verre subissent une baisse du facteur de réflexion à cause de la colle qui sert à maintenir le verre contre le bois. Le protocole décrit en annexe D a permis de mettre en évidence une perte de 2,9% du facteur de réflexion, passant ainsi de 5% à 4,86%. Cette réduction est faible et a été évaluée sur les façades noires avec une plaque de verre collée, mais sans la partie crépi. Or, il n'y a pas de points de colle visibles sur toutes les "ouvertures", la valeur arrondie à 4,9% a donc été utilisée pour configurer le facteur de réflexion dans les logiciels afin de paramétrer les simulations avec les données les plus proches possible de la réalité.

Vieillessement des revêtements

Étant soumis aux intempéries, il est possible d'observer des modifications du facteur de réflexion lumineux des revêtements dans le temps. Afin d'identifier ce phénomène, un ensemble de façades de référence a été conservé à l'abri de la lumière et de la poussière, durant toute l'année de mesures, alors que les autres façades étaient placées à l'extérieur. Les facteurs de réflexion des façades de référence et des autres ont été mesurés à nouveau à la fin de la campagne de mesure. Le facteur de réflexion lumineux des façades noires a légèrement augmenté de 5% à 5,4%. Pour les façades blanches, le facteur de réflexion lumineux est passé de 87% à 79%, soit une baisse de 8 points. Le blanc a donc une plus grande propension à se salir. Le revêtement crépi est quant à lui passé de 65% à 59% occasionnant une baisse de 6 points, plus faible que pour le blanc, mais néanmoins remarquable. Plus le revêtement possède un facteur de réflexion élevé, plus celui-ci diminue avec les intempéries. Le blanchiment des revêtements noirs et le noircissement des revêtements blanc a déjà été observé (Grigge, Sharp, et MacDonald, 1989). Dans sa thèse, Doya rapporte le même type d'observation (Doya, 2010) mais avec un écart plus important (-35 points pour une surface blanche et +2 points pour une surface noire) sur une durée de 571 jours. Ces variations dépendent du matériau et des conditions atmosphériques, mais il s'agit de tendances normales. Ce changement des propriétés des revêtements n'a pas été pris

en compte dans l'analyse des données car il est difficile de définir l'évolution de la salissure dans le temps. Les façades blanches ont pu être plus sales à un moment donné à cause d'une pluie véhiculant de la terre ou des particules végétales et être nettoyées ensuite par la pluie. Il aurait alors fallu mesurer régulièrement le facteur de réflexion, ce qui aurait été très contraignant. Toutefois, nous garderons à l'esprit ces variations et leur ordre de grandeur, lors de la comparaison entre les mesures effectuées sur la maquette et les calculs effectués par les logiciels.

III.2.2. Caractérisation des obstructions au rayonnement solaire de la maquette

Le rayonnement solaire provenant du ciel ou directement du soleil peut être caché par différents éléments. Nous distinguerons les obstructions proches occasionnées par l'environnement urbain (bâtiments, éventuellement la végétation) et les obstructions lointaines, liées au relief naturel. La connaissance de ces obstructions permet d'affiner la précision des simulations lorsque les logiciels utilisés permettent de prendre en compte ce phénomène. Ces deux types d'obstruction peuvent être déterminés chacun avec une méthode spécifique. Les obstructions lointaines sont déduites de relevés topographiques, les obstructions proches sont déduites de photos fisheye.

III.2.2.1. À partir de données satellitaires

À l'aide d'une base de données d'altitude, il est possible via un algorithme de déterminer la ligne du relief montagneux qui représente l'horizon lointain. La BDD SRTM se compose d'un ensemble de fichiers au format ARC/INFO ASCII GRID contenant chacun l'altitude discrétisée d'une maille carrée du globe de 5 degrés de côté. La distance entre chaque point est de 3 secondes d'arc, soit une distance d'environ 90 m à l'équateur. Les données existantes sont en réalité de l'ordre de 1 seconde d'arc, mais elles sont seulement disponibles pour les États-Unis et ont été interdites à la distribution pour le reste du monde pour des raisons militaires. J'ai développé un programme en Java dans le cadre de cette thèse pour convertir les données brutes avec un pas de 90 m en une ligne d'horizon. Ce programme n'est pas spécifique à la maquette en place et permet d'obtenir le même résultat sur toute la planète tant que des données altimétriques sont disponibles. La Figure III-41 schématise l'exploitation des données altimétriques.

Pour connaître le relief visible depuis un lieu donné, on considère un anneau centré en ce lieu. Cet anneau est défini par ses rayons d_{min} et d_{max} correspondant respectivement à la distance la plus courte et la distance la plus grande, entre lesquelles se trouve le relief significatif. La précision de la base de données utilisée est de ± 20 mètres en planimétrie et ± 16 mètres verticalement. Sachant que la distance entre chaque point de mesure est d'environ 90 mètres, il est nécessaire de ne pas considérer de points trop près du lieu de référence. En effet, plus un relief est proche, plus il risque d'occulter le relief qui se trouve derrière. Si le rayon d_{min} est trop court, la ligne d'obstruction risque d'être fautive à cause de la précision verticale. La distance d_{max} peut théoriquement être la plus grande possible afin de prendre en compte le relief visible de façon exhaustive. Néanmoins, il n'est pas

nécessaire de prendre en compte le relief au-delà d'une certaine limite. D'une part, en raison de la courbure de la planète et d'autre part, pour la même raison invoquée précédemment, c'est-à-dire que plus une obstruction est loin plus ses chances d'être occultée par une obstruction moins éloignée est grande. Cette distance dépend du lieu considéré, par exemple le mont Everest peut cacher le soleil jusqu'à une très grande distance : à Lyon, le mont Blanc peut être considéré de la même façon. Pour l'estimation du relief lointain situé autour de la maquette, les valeurs prises en compte se trouvent entre 500 m et 15 km. Au-delà de 15 km, le relief n'a plus aucun impact.

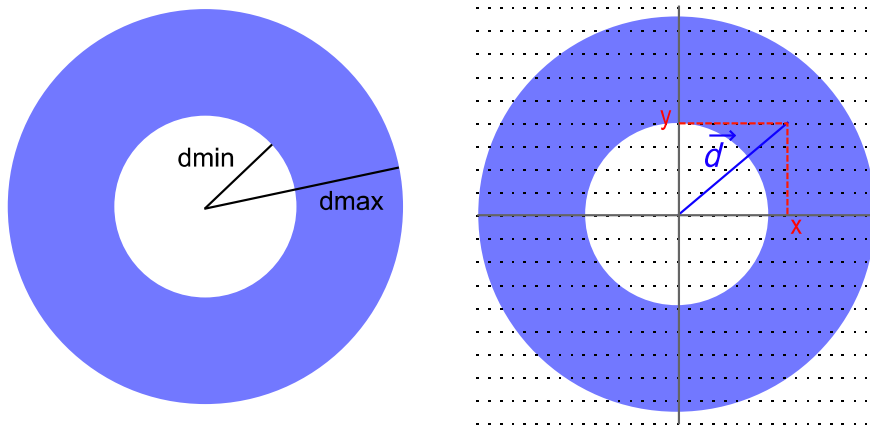


Figure III-41 : Anneau utilisé pour estimer le relief

La base de données SRTM a été divisée en plusieurs fichiers contenant chacun les informations d'altitude pour une maille carrée de 1° de côté. Ce découpage permet de limiter la quantité de mémoire vive nécessaire au fonctionnement du programme de calcul. Le cercle bleu sur la Figure III-42 représente la limite supérieure de l'anneau considéré. Seules les mailles qui ont une intersection avec cette limite sont utilisées soit un maximum de quatre.

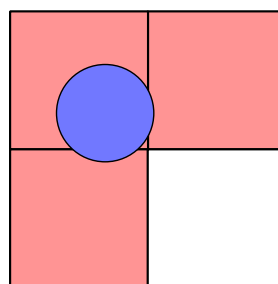


Figure III-42 : Prise en compte des mailles significatives

Il est possible de représenter chaque point résultant de la discrétisation de la surface du globe par un point sur une maille. La Figure III-41 illustre la position de l'anneau sur cette maille, la distance euclidienne de chaque point par rapport au centre peut être calculée à l'aide de ses coordonnées si l'on considère un repère centré sur le lieu de référence. Le maillage est régulier lorsque l'on considère une distance angulaire entre chaque point, mais la conversion de cette distance en mètres ne préserve pas cette propriété et nécessite de connaître la latitude de chaque point. Dans ce but il faut calculer la distance orthodromique

qui correspond au chemin le plus court entre deux points d'une sphère. Il s'agit de la longueur de l'arc du grand cercle qui passe par les deux points A et B de coordonnées (lat_A, lon_A) et (lat_B, lon_B) :

$$D = 2R \operatorname{asin} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{lat_A - lat_B}{2} \right) + \cos(lat_A) \cos(lat_B) \sin^2 \left(\frac{lon_A - lon_B}{2} \right)} \right) \quad (III-13)$$

Pour simplifier les calculs, seule la latitude du point de référence ($45,778466^\circ$) a été utilisée pour tous les points considérés. En théorie, cela entraîne une déformation du relief qui est dilaté au sud et compressé au nord. Sachant que la distance qui sépare le point le plus au sud et le point le plus au nord est de 30 km par rapport au choix du grand rayon de l'anneau justifié précédemment, la distance entre deux point de mesure de même latitude est de 64,7 m au sud et 64,54 m au nord soit une différence de 16 cm ou encore ± 8 cm par rapport au centre. Par rapport à l'incertitude sur la base de données, cette dimension est négligeable.

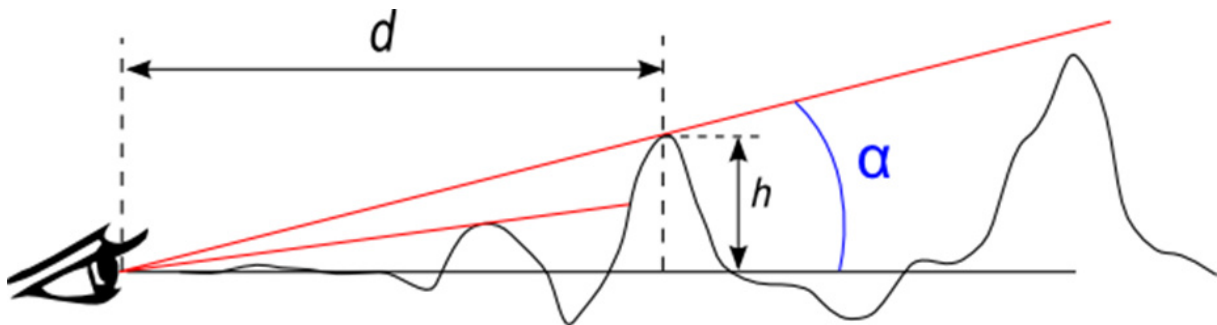


Figure III-43 : Calcul de l'angle d'obstruction

La Figure III-43 est une coupe d'un relief arbitraire. La distance d sépare le point de référence et un point de relief discrétisé situé à l'altitude h . L'angle d'obstruction est calculé simplement de la façon suivante :

$$\alpha = \operatorname{atan} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (III-14)$$

Ce type de donnée ne prend pas en compte l'évolution annuelle de la végétation et les constructions humaines. En effet, la présence de constructions et le feuillage variable des arbres s'ajoutent à la ligne d'horizon précédemment déterminée. Les relevés effectués à l'aide de la technologie LIDAR peuvent fournir une représentation en 3D détaillée mais ne sont pas adaptés à la situation. En effet, il faut considérer une surface au sol très grande et ce type de mesures est coûteux donc peu disponible et rarement mis à jour. La solution la plus adaptée consiste en fait à déterminer les obstructions à partir d'une photographie. L'objectif de type fisheye se prête tout à fait à ce genre d'application, c'est le sujet de la section suivante. Après la description de cette méthode photographique, une comparaison entre les obstructions obtenues à partir des deux approches sera effectuée.

III.2.2.2. À partir d'une photo avec objectif fisheye

La distance focale de l'objectif fisheye est très courte (4,5 mm pour l'objectif utilisé) ce qui lui confère un angle de champ atteignant les 180°. Cette propriété permet donc d'obtenir avec un seul cliché, pris à l'horizontal, l'ensemble du relief visible à l'endroit où se trouve l'appareil. Des lentilles très incurvées sont utilisées pour obtenir un angle de champ aussi élevé, cela induit des distorsions (Shah et Aggarwal, 1996). Ces distorsions doivent être évaluées afin de pouvoir traiter l'image obtenue dans le but de déterminer la hauteur du relief.

Méthode pour déterminer l'obstruction

L'image produite par un tel objectif est un disque. Étant donné que le capteur de l'appareil photo est rectangulaire, ce disque est plus ou moins centré dessus et le reste de l'image est noir, comme on peut le voir sur la Figure III-44. Un objectif fisheye effectue une projection de l'espace proche de la projection équidistante. L'annexe I présente la projection réalisée par l'objectif fisheye que nous avons utilisé. Il existe une relation quasi linéaire entre l'angle de vue d'un pixel et sa distance par rapport au centre du disque projeté.

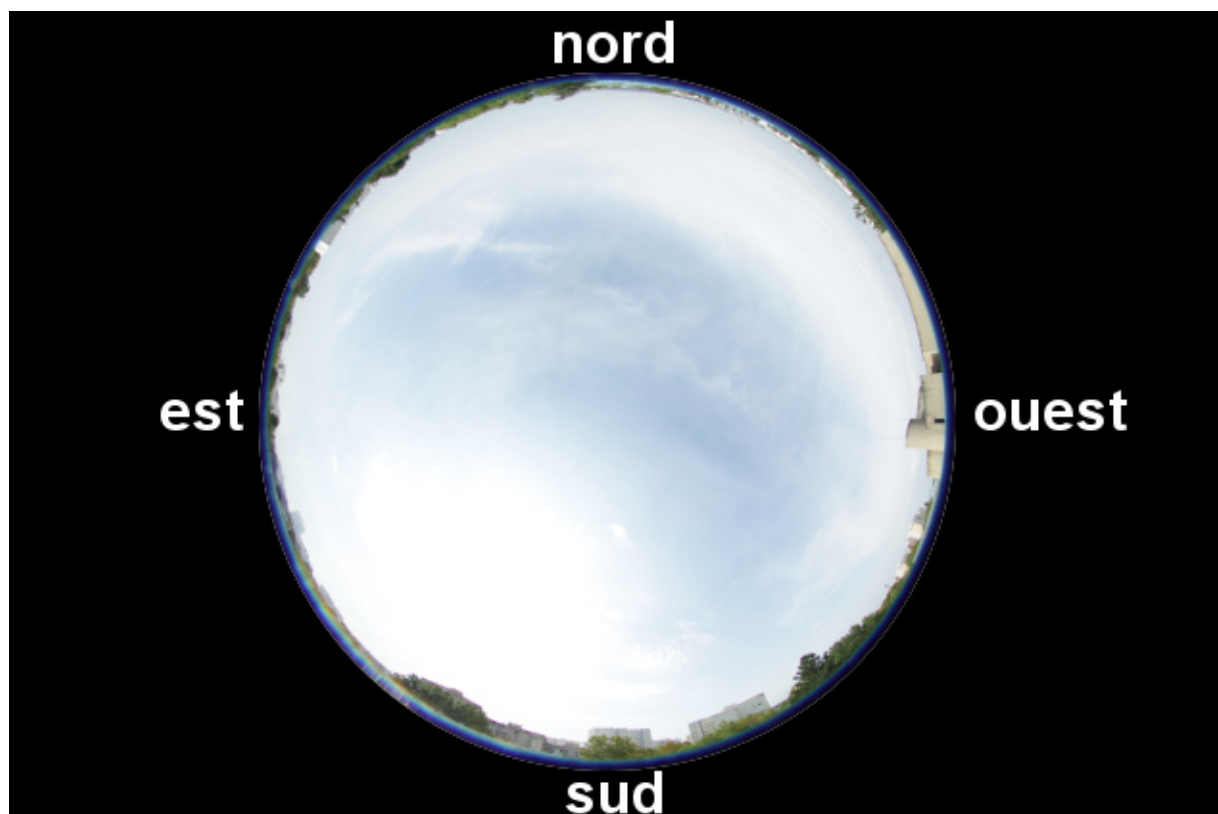


Figure III-44 : Image prise avec un objectif fisheye depuis le centre de la maquette avant la mise en place des façades, avec un axe de prise de vue vertical

L'appareil a été placé au centre de la maquette et réglé pour que l'axe focal soit orienté vers le zénith, pour cela il suffit de contrôler l'horizontalité du plan tangent à la lentille extérieure de l'objectif (à l'aide d'un niveau à bulle sphérique par exemple). L'orientation

du boîtier a été ajustée pour pouvoir repérer le sud sur l'image obtenue. La photo a été prise en utilisant un retardateur de 2 secondes afin d'éviter le flou de bougé. Le boîtier utilisé est un Canon EOS 50D réglé en mode automatique. L'objectif Sigma 4,5 mm f/2,8 a été utilisé avec une mise au point réglée sur l'infini. L'ensemble de la procédure est décrite dans l'annexe A.

La limite entre le ciel et les éléments qui créent une obstruction au rayonnement solaire a été tracée manuellement, le résultat est visible sur la Figure III-45. Tout comme pour le calcul du SVF, il est nécessaire de pouvoir distinguer la limite entre les obstructions au ciel et le ciel lui-même. Les logiciels utilisés pour calculer le SVF utilisent une valeur seuil et permettent éventuellement d'éditer manuellement la limite obtenue pour corriger les erreurs éventuelles. La détection automatique des obstructions est assez simple si la photo a été prise sous un ciel sans nuages ; les bâtiments se distinguent alors clairement du ciel bleu. La détection automatique est plus complexe si la photo a été prise par un ciel couvert gris ou blanc. En l'état actuel des choses, un opérateur permet encore d'obtenir les meilleurs résultats pour des photos prises sous n'importe quelles conditions de ciel.

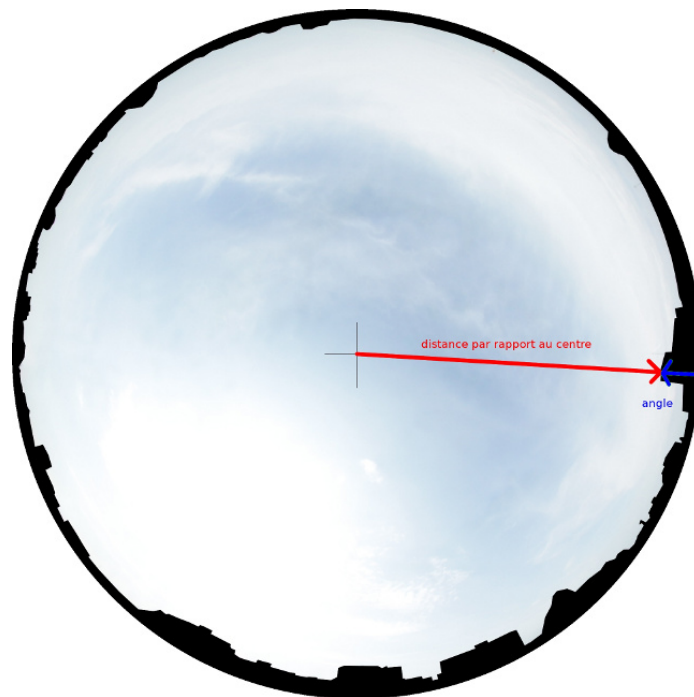


Figure III-45 : Relation entre la hauteur angulaire d'une obstruction et la distance par rapport au centre de l'image du pixel correspondant

L'image obtenue a été analysée avec un programme en Java développé à l'occasion de ces travaux. Cette dernière est lue en coordonnées polaires (θ , r) en partant du centre optique déterminé dans l'annexe I. Pour chaque angle θ allant de 0° à 359° avec un pas de 1° , la couleur du pixel à la distance r est récupérée, tant que le pixel est bleu la valeur de r est incrémentée. Lorsque le pixel est noir, les coordonnées de ce pixel sont stockées. Enfin si le pixel est jaune ou que le précédent était noir, l'angle θ est incrémenté. L'angle du relief est calculé à partir de la distance entre le premier pixel noir et le pixel central en utilisant l'équation caractérisant la projection de l'objectif (annexe I).

III.2.2.3. Combinaison des deux méthodes

L'obstruction totale (relief proche et relief lointain) peut être obtenue pour tout type de configuration du relief en combinant les deux approches photographique et topographique. La façon la plus simple de la représenter est une courbe de l'angle entre le plan de référence et les obstacles en fonction de l'orientation, comme le montre la Figure III-46. L'angle d'obstruction varie entre 0° et 90° et l'orientation correspondante varie entre -180° et $+180^\circ$. Dans notre étude, ce tracé est centré sur le sud, cette convention est utilisée dans les domaines liés à l'exploitation de l'énergie solaire.

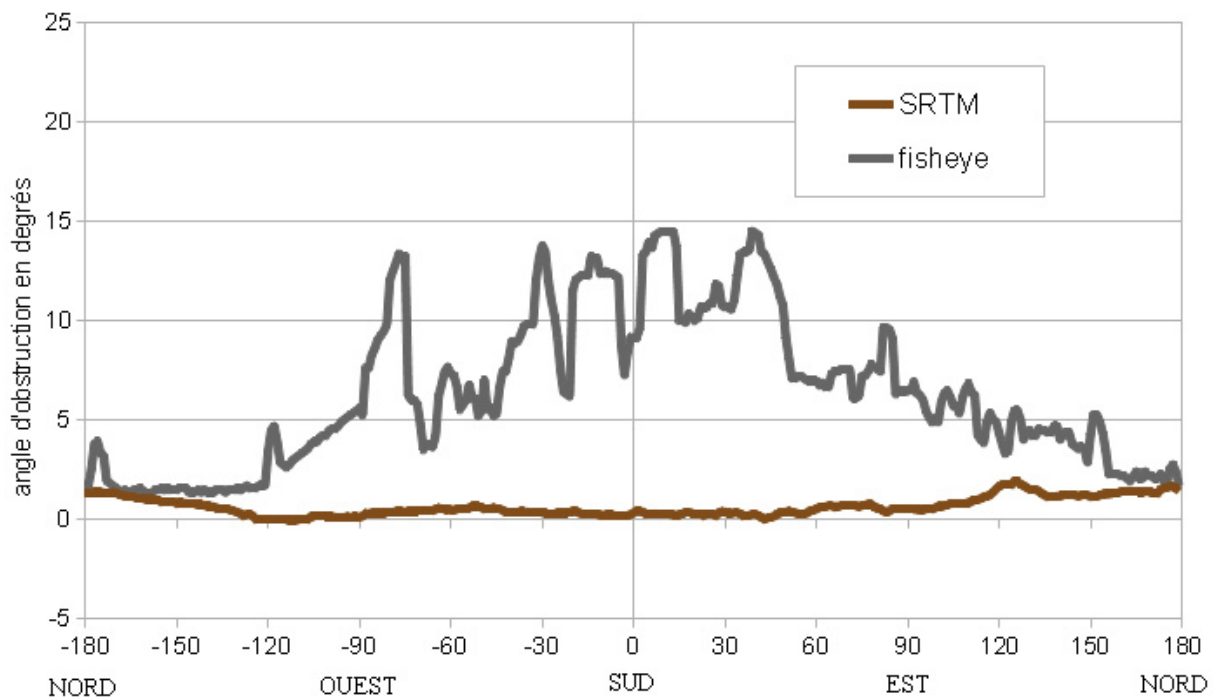


Figure III-46 : Combinaison de l'obstruction obtenue avec les deux méthodes

Le relief donné par la méthode basée sur des relevés topographiques (SRTM) est systématiquement inférieur au relief vu par l'objectif fisheye. Étant donné la configuration du relief montagneux autour du site, ces résultats représentent la réalité et ont pu être vérifiés visuellement. Quoiqu'il en soit, la combinaison des deux méthodes doit être effectuée pour garantir la meilleure représentation possible de la ligne d'obstruction. Néanmoins, la méthode photographique peut être suffisante en milieu urbain en fonction du lieu considéré. Par exemple, pour une photo prise à l'intérieur d'une rue, l'obstruction créée par les bâtiments est tellement importante du fait de leur taille et de leur proximité que le relief lointain est totalement masqué. En revanche si la photo est prise sur le toit d'un bâtiment, pour l'installation de panneaux photovoltaïques par exemple, l'utilisation de cette méthode seule peut être insuffisante pour caractériser avec exactitude le relief avoisinant en fonction de la hauteur du bâtiment par rapport à la canopée urbaine dont il fait partie.



Figure III-47 : Correspondance entre le relief calculé (en rouge) et une photo panoramique centrée sur le sud

La Figure III-47 permet de constater que le relief qui a été déterminé à l'aide de la méthode précédemment décrite correspond assez bien à la réalité. La photo panoramique a été générée à partir de clichés pris en hiver plus d'un an après la prise de la photo fisheye sur laquelle le relief a été repéré, qui avait été faite en été. Il est donc possible de constater quelques différences notamment au niveau de la végétation : le feuillage de certains arbres étant tombé pour la saison, la ligne d'obstruction rouge peut légèrement surestimer le relief réel. Ce point est intéressant car en milieu urbain, la végétation peut représenter une obstruction importante, notamment en proximité de parcs. La détermination du relief avec la méthode photographique doit être effectuée durant une période où la végétation est représentative du reste de l'année.

Sur la Figure III-47, le relief en rouge a été ajusté manuellement (distorsion de l'enveloppe) pour pouvoir être positionné correctement. Pour effectuer ce positionnement automatiquement, il aurait fallu caractériser la déformation de l'objectif utilisé et prendre des photos à intervalles réguliers pour générer le panorama. Le panorama qui est présenté a été réalisé uniquement en maintenant l'appareil horizontalement afin de centrer la ligne d'obstruction au centre de l'image. Cependant, il est possible d'imaginer une méthode utilisant une série de photos (fisheye ou non) avec un axe de prise de vue horizontal et combinées pour former une image panoramique dans le but de déterminer les angles de la ligne d'obstruction. Cette méthode permettrait d'éviter de concentrer la détermination de la hauteur des obstructions sur le contour du cercle, là où les aberrations optiques de l'objectif sont les plus importantes. Toutefois, la méthode présentée a l'avantage de n'utiliser qu'une seule photo. En effet, en utilisant plusieurs photos, il faut s'assurer que l'appareil est correctement positionné pour chacune d'entre elles, ce qui peut générer des erreurs et des difficultés de mise en œuvre.

La Figure III-48 représente les obstructions déterminées précédemment, sur un diagramme solaire. Ce graphique permet d'apprécier visuellement (en bleu) les périodes de l'année pendant lesquelles le soleil est caché par les obstructions. On peut voir ainsi qu'aux alentours du solstice d'hiver, le soleil se trouve derrière un bâtiment jusqu'à environ 10 heures du matin. Le diagramme solaire a été généré à partir du serveur Satel-Light, pour les coordonnées géographiques exactes de la maquette. Le serveur Satel-Light est issu d'un projet européen et propose gratuitement des données sur la disponibilité du rayonnement solaire et de la lumière naturelle dans toute l'Europe (Fontoynt *et al.*, 1999).

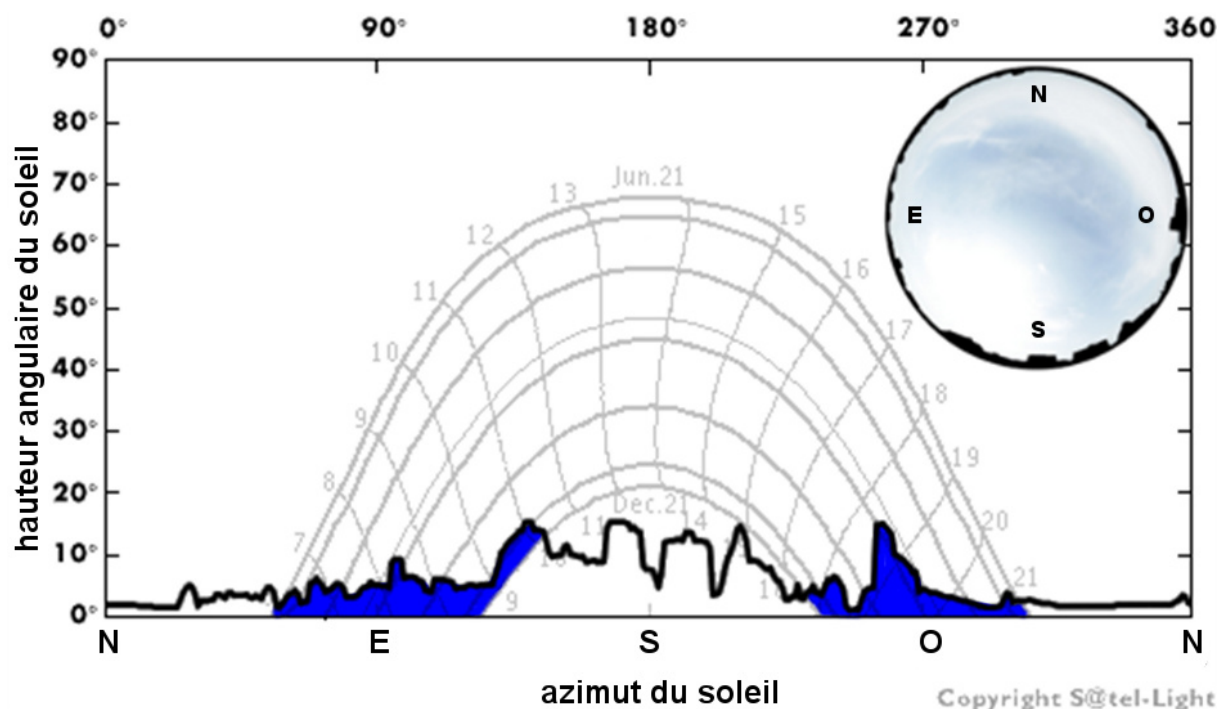


Figure III-48 : Obstruction intégrée au diagramme solaire

Nous avons détaillé un protocole permettant de caractériser en un lieu donné, les obstructions au rayonnement solaire du ciel et du soleil. Ces obstructions doivent être prises en compte par les logiciels de calcul d'éclairéments lumineux ou énergétiques. La section suivante décrit et illustre une méthode permettant de créer une représentation en 3D de ces obstructions.

III.2.2.4. Génération d'un fichier 3D des obstructions

La ligne d'obstructions telle que calculée précédemment est disponible en deux dimensions. Il est utile de pouvoir disposer d'une version 3D de celle-ci. D'une part, cela nous permet de la visualiser correctement. D'autre part, cela nous permet de l'ajouter à la description du canyon urbain dans les logiciels qui n'ont pas été prévus pour prendre en compte le relief. Le "rideau" peut être généré si la hauteur angulaire des obstructions est connue, l'intervalle entre chaque orientation dont l'angle d'obstruction est connu, est directement lié à la qualité du rendu final. La Figure III-49 est une vue de ce rideau avec en son centre la maquette.

Le rayon du "rideau" a été choisi pour que les hauteurs angulaires soient respectées. Il a été généré en effectuant une conversion des coordonnées polaires en coordonnées cartésiennes sur la base d'une distance angulaire de 1° entre chaque point décrivant la ligne d'obstruction. Un programme en python a été développé spécialement pour cette tâche puis exécuté sous Blender, un logiciel libre de modélisation 3D. Le résultat est constitué de quadrilatères collés les uns aux autres, suivant un cercle centré au milieu de la maquette.

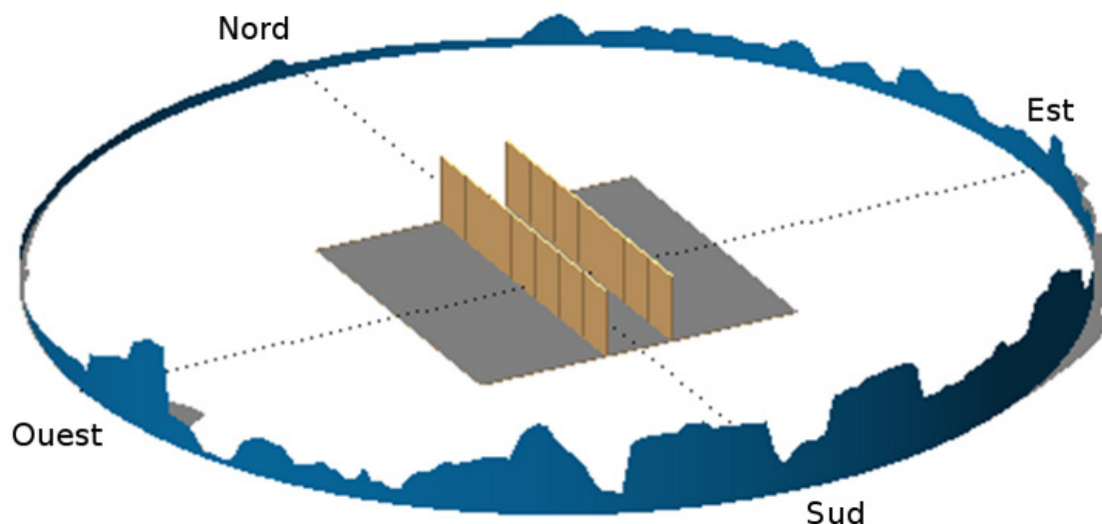


Figure III-49 : Représentation du relief sous forme d'un rideau en 3D

Deux méthodes pour déterminer les masques d'ombrage ont été décrites dans cette section. Leur utilisation peut être combinée afin d'obtenir la ligne d'obstruction la plus proche possible de la réalité. La prise en compte des obstructions est nécessaire pour pouvoir comparer les mesures effectuées sur la maquette avec les calculs des logiciels.

Ces deux méthodes peuvent être utilisées pour tout type d'application concernant la mesure ou l'exploitation de l'énergie solaire. Comme les modèles 3D des villes sont encore rares, elles constituent le seul moyen de déterminer l'accès au soleil d'un toit en milieu urbain. Dans le domaine PV, pour lequel l'accès au soleil est un paramètre critique, la connaissance de l'ombrage est indispensable pour valider la viabilité économique d'une installation.

III.2.3. Mesure des éclairements lumineux sur la maquette

Des sondes photométriques ont été installées pour mesurer l'éclairage énergétique dans le canyon. Afin de limiter les effets de bord, les sondes ont été placées au centre de la rue. Un nombre impair de façades (cf. Figure III-32) a été choisi et les sondes ont été placées au milieu des façades centrales. Les sections suivantes traitent du choix des sondes et de leur mise en service.

III.2.3.1. Choix et positionnement des sondes

Les sondes de marque LI-COR et de référence LI-210 ont été choisies pour être intégrées à la maquette (cf. Figure III-50), ce modèle a déjà été utilisé dans le cadre d'une comparaison entre des simulations et des mesures (C. F. Reinhart et Walkenhorst, 2001). Il s'agit de capteurs photométriques basés sur une cellule au silicium fournissant un courant proportionnel à la quantité d'éclairage lumineux qui est rassemblé par le diffuseur.



Figure III-50 : Photo d'une sonde LI-COR de type LI-210, modèle qui a été utilisé sur la maquette

La Figure III-51 est un graphique donné par le constructeur, il s'agit de la superposition de la réponse spectrale des sondes avec la sensibilité spectrale relative de l'œil définie par la CIE (CIE, 2007). Le fait que l'écart entre les deux courbes soit faible montre une bonne qualité des sondes à mesurer un éclairage lumineux. L'écart des valeurs pour le modèle LI-COR est inférieur à $\pm 5\%$ par rapport aux valeurs de la CIE.

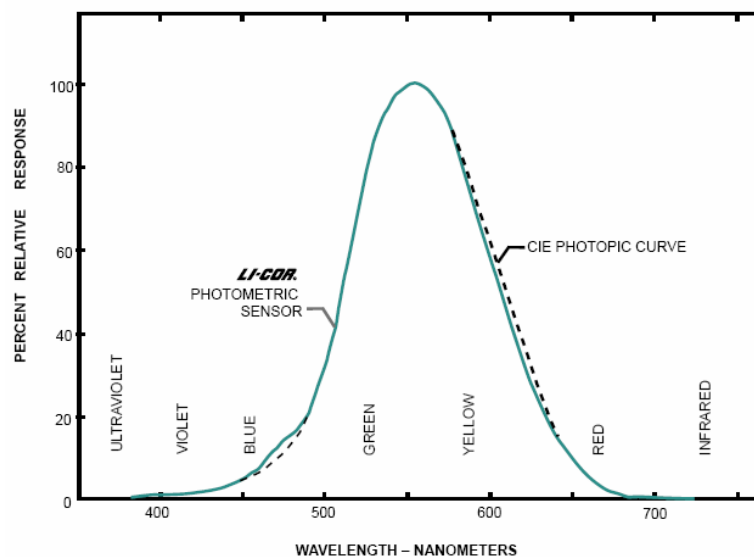


Figure III-51 : Réponse spectrale des cellules LI-COR (données fabricant)

La sonde est un cylindre noir de 23,8 mm de diamètre et d'une hauteur de 2,54 mm à la base duquel se trouve le câble qui transporte les données (cf. Figure III-50, 52 et 58). Le matériau blanc diffusant (thermoplastique PMMA) constitue la partie sensible de la sonde. Sa propreté a été vérifiée régulièrement afin d'éviter de fausser les mesures. Les sondes ont été utilisées à l'extérieur pendant un an, ce matériau a donc reçu à l'occasion des déjections d'oiseaux, des poussières déposées par la pluie ou amenées par le vent.

Grâce à leur forme cylindrique, les capteurs ont pu être intégrés dans les façades. Les trous ont été effectués à l'aide d'une perceuse à colonne pour pouvoir positionner les cylindres horizontalement avec la plus grande précision possible. À gauche de la Figure III-52 se trouve une photo du dos de la façade centrale une fois les capteurs en place.

Chaque sonde est numérotée et leur position est repérée. La photo de droite montre l'intégration des capteurs vus de l'intérieur du canyon.



Figure III-52 : Intégration des sondes dans les façades

Il y a 13 sondes au total sur la maquette à raison de 6 sur chaque façade centrale et une au sol au milieu de la rue. Toutes les sondes se trouvent sur une même coupe du canyon. La numérotation des sondes est visible en annexe F. Le nombre de sondes a été choisi en fonction de leur taille et de la hauteur des façades. Le choix de la hauteur des façades est expliqué dans la section III.2.1. L'idée sous-jacente au choix du nombre et de la position des sondes a été d'associer chacune d'entre elles à un milieu d'étage. Il aurait été intéressant de créer un maillage régulier sur chaque façade du canyon, cela aurait permis d'analyser l'influence des effets de bord. Cependant la taille des capteurs ne permet pas d'en utiliser un grand nombre sans modifier le revêtement des façades. En remplaçant des portions de façade par des sondes, on modifie le comportement de la lumière et cela donne des résultats moins justes.

Les 6 sondes ont été disposées sur toute la hauteur d'une façade centrale avec un intervalle constant de 6,7 cm. Sachant que l'échelle de la maquette est 1/50^{ème}, la hauteur réelle des étages qui sont représentés est de 3,3 m. Cette valeur est représentative de la hauteur d'étage que l'on trouve à Lyon. Le PLU de Lyon prévoit qu'un immeuble dont la hauteur est comprise entre 16 m et 20 m doit posséder 6 niveaux (Grand Lyon, 2011). Compte tenu de l'échelle de la maquette, la partie sensible de la sonde (le diffuseur) représenterait sur la façade réelle, un cercle d'un diamètre de 36 cm.

Le Tableau III-6 montre les hauteurs correspondantes des sondes sur la maquette par rapport à un bâtiment mesurant 20 mètres de haut. La sonde la plus près du sol est à une hauteur de 3,6 cm, ensuite les sondes sont séparées d'une distance de 6,7 cm.

| Hauteur sur la maquette | Hauteur en réalité |
|--------------------------------|---------------------------|
| 36,8 cm | 18,4 m |
| 30,1 cm | 15,1 m |
| 23,4 cm | 11,7 m |
| 17,0 cm | 8,5 m |
| 10,3 cm | 5,2 m |
| 3,6 cm | 1,8 m |

Tableau III-6 : Correspondance entre la hauteur des sondes sur la maquette et la hauteur correspondante sur un bâtiment de 20 m de haut.

Les éclairagements lumineux mesurés par les sondes peuvent être assimilés à l'éclairage reçu au niveau d'une fenêtre d'un étage. Les données mesurées dans notre étude peuvent donc être utilisées pour calculer la quantité de lumière entrant à l'intérieur des pièces des différents étages de canyons urbains ayant différents revêtements, différents rapports d'aspect, pour des conditions climatiques différentes...

III.2.3.2. Vérification de la correction en cosinus des sondes

Si l'on considère une source ponctuelle d'intensité I dans la direction d'un élément de surface, l'éclairage que cette source produit sur l'élément de surface est proportionnel au cosinus de l'angle d'incidence de la source avec la surface. Les instruments de mesure : luxmètre, pyranomètre, sont équipés d'un élément diffusant dont le comportement en transmission se rapproche de la loi en cosinus. L'idéal est de suivre parfaitement la loi du cosinus, cependant la plupart des capteurs disponibles ne la suivent plus au-delà d'un angle d'incidence de 85° . Les sondes LI-210 sont équipées d'un tel élément. Ce dernier effectue cette correction jusqu'à 80° , au-delà, l'erreur de mesure augmente fortement comme le montre la courbe nommée LI-COR sur la Figure III-53 (en violet).

Cette courbe a été obtenue à partir de la données fournies dans la documentation de la sonde (LI-COR, 2005) et représente le taux d'exactitude ou "Percent True Response" PTR d'une sonde corrigée en cosinus exprimé en pourcentage, il s'agit de l'écart entre la réponse de la cellule et la réponse théorique en fonction de l'angle d'incidence. La valeur des points est calculée de la façon suivante :

$$PTR = \frac{v(\theta)}{v(0) \cos \theta} \quad (III-15)$$

Avec $v(\theta)$ la valeur donnée par la sonde pour un angle θ et $v(0)$ la valeur pour un angle de 0° soit à la normale de la surface du capteur. Idéalement, la forme de cette réponse est une ligne horizontale à 100%, cela signifie alors que quel que soit l'angle d'incidence, la sonde produit une valeur correcte. La courbe donnée par le constructeur montre qu'à partir de 60° la réponse de la sonde devient moins juste et qu'au-delà de 80° les mesures ne sont plus exploitables. Il est intéressant de vérifier que la réponse en cosinus des sondes qui seront utilisées sur la maquette est bien fidèle aux indications fournies par le fabricant.

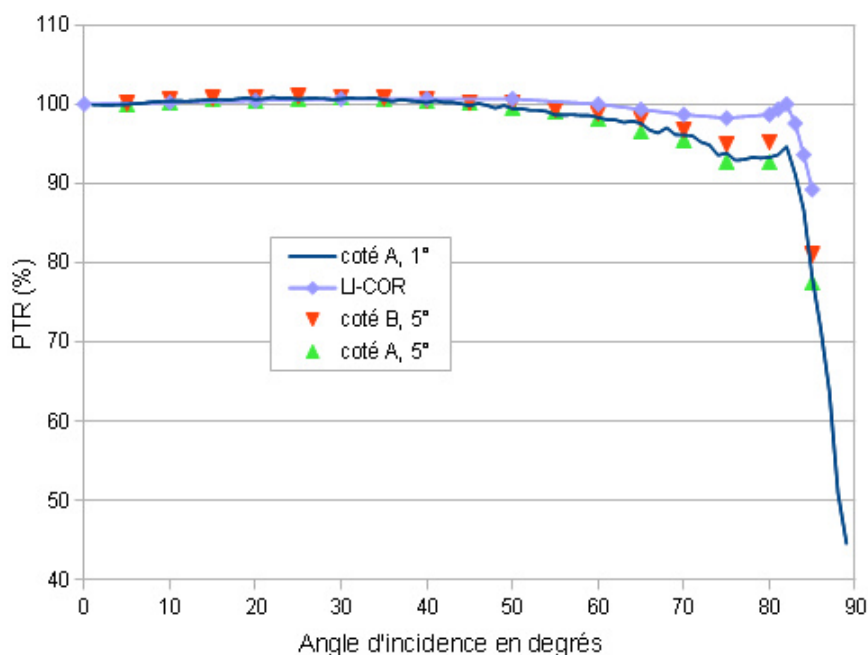


Figure III-53 : "Percent True Response" mesuré en laboratoire avec un goniomètre

Un montage similaire à celui de l'annexe I a été mis en place en laboratoire afin d'effectuer cette vérification. Une sonde a été placée au centre d'un goniomètre. Une source de lumière à incandescence ponctuelle a été montée sur le bras du goniomètre face à la sonde. Le courant émis par la sonde a été mesuré pour des angles d'incidence de la source variant de -90° à 90° . L'éclairement a été vérifié à plusieurs reprises durant les mesures à l'aide d'un luxmètre étalon afin de garantir la stabilité de la source lumineuse. Toutes les mesures ont été menées dans l'obscurité, dans une pièce aux parois noires pour éviter toute contribution lumineuse ne provenant pas de la source. Les mesures sont présentées dans la Figure III-53.

Les côtés A et B représentent des mesures effectuées respectivement de 0° à 90° et de 0° à -90° , cela permet de doubler les mesures en un seul montage. Sur le côté A, deux séries de mesures ont été effectuées, la première tous les 1° et la seconde tous les 5° . Le côté B n'a été mesuré que tous les 5° . L'angle d'incidence 0° a fait l'objet d'une mesure systématique entre chaque série pour être sûr que sa valeur ne variait pas dans le temps.

Le premier point remarquable est que les trois séries de mesures se suivent avec un écart type allant de 0,09% (0°) à 1,8% (80°). L'utilisation d'un pas de mesure de 5° semble suffisant au regard de la faible variation de la courbe pour des angles inférieurs à 80° . Le second point remarquable concerne l'allure de la courbe des mesures par rapport à celle donnée par le constructeur. Elle en est proche jusqu'à un angle incident supérieur à 45° puis elle s'en éloigne pour s'en écarter fortement au-delà de 80° . Jusqu'à un angle d'incidence de 60° , le PTR est supérieur à 98,5%, c'est la valeur minimale définie par la CIE dans son guide des bonnes pratiques concernant la mesure de la lumière naturelle (CIE TC 3.07, 1994).

La Figure III-54 montre que plus l'angle d'incidence augmente, plus l'écart avec le PRT donné par le constructeur augmente : -1% (50°) à -5% (80°). Le constructeur indique,

dans sa documentation, une erreur de $\pm 5\%$ pour des angles d'incidence inférieurs à 80° , c'est ce que l'on retrouve avec nos mesures.

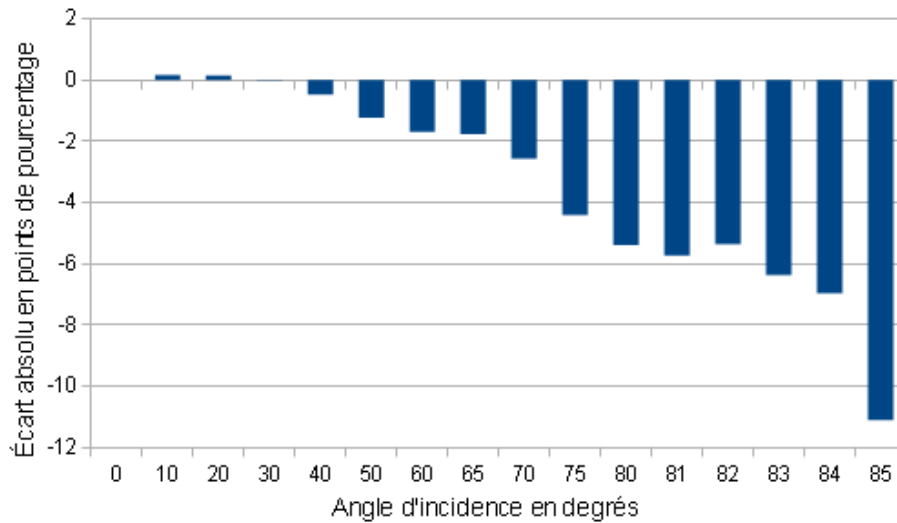


Figure III-54 : Écart entre les valeurs mesurées de PTR d'une sonde en fonction de l'angle d'incidence par rapport aux valeurs fournies par le fabricant

L'erreur de correction en cosinus a une influence directe sur la valeur de l'éclairement mesuré lorsque le soleil éclaire directement la sonde. Afin d'évaluer l'amplitude de cette influence, des simulations ont été effectuées avec une correction idéale (*i.e.* qui suivrait parfaitement la loi en cosinus) et la correction mesurée, pour une journée ensoleillée. Les deux corrections possibles du diffuseur n'ont été appliquées qu'à la composante directe de l'éclairement. Les composantes diffuses et directes de l'éclairement ont été calculées à partir du modèle de ciel clair Dumortier (D. Dumortier, 1995). La Figure III-55 représente pour la journée du 21 juin 2012, l'écart relatif entre l'éclairement lumineux global horizontal obtenu avec une correction idéale et avec la correction mesurée.

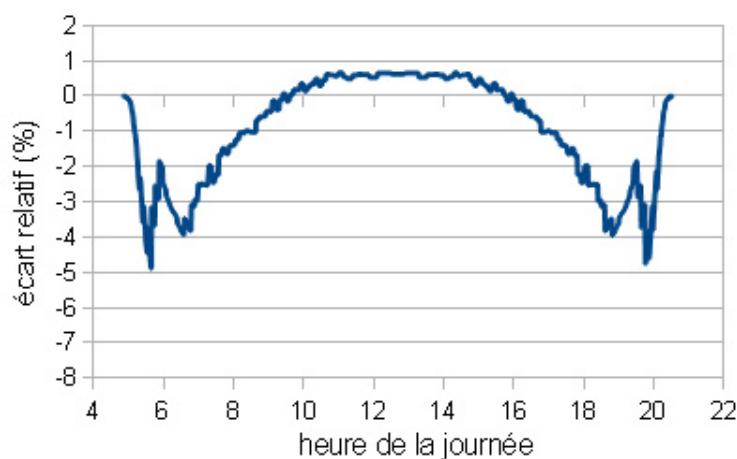


Figure III-55 : Écart relatif entre les éclairagements lumineux pour un plan horizontal avec correction en cosinus idéale et la correction réelle (heures d'hiver)

L'écart est compris en -5% et 1%. Il varie tout au long de la journée en fonction de l'angle d'incidence entre le soleil et le diffuseur. Cette comparaison montre que les sondes LI-COR placées à l'horizontale ont tendance à sous-estimer les éclairagements lumineux dès lors que le soleil est visible.

Sur la maquette, seule une des sondes est placée à l'horizontal, les 12 autres sont placées à la verticale. Il est donc nécessaire d'étudier l'influence de la correction réelle des sondes sur la mesure de l'éclairage vertical par ciel ensoleillé. Le même calcul a donc été effectué en considérant un plan incliné à 90° et orienté face à l'est. Étant donné que le canyon de la maquette est resté orienté selon l'axe nord/sud, cela permet d'obtenir des informations importantes pour l'analyse des résultats. Comme précédemment, l'éclairage lumineux diffus horizontal et l'éclairage direct normal ont été calculés à partir du modèle de ciel clair Dumortier, seule la contribution directe a été corrigée en cosinus. La journée correspond au 21 juin 2012. L'éclairage diffus vertical dans le plan de la cellule a été calculé à partir du modèle de Perez (Perez *et al.*, 1990). Aucune obstruction n'a été prise en compte. La Figure III-56 montre les valeurs d'éclairage lumineux obtenues avec une correction idéale et la correction réelle.

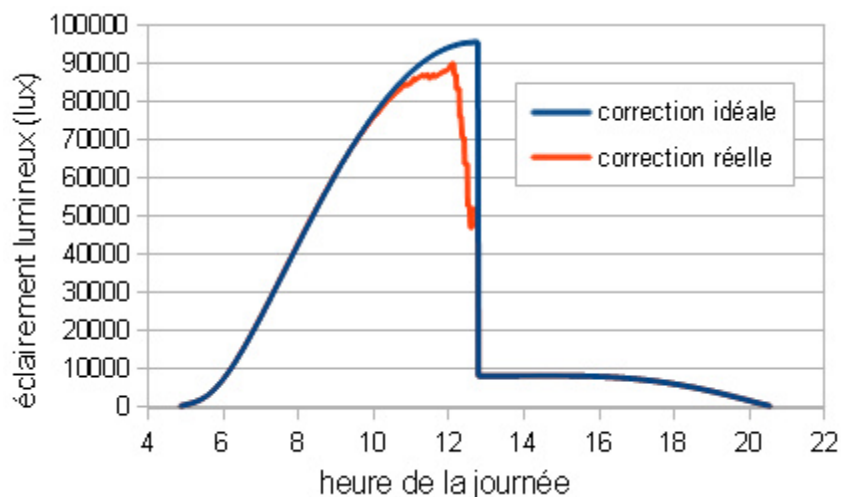


Figure III-56 : Éclairage lumineux modélisé pour un plan vertical orienté vers l'est, avec une correction en cosinus idéale et réelle

Les éclairagements lumineux verticaux sont en très bon accord en début de journée car l'angle d'incidence du soleil avec la cellule est faible. À partir de 10h, l'éclairage lumineux vertical modélisé avec la correction réelle devient plus faible que celui modélisé avec la correction idéale. L'angle d'incidence devient de plus en plus grand et l'erreur augmente avec lui.

La Figure III-57 montre l'écart relatif entre les deux courbes. Il est largement plus important que pour un éclairage horizontal. Il atteint un maximum de -51% lorsque le soleil se trouve plein sud. Cela correspond à un angle d'incidence proche de 90°, valeur à laquelle le PTR des LI-COR est très différent de la valeur idéale (cf. courbe bleue sur la Figure III-53). L'écart est aussi particulièrement important parce que l'éclairage direct

vaut à ce moment de la journée environ 80% de l'éclairement global. Par symétrie, le même phénomène se produirait l'après-midi pour un éclairement vertical ouest.

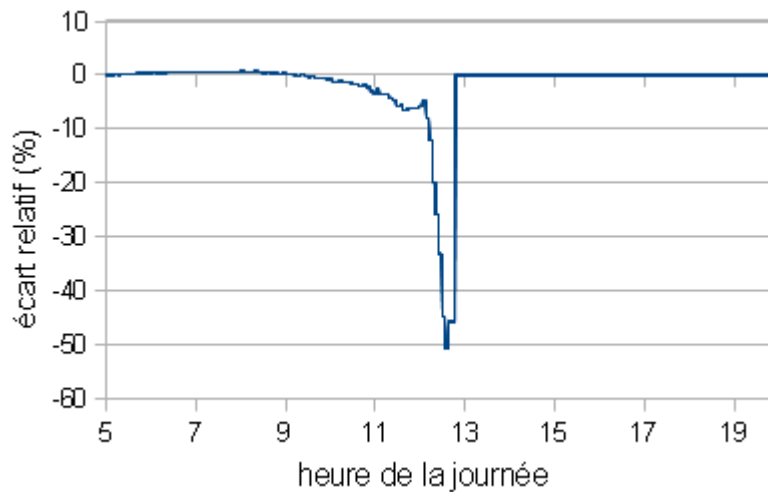


Figure III-57 : Écart relatif entre les valeurs d'éclairement de la Figure III-56

Ces résultats montrent que la correction en cosinus des cellules LI-COR conduit à une sous-estimation des éclairements lumineux mesurés par ciel clair, sous-estimation plus importante lorsque les sondes sont placées à la verticale que lorsqu'elles sont placées à l'horizontale. Nous devons garder cela en tête lors de la comparaison entre les mesures et les résultats des logiciels de simulation car ceux-ci calculent les éclairements en utilisant une correction en cosinus idéale.

III.2.3.3. Étalonnage des sondes

Les sondes LI-COR produisent un courant de l'ordre du milliampère proportionnel à l'éclairement reçu, un signal électrique est donc transmis au système d'acquisition. Ce dernier peut effectuer la conversion en éclairements avant de stocker les données. Pour cela il faut saisir un coefficient multiplicateur qui est propre à chaque sonde. Nous avons déjà présenté un procédé de calcul de ce coefficient dans la section III.1.7.1. Ce coefficient est fourni par le fabricant avec la sonde, il est différent pour chaque sonde et a été établi en enregistrant le courant produit par la sonde sous un éclairement émis par une source lumineuse d'intensité connue. L'incertitude donnée par le fabricant est de $\pm 5\%$. La réponse de la sonde est linéaire avec une variation inférieure à 1% jusqu'à 100 klux, ce qui permet de n'avoir qu'un seul coefficient constant sur toute la gamme de mesure. Les sondes utilisées ont été acquises pour des précédentes expériences et certaines n'avaient plus de coefficient attaché, de plus le vieillissement des cellules a pu engendrer une variation dans la réponse de ces sondes. Le constructeur prévoit un écart inférieur à $\pm 2\%$ par an, sachant que les sondes avaient été achetées 8 ans auparavant, les coefficients ont été recalculés.

La meilleure façon d'étalonner des sondes destinées à mesurer le rayonnement solaire est de les exposer à ce rayonnement et de les comparer à une cellule de référence. Le coefficient d'étalonnage est alors déterminé en divisant l'éclairement fourni par la sonde de référence, par le courant produit par chaque sonde sous le même éclairement. La sonde de

référence utilisée appartient à la station météo IDMP, située à 100 m de la maquette (cf. section II.3.2.4). Il est nécessaire d'utiliser les données de la station IDMP pour les simulations, il était donc légitime de calibrer les sondes situées sur la maquette avec une sonde appartenant à cette station. Cette sonde de référence (modèle LMT BAP 30 FCT) a été étalonnée par la société LMT, l'erreur de sa correction en cosinus en fonction de l'angle d'incidence est inférieure à $\pm 1\%$ pour des angles d'incidence inférieurs à 50° avec un maximum à 8%, la sensibilité spectrale de cette sonde a un degré de correspondance inférieure à 3% par rapport à celle de l'œil définie par la CIE (D. Dumortier, 1995).

Les sondes ont été placées sur un gabarit stable et résistant aux intempéries. Les trous dans lesquels ont été insérées les sondes ont été percés à la perceuse à colonne afin qu'ils soient le plus réguliers et le plus droit possible. Ces précautions garantissent que toutes les sondes bénéficient de la même orientation et de la même inclinaison. Le montage est visible sur la Figure III-58. La plaque est montée en hauteur pour éviter de subir les ombres induites par des éléments de la maquette alors en cours de construction.

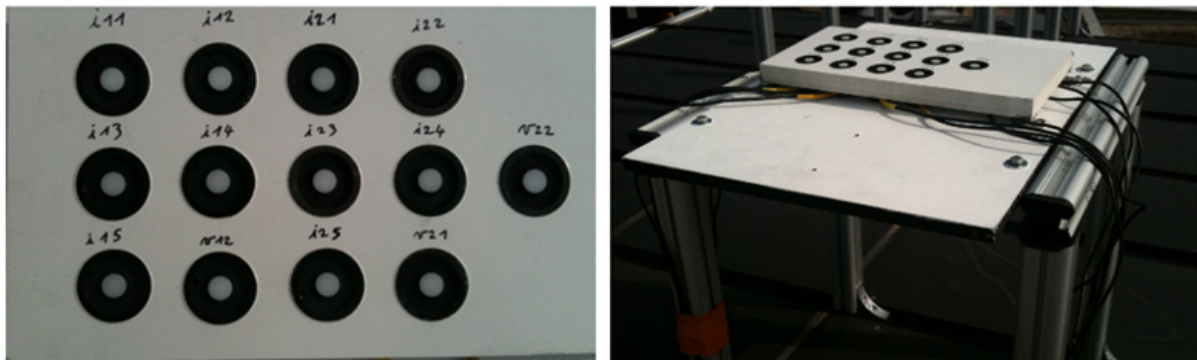


Figure III-58 : Montage utilisé pour déterminer les coefficients d'étalonnage des sondes

Une fois le réglage de l'horizontalité fini, l'ensemble du système a été solidement fixé pour éviter toute modification que pourraient entraîner des rafales de vent. Ce dispositif est resté en place pendant 2 semaines (du 05/08/11 au 22/08/11) pour bénéficier d'une grande gamme de niveaux d'éclairement et vérifier la stabilité des résultats sur une certaine durée.

La Figure III-59 représente l'éclairement lumineux pour la journée du 21 août 2011, les données présentées sont celles de la sonde LI-COR i15 et de la sonde de référence située sur la station IDMP. Les valeurs sur le graphique ont été normalisées, pour chaque série, les valeurs ont été divisées par la valeur la plus élevée de la série. Cette méthode permet de juger l'allure des courbes sans avoir besoin de connaître le coefficient de la sonde testée. On peut ainsi voir que les courbes sont très proches mais qu'elles sont légèrement décalées durant l'après-midi, ce type de variation indique (si l'on considère que la sonde de référence est parfaitement horizontale) que la sonde i15 ici en rouge, n'était pas totalement à l'horizontal malgré les précautions qui ont été prises (étape 1 sur la Figure III-60). Ce décalage est visible sur les données des autres sondes avec des écarts se produisant à des moments différents de la journée, l'insertion des sondes à l'intérieur du support n'a pas garanti une horizontalité parfaite. Une plaque en métal de 2 cm d'épaisseur avec des trous de 23,8 cm de diamètre parfaitement perpendiculaires à la surface, équipée de pieds réglables aurait permis d'assurer une bonne horizontalité.

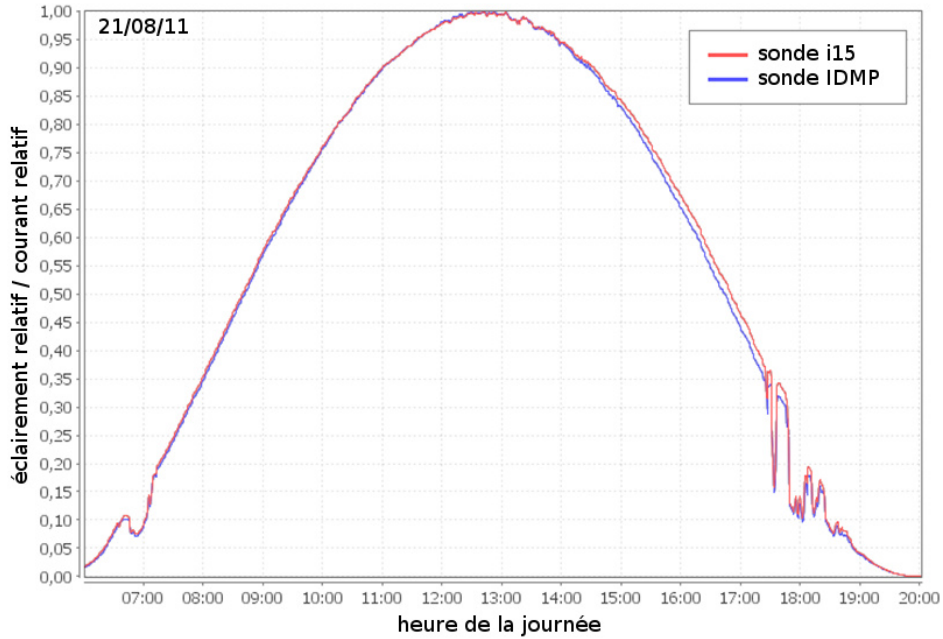


Figure III-59 : Comparaison entre une sonde LI-COR et la sonde de référence

Ne disposant pas des moyens financiers et techniques permettant de construire un tel gabarit, une méthode a été mise en place pour déterminer la position exacte de chacune des sondes à l'intérieur du support. Il s'agit d'utiliser un modèle théorique de calcul d'éclairage pour déterminer l'inclinaison et l'orientation réelles de chaque sonde LI-COR à partir des données recueillies pendant la période de mesures (étape 2 sur la Figure III-60). Les valeurs mesurées par la sonde IDMP seront ensuite transposées dans ce plan non-horizontale afin de les comparer au courant produit par la sonde LI-COR en question.

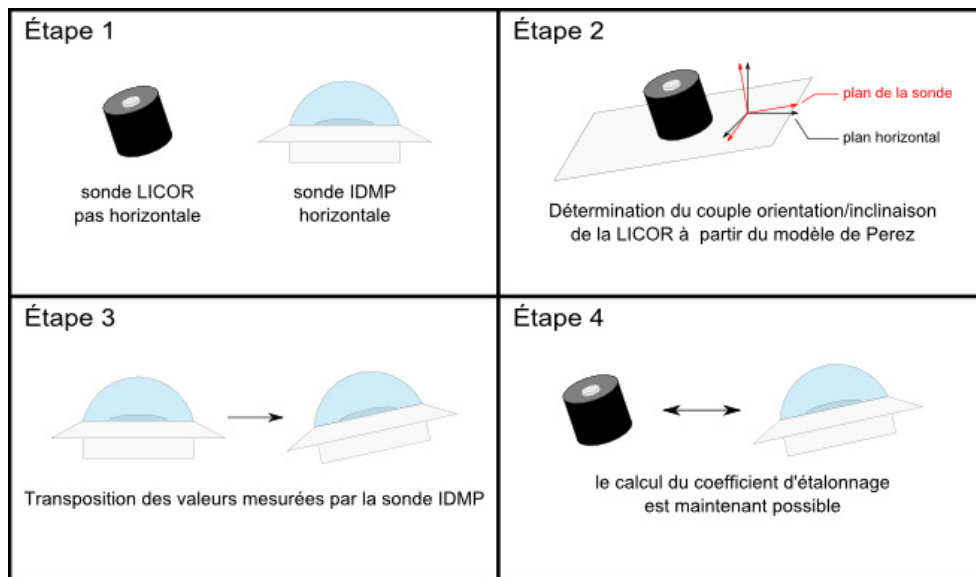


Figure III-60 : Transposition des éclairage lumineux mesurés par la station IDMP dans le même plan qu'une sonde LI-COR

Le 21 août 2011 a été choisi car il représente la journée de ciel sans nuages la plus idéale des 2 semaines de données. Le modèle de Perez (Perez *et al.*, 1990) a été utilisé car il permet de calculer l'éclairement lumineux global sur un plan incliné. Ce modèle utilise l'éclairement lumineux global horizontal, l'éclairement énergétique direct normal et l'éclairement énergétique diffus horizontal, grandeurs qui sont mesurées par la station IDMP. Nous avons utilisé les mesures effectuées entre 6h et 19h30, soit un total de 811 minutes. L'éclairement lumineux global a été calculé sur des plans d'orientation variant de 0° à 359° avec un pas de 1°, et des inclinaisons variant de 0° à 10° avec un pas de 1°. Les valeurs d'éclairement lumineux relatif de la journée obtenues pour les 3600 surfaces d'inclinaison et d'orientation différentes ont été comparées avec les valeurs de courant relatif de chaque sonde LI-COR. L'indicateur qui a été utilisé pour déterminer l'inclinaison et l'orientation de la sonde est l'écart quadratique moyen (EQM) déjà utilisé dans la section II.3.4.2 :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2}{N}} \quad (III-16)$$

L'inclinaison et l'orientation de chaque cellule LI-COR dans la phase d'étalonnage sont celles qui ont conduit à la valeur la plus faible de l'EQM. Il est alors possible de transposer les valeurs mesurées par la sonde de la station IDMP pour le plan orienté et incliné comme la sonde (étape 3 sur la Figure III-60). Cette transposition est effectuée en utilisant à nouveau le modèle de Perez. Le coefficient d'étalonnage de chaque sonde correspond alors à la moyenne des rapports entre l'éclairement lumineux relatif et le courant relatif produit par chaque sonde (étape 4 sur la Figure III-60).

La correction en cosinus étudiée dans la section précédente met l'accent sur le peu de confiance que l'on peut accorder aux données mesurées pour des angles incidents supérieurs à 85°. Le choix de limiter les valeurs à comparer à des heures de début et de fin de journée n'est donc pas pertinent. La méthode appropriée consiste à éliminer les données pour lesquelles l'angle d'incidence du soleil est supérieur à une certaine limite, ici 85°. Puisque les sondes ne sont pas horizontales, cet angle A_{LS} dépend de chaque sonde et se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$A_{LS} = \text{acos}[\sin(\gamma_s) \cos(\gamma_L) + \cos(\gamma_s) \sin(\gamma_L) \cos(\alpha_s - \alpha_L)] \quad (III-17)$$

Avec γ_L et γ_s l'angle d'inclinaison de la sonde LI-COR par rapport à l'horizontal et la hauteur angulaire du soleil, et α_L et α_s l'orientation de la sonde et l'azimut du soleil par rapport au nord. Le Tableau III-7 représente les valeurs d'orientation et d'inclinaison calculées pour chaque sonde et conduisant à l'EQM le plus faible. Ce tableau montre aussi les coefficients d'étalonnage. Les sondes dont les identifiants commencent par la lettre "I" sont des entrées en courant et ceux commençant par la lettre "V" sont des entrées en tension. Le système d'acquisition des données (LI-1400) possède ces deux types d'entrée (cf. section III.2.3.4).

| Identifiant de la Sonde | Orientation par rapport au nord | Inclinaison par rapport à l'horizontal | Coefficient d'étalonnage |
|-------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|
| I11 | 356° | 8° | 2994,7 lux/ μ A |
| I12 | 352° | 7° | 2820,9 lux/ μ A |
| I13 | 354° | 8° | 2858,7 lux/ μ A |
| I14 | 357° | 7° | 2636,6 lux/ μ A |
| I15 | 355° | 7° | 2934,6 lux/ μ A |
| I21 | 358° | 7° | 2916,3 lux/ μ A |
| I22 | 358° | 6° | 6910,3 lux/ μ A |
| I23 | 352° | 6° | 5731,1 lux/ μ A |
| I24 | 351° | 7° | 2675,3 lux/ μ A |
| I25 | 355° | 7° | 2770,2 lux/ μ A |
| V11 | 0° | 6° | 5192,5 lux/mV |
| V21 | 352° | 4° | 8363,5 lux/mV |
| V22 | 352° | 8° | 4315,1 lux/mV |

Tableau III-7 : Orientations et inclinaisons calculées pour chaque sonde à partir de la procédure décrite précédemment

Il est mentionné dans la documentation du fabricant, que les sondes fournissent environ 30 μ A pour 100 klux (soit 3333 lux/ μ A), ce qui n'est pas tout à fait le cas d'après l'étalonnage. Quoiqu'il en soit, les valeurs de courant à mesurer sont faibles. De ce fait, un système d'acquisition adapté a été choisi, il est fourni par le même fabricant que les sondes (LI-COR) et il a été conçu pour fonctionner avec celles-ci.

La Figure III-61 illustre l'intérêt d'avoir pris en compte le fait que les cellules à étalonner n'étaient pas parfaitement à l'horizontal. Nous présenterons l'exemple de la sonde I11. À partir des données du 21 août 2011, deux coefficients d'étalonnage $C_H = 3171,6$ lux/ μ A et $C_T = 2994,7$ lux/ μ A ont été calculés en utilisant les valeurs mesurées par la sonde I11 et les données de la station IDMP brutes (sonde horizontale C_H) ou les données transposées dans le plan de la sonde I11 (pour C_T). La valeur de C_T peut être lue dans le Tableau III-7.

La journée du 21 août, à gauche, correspond à celle qui a permis de calculer les coefficients. La journée du 10 août, à droite, permet de vérifier l'utilisation de ces coefficients pour un autre jour. Le ciel du 10 août était plus nuageux, ce qui explique la plus grande diffusion du nuage de points. Le nuage de points bleus représente les éclaircissements obtenus en utilisant le coefficient C_T , il suit de très près la droite d'équation $y = x$. Cela indique une très bonne corrélation entre l'éclaircissement lumineux obtenu avec la sonde I11 et l'éclaircissement lumineux résultant de la sonde de référence IDMP. Le nuage de points rouges représente les éclaircissements obtenus en utilisant le coefficient C_H , il mène à une surestimation des éclaircissements lumineux.

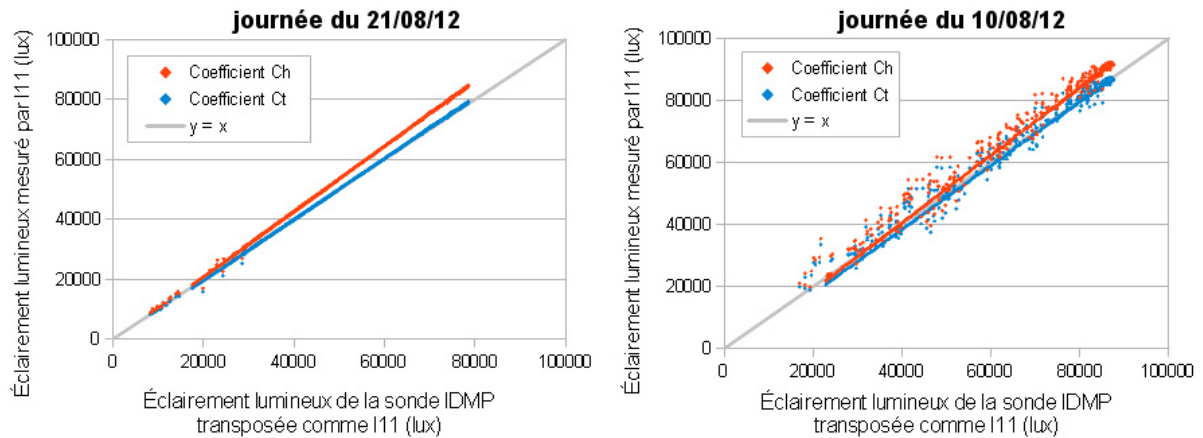


Figure III-61 : Corrélation entre les éclairements lumineux mesurés par la sonde IDMP transposée comme I11 et les éclairements lumineux mesurés par la sonde I11 avec les coefficients C_h et C_t

L'étalonnage des sondes décrit dans cette section permet de garantir que les éclairements lumineux mesurés avec les sondes LI-COR sont parfaitement cohérents avec ceux mesurés par la cellule de référence de la station IDMP. La section suivante présente le système d'acquisition qui permet d'enregistrer les valeurs de courant ou de tension fournies par les sondes. Les coefficients d'étalonnage calculés dans cette section seront appliqués à ces valeurs pour obtenir les éclairements lumineux.

III.2.3.4. Description du système d'acquisition

Le fabricant LI-COR propose des systèmes d'acquisition adaptés aux sondes afin de garantir une bonne qualité de données avec une erreur minimale. Chaque système possède 9 entrées sur lesquelles il est possible de connecter les sondes. Pour les besoins de l'expérimentation, deux enregistreurs LI-1400 ont été utilisés. Pour chaque sonde, l'éclairissement lumineux est mesuré toutes les 15 secondes, la valeur enregistrée est une moyenne de toutes les mesures effectuées pendant la dernière minute écoulée. Cette méthode permet de s'affranchir des mesures erronées pouvant être le fait d'un évènement ponctuel, comme un reflet furtif provenant de l'environnement extérieur à la maquette ou le passage d'un insecte sur la zone sensible des capteurs. Pour chaque appareil, 5 des 9 voies procèdent à l'acquisition d'un courant et les 4 autres mesurent une tension. Sachant que les sondes utilisées produisent un courant, des résistances, fournies par la société LI-COR ("2290 millivolt adapter"), ont été ajoutées au circuit pour effectuer la conversion courant/tension. Ces dernières se branchent en série, elles sont dotées d'une tolérance de 1% (communiquée par le fabricant).

Lors du calcul du coefficient d'étalonnage de chaque sonde (cf. section III.2.3.3), les sondes ont toutes été connectées avec le même schéma de câblage que pour le montage final. Chaque sonde a son entrée attirée dans le système d'acquisition et sa résistance associée, si besoin. L'ajout de la résistance en série modifie la valeur fournie par la sonde, chaque sonde a une réponse propre et les résistances ont-elles-mêmes leur tolérance, il est donc nécessaire de conserver la même configuration pour que les coefficients d'étalonnages soient corrects.

Les entrées en courant sont dotées d'un système permettant d'ajuster la quantification du signal en fonction du niveau d'éclairement. En revanche, les entrées en tension ne disposent pas de ce système. En traitement du signal, la quantification est la notion qui représente la résolution des valeurs d'amplitude que peut prendre un signal analogique lors de sa conversion en valeurs numériques. La résolution des entrées en tension est fixe ($76 \mu\text{V}$) sur toute la gamme mesurable ($\pm 2,5 \text{ V}$), cela signifie que dans le pire des cas, une variation d'éclairement lumineux entraînant une variation de tension inférieure à $76 \mu\text{V}$ ne sera pas remarquée par l'appareil. Cela correspond, en fonction de la sonde, à un écart de 80 lux à 160 lux. Cela est gênant lorsque des valeurs successives diffèrent d'une quantité inférieure à cette résolution : on observe alors des paliers comme ceux de la courbe bleue sur la Figure III-62. Les entrées en courant ne présentent pas cette particularité grâce à leur système s'adaptant automatiquement.

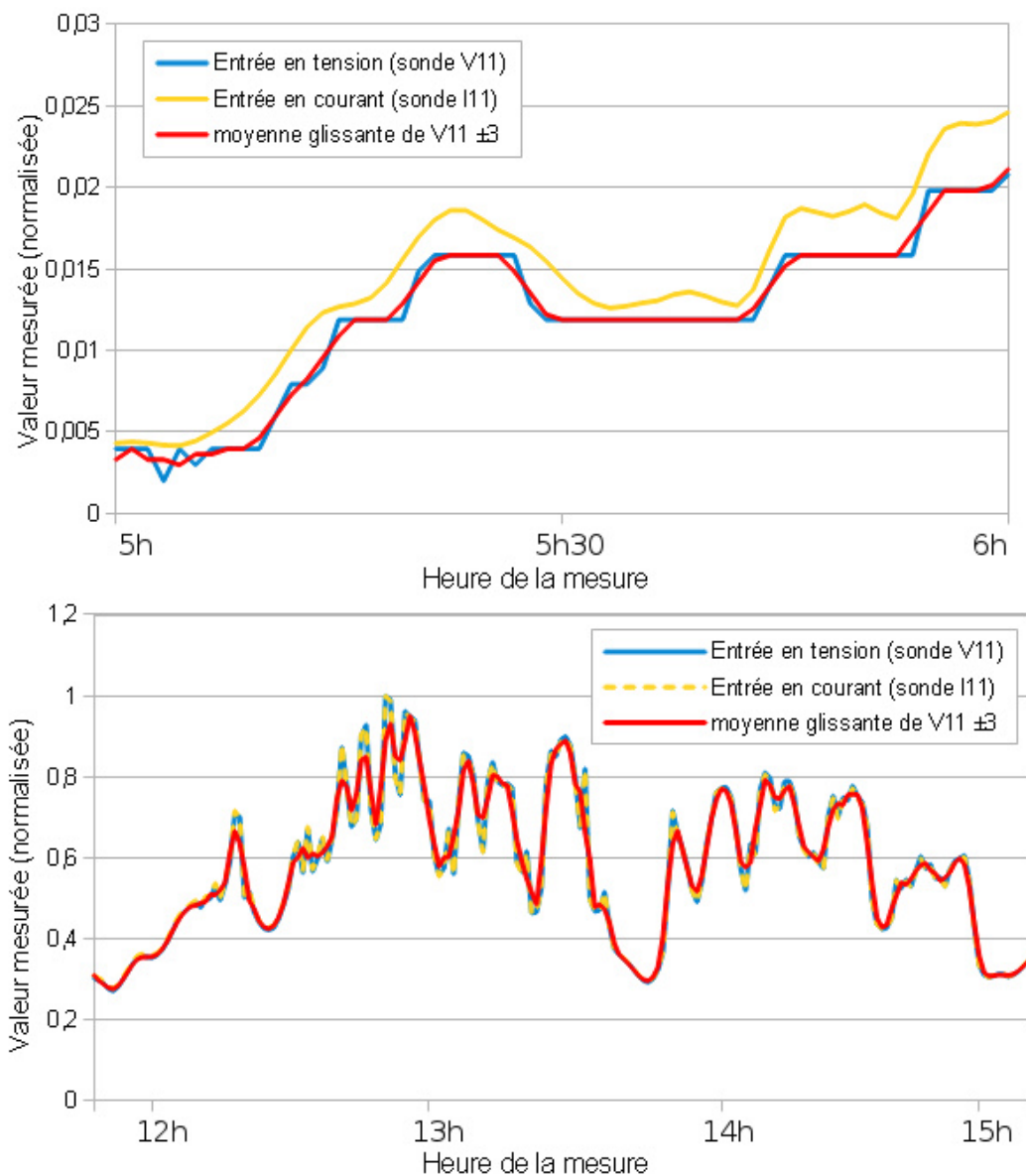


Figure III-62 : Effet de l'utilisation d'une moyenne glissante sur les valeurs mesurées

En pleine journée, l'éclairement lumineux varie suffisamment d'une minute à l'autre pour permettre d'utiliser les entrées en tension sans constater de paliers importants. Néanmoins, en début et en fin de journée, les variations sont plus faibles, et des paliers apparaissent. La Figure III-62 montre qu'un lissage des courbes permettrait de réduire le phénomène. Notons dans ce graphique, que le décalage entre les courbes est normal car les valeurs utilisées correspondent aux données brutes de l'étalonnage. Le lissage consiste ici en une moyenne glissante sur trois valeurs. Le graphique du bas montre que si le lissage est appliqué toute la journée, il entraîne une perte d'information. Ce jour-là, le temps était variable, la moyenne effectuée par le lissage réduit la dynamique des variations de l'éclairement lumineux. Pour cette raison, nous avons décidé de n'appliquer aucun lissage sur les valeurs produites par les sondes reliées en tension. La Figure III-62 montre d'ailleurs que dans la journée, le lissage n'est pas vraiment nécessaire pour obtenir des résultats exploitables.

La Figure III-63 schématise le montage de l'expérimentation qui permet de mesurer et stocker les éclairagements lumineux au sein du canyon urbain au fil du temps. Les enregistreurs sont reliés à un ordinateur avec des connecteurs DB9 faisant circuler l'information avec le protocole RS-232. Trois méthodes peuvent être utilisées pour lire les données contenues dans la mémoire des enregistreurs. La première est de consulter les données directement sur l'écran LCD de l'appareil : c'est suffisant seulement pour contrôler les valeurs lors de tests ou de la mise en place. La deuxième consiste à utiliser le logiciel du constructeur pour consulter les données depuis un ordinateur et les sauvegarder dans un fichier : cette méthode doit être préférée si les données doivent être récupérées peu souvent. La troisième méthode consiste à envoyer des lignes de commande à l'enregistreur via son port série pour transférer les données des enregistreurs sur le disque dur de l'ordinateur. C'est la solution qui a été retenue car elle peut être automatisée de manière à garantir une sauvegarde régulière des données. J'ai réalisé un programme Java spécifique pour cela.

La quantité de mémoire disponible dans chaque appareil est de 96 Ko. La documentation du constructeur permet d'estimer le temps qu'il faut avant que la mémoire ne sature, en fonction du type d'entrée et du taux d'échantillonnage. À raison de 7 sondes (6 pour le deuxième appareil) qui récupèrent des valeurs toutes les minutes de 5h à 23h, il faut à peine plus d'une journée pour occuper tout l'espace disponible en mémoire. Une sauvegarde journalière des données a donc été mise en place et planifiée en dehors de la période d'enregistrement. Chaque fichier sauvegardé correspond à une journée de mesures pour un enregistreur. La récupération automatique des données n'empêche pas d'inspecter quotidiennement l'état de la maquette qui peut être altéré par des déjections d'oiseaux, des feuilles collées sur un capteur, de la poussière ou même le mauvais fonctionnement d'un élément (capteur, fils, connecteur...) qui invaliderait les données.

Nous avons choisi d'enregistrer directement les valeurs de courant produit par les sondes plutôt que des éclairagements lumineux : les coefficients d'étalonnage n'ont été appliqués sur les données qu'au moment de leur analyse. L'heure à laquelle chaque mesure a été effectuée étant déterminée par l'enregistreur, il était important que ce dernier soit synchronisé avec l'horloge de la centrale d'acquisition de la station IDMP. Cette synchronisation a été vérifiée régulièrement. L'ensemble des données a été conservé en utilisant l'heure légale d'hiver, la considération de l'heure légale d'été n'est pas essentielle à la comparaison des mesures avec les simulations, au contraire, cela rajoute un paramètre à

contrôler pour éviter d’avoir des résultats incohérents. L’heure légale est mieux adaptée que l’heure solaire à l’étude des éclairagements lumineux. La disponibilité de la lumière naturelle doit être liée aux activités humaines.

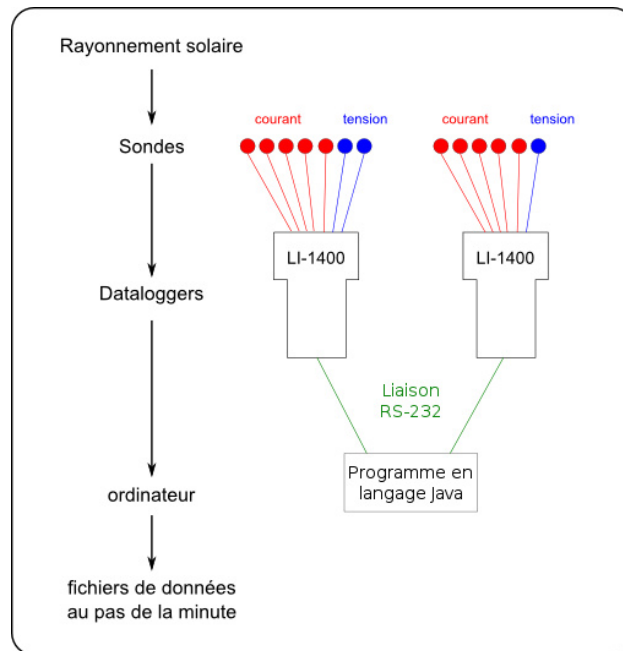


Figure III-63 : Récupération des données

Un autre programme a été développé pour analyser les valeurs mesurées par les sondes pour des journées entières (cf. Figure III-64). Ce programme récupère aussi les données de la station IDMP, ce qui permet par comparaison de vérifier visuellement qu’aucun problème majeur n’est arrivé. Une fonction d’exportation permet d’analyser les données plus en détail dans un tableur. La mise en place d’un système de vérification ergonomique permet d’effectuer des tests quotidiennement, afin de réduire le risque d’erreurs de mesure. Nous allons décrire dans la section suivante l’organisation de la base de données qui recense toutes les mesures effectuées ainsi que les valeurs obtenues à partir des simulations.

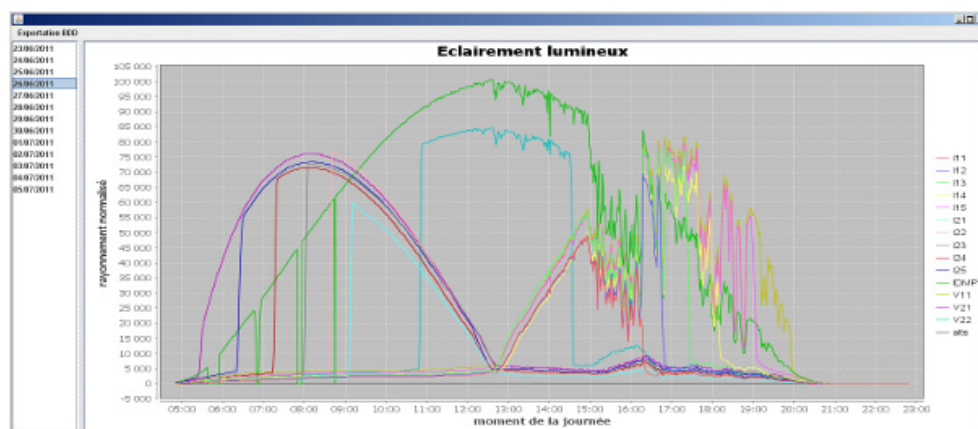


Figure III-64 : Aperçu du programme d’analyse des données développé pour la thèse

III.2.4. Organisation des données et contrôle de qualité

Les mesures effectuées pour chaque morphologie du canyon ainsi que les simulations correspondantes dans chaque logiciel ont été regroupées et formatées dans un ensemble de fichiers textes. Chaque fichier correspond à un couple de paramètres formé à partir du rapport d'aspect et du type de revêtement. Il existe une version de chaque fichier pour chaque source de données : logiciel et mesures. Avec 3 rapports d'aspect et 4 types de façade, il y a 12 fichiers pour 4 sources possibles (Maquette, Citysim, Daysim, Heliodon), soit 48 fichiers au total. Les facteurs de réflexion lumineux utilisés pour chaque revêtement correspondent à la première mesure qui a été effectuée avant la mise en place, c'est-à-dire avant que le phénomène de salissure ne se produise. Pour les mesures sur la maquette, il existe une version au pas de la minute et à un pas horaire. Cette version est utilisée pour effectuer les comparaisons avec les logiciels de simulation incapables d'effectuer des calculs avec un pas de temps inférieur à l'heure. Le fichier au pas de temps horaire a été généré à partir du fichier à la minute en choisissant la valeur instantanée horaire. Il n'a pas été choisi d'utiliser une valeur moyenne horaire, cela provient d'une volonté de faire des comparaisons pour des situations données, pas pour des situations moyennes. Cela n'aurait pas permis de caractériser la capacité des logiciels à fournir une réponse convenable pour des types de ciel donnés.

Le Tableau III-8 donne le détail du nombre de jours où la maquette est restée dans une même configuration. Le nombre minimal de valeurs a été défini par la première configuration. Pour chaque minute, le type de ciel CIE est connu (cf. section III.2.4.2). Il existe donc une quantité minimale de chaque type de ciel CIE à atteindre pour chaque variation des paramètres du canyon. Cette analyse des données par rapport aux types de ciel permet de caractériser le climat lumineux en prenant en compte l'influence que peut avoir la distribution des luminances du ciel sur la répartition des éclairagements au sein du canyon. En fonction des périodes de l'année, le nombre de jours peut être plus important. Par exemple, il est plus long d'obtenir des types de ciel clair sans nuages en plein hiver, le contraire est valable en été. Le format des données est donné en annexe E.

| Rapport H/W | Type de façade | Nombre de jours | Saison |
|-------------|----------------|-----------------|-----------|
| 0,5 | Noir | 15 | Printemps |
| 0,5 | Blanc | 12 | Été |
| 0,5 | Crépi | 11 | Été |
| 0,5 | Verre | 27 | Été |
| 1 | Noir | 13 | Été |
| 1 | Blanc | 28 | Été |
| 1 | Crépi | 96 | Automne |
| 1 | Verre | 33 | Hiver |
| 2 | Noir | 52 | Hiver |
| 2 | Blanc | 14 | Hiver |
| 2 | Crépi | 17 | Printemps |
| 2 | Verre | 13 | Printemps |

Tableau III-8 : Quantité de jours de mesures pour chaque configuration de la maquette

Les mesures effectuées sur la maquette ont subi un contrôle de qualité régulier qui nous a permis de contrôler le bon fonctionnement des sondes et de vérifier que des phénomènes

extérieurs ne perturbaient pas les mesures. Ce contrôle de qualité est décrit dans la section suivante.

III.2.4.1. Description du contrôle de qualité appliqué aux mesures

Une précaution concernant la mesure du rayonnement diffus effectuée sur la station IDMP est d'abord décrite. Ensuite, le contrôle sur les données provenant des sondes situées sur la maquette est décrit. Ce contrôle a consisté à exclure les mesures suspectées d'être erronées. Une autre approche aurait pu être d'ajouter une valeur numérique à chaque mesure pour spécifier sa qualité. La démarche que nous avons adoptée est donc plus restrictive, nous n'avons gardé que les résultats avec un niveau de confiance élevé.

Détermination de EED à partir des données IDMP

Les données météo étant récupérées depuis la station IDMP, elles bénéficient du contrôle de qualité de cette dernière (cf. section II.3.2.4). Cependant, la valeur de EED (éclairage énergétique diffus horizontal) mesurée est sensible à la position du pare-soleil qui est placé au-dessus de la sonde, lequel doit être déplacé manuellement tout au long de l'année. Ce pare-soleil masque en plus du soleil, une partie du ciel, ce qui mène à une sous-estimation de EED. Pour tenir compte de cela, les valeurs de EED fournies par la station sont corrigées en tenant compte du type de ciel, selon un algorithme proposé par LeBaron (LeBaron, Michalsky, et Perez, 1990). Cette correction n'est peut-être pas toujours suffisante, car comme le montre la Figure III-65, il y a une différence entre la valeur de EED, et la différence de EEG et EES, pour une journée avec un ciel sans nuages et une journée avec un ciel couvert. Compte tenu qu'il y a de la redondance dans les mesures de la station, nous avons choisi de déterminer le diffus à partir de la différence entre global et direct, puisque la mesure du direct est fiable.

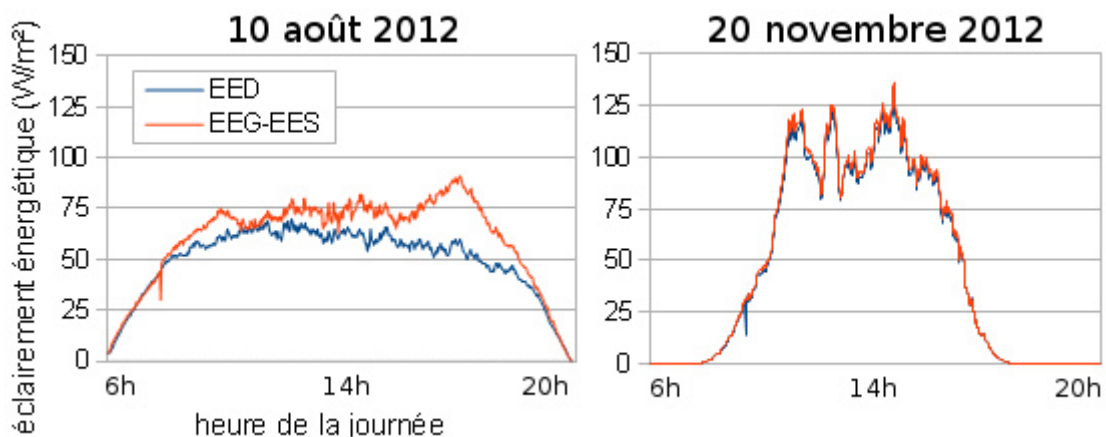


Figure III-65 : Éclairage diffus horizontal mesuré (EED) et calculé à partir de EEG et EES pour une journée de ciel sans nuages (à gauche) et une journée de ciel couvert (à droite)

Contrôle des mesures sur la maquette

Les mesures effectuées sur la maquette doivent elles aussi bénéficier d'un contrôle de qualité permettant de confirmer leur utilisation dans l'analyse des données. Elles seront utilisées pour valider des résultats de simulations. Toute erreur de mesure aurait donc un impact sur la qualité de la validation.

La fréquentation des toits de l'ENTPE par les corbeaux est une source d'erreur possible. Certains ont pu se poser sur les façades et éventuellement se déplacer à l'intérieur du canyon. Il est possible d'attester de leur présence grâce au constat des déjections ou restes de nourriture retrouvés occasionnellement lors des visites de contrôle quasi quotidiennes. En se perchent sur les façades, les oiseaux créent une obstruction à une partie du ciel et éventuellement au soleil. La Figure III-66 schématise un exemple d'obstruction à l'intérieur du canyon. Les corbeaux présents dans la zone peuvent mesurer entre 40 cm et 50 cm de long, ce qui est largement suffisant pour masquer 2 ou 3 sondes lorsqu'ils se tiennent sur leurs pattes.

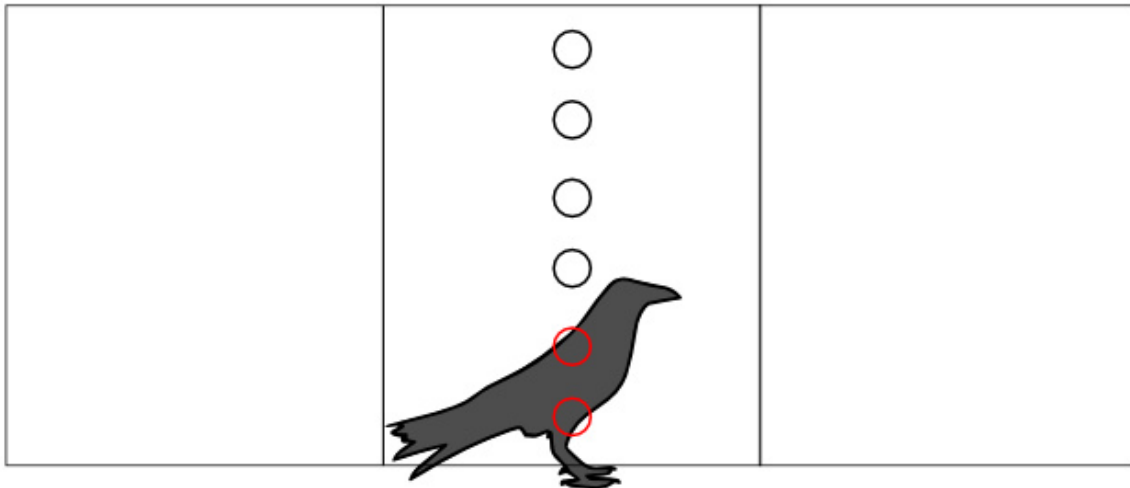


Figure III-66 : Obstruction causée par un corbeau de passage

Dans le cas des façades blanches, leur plumage noir peut même réduire l'éclairement lumineux mesuré par les sondes sans que cela ne se remarque. Sachant que la maquette est restée en place pendant un an, la probabilité que cela se produise est envisageable. De plus, les valeurs enregistrées par les sondes correspondent à une moyenne des éclaircissements lumineux mesurés toutes les 15 secondes durant la minute précédente (cf. section III.2.3.4). Ce temps est suffisamment court pour que la valeur moyenne soit influencée par la présence de l'oiseau. Ce phénomène a été observé lors du traitement des données, une sonde en façade indiquait une valeur très inférieure aux sondes du dessus et du dessous, à un instant donné, alors que les mesures précédentes et suivantes n'avaient pas cette particularité.

Cet exemple illustre donc l'impossibilité d'avoir une confiance totale envers les mesures qui sont censées servir de référence pour juger de la qualité des simulations. De plus, il est délicat d'utiliser une comparaison entre les valeurs des différentes sondes pour vérifier que les valeurs mesurées sont correctes. *A priori*, plus une sonde se trouve près du

sol, plus elle est susceptible de recevoir un éclairage lumineux faible, du fait de son accès réduit à la lumière du ciel et de sa plus faible probabilité de recevoir du rayonnement solaire direct. Une telle règle de contrôle des données peut être facilement mise en place. Toutefois ce raisonnement ne prend pas en compte la contribution du sol, la dépendance au rapport d'aspect ou à l'ensoleillement, ni la contribution des réflexions multiples entre les façades. En effet, selon la valeur du facteur de réflexion lumineux du sol, les sondes situées le plus bas dans le canyon sont susceptibles de mesurer un éclairage supérieur aux sondes situées directement au-dessus d'elles. Cet effet est certainement plus important pour un ciel couvert avec un zénith plus lumineux impliquant un éclairage au niveau du sol plus élevé que sur les façades. Il est aussi d'autant plus important pour des façades avec un facteur de réflexion lumineux faible. Il est possible alors que les sondes situées au milieu donnent des valeurs plus faibles que les sondes situées au-dessus d'elles (qui bénéficient de la contribution du ciel) et des sondes situées en dessous (qui bénéficient de la contribution du sol). Il y a un grand nombre de paramètres susceptibles d'influer sur les éclairages lumineux mesurés par chacune des sondes placées à l'intérieur de la maquette. Un contrôle de qualité basé sur des règles trop simplistes risquerait d'exclure des valeurs correctes et de conserver des valeurs incorrectes.

C'est pourquoi nous avons basé notre contrôle de qualité sur une comparaison entre les mesures et les résultats de simulations, les mesures qui s'écartent de manière flagrante des résultats de simulation sont rejetées. Cette technique est souvent utilisée dans les programmes de contrôle de qualité de mesures liées au rayonnement solaire, IDMP ou MESOR (Hoyer-Klick *et al.*, 2008) par exemple. Nous avons utilisé les logiciels de simulation Citysim et Daysim car ils tiennent compte du climat, ce qui n'est pas le cas du logiciel Heliodon (cf. section II.5.2.3). Puisque les logiciels fonctionnent avec un pas de temps horaire, le contrôle de qualité n'a pas pu être appliqué sur les données au pas de la minute. Pour chaque mesure, l'écart entre la valeur calculée par Citysim et Daysim, et la valeur mesurée par la sonde correspondante est calculée. Si cet écart est supérieur ou inférieur à 50% de la mesure, alors toutes les valeurs des sondes correspondant à cet instant sont exclues. Le seuil de 50% a été choisi après analyse visuelle des nuages de points représentant les éclairages lumineux calculés en fonction des éclairages lumineux mesurés. Cela a été fait pour chaque configuration et pour chaque logiciel. La Figure III-67 montre un exemple d'application du contrôle de qualité pour la configuration H/W=1 avec façades blanches (un point représente une valeur à une heure donnée). Les points rouges représentent les valeurs exclues, les points bleus représentent les valeurs conservées.

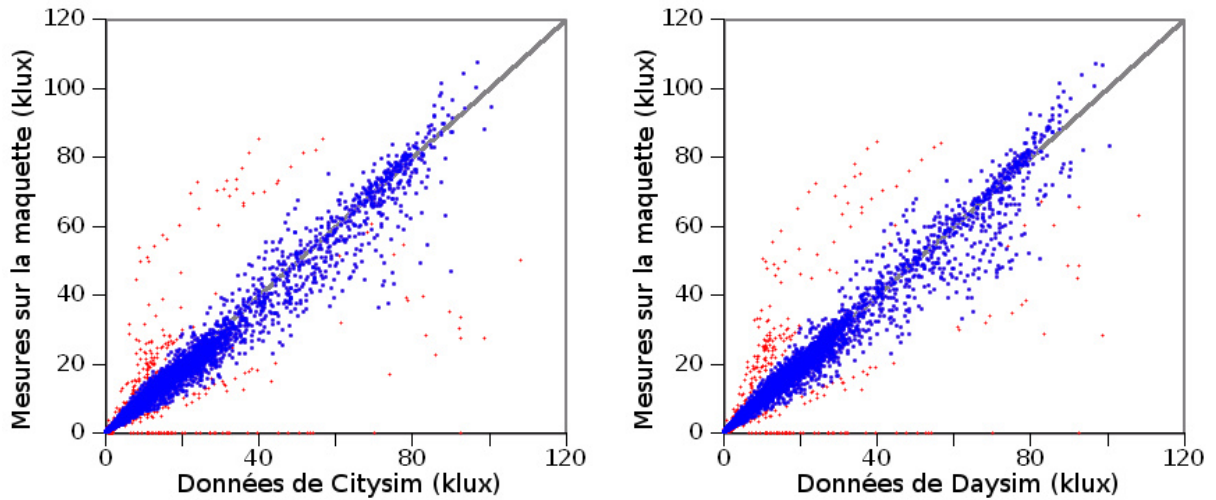


Figure III-67 : Résultat de la règle de l'écart relatif mesure/modèle supérieur à 50% utilisée pour éliminer les points de mesure douteux, pour H/W=1 avec façades blanches

Sur les 53 677 valeurs d'éclairage calculées au total pour les différentes configurations de la maquette, 8274 possèdent un écart de $\pm 50\%$ par rapport aux valeurs mesurées, toutes sondes confondues, et ont donc été exclues, ce qui représente 15,4% des données.

La Figure III-68 représente une vue en coupe de la position des sondes ainsi que le pourcentage de données éliminées pour chacune d'entre elles. La sonde V21 (étage le plus haut de la façade située à l'ouest) est celle qui a fourni le plus souvent des valeurs aberrantes (17%).

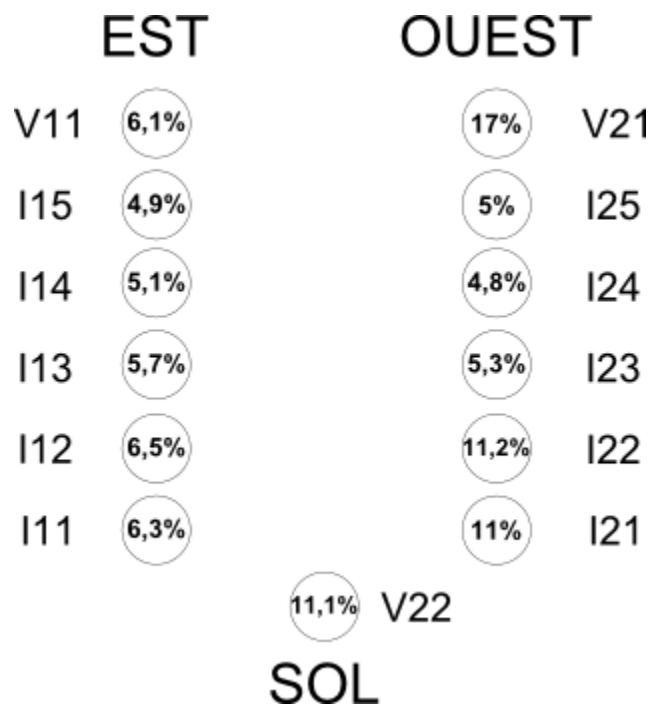


Figure III-68 : Pourcentage de mesures exclues pour chaque sonde

Nous avons cherché à savoir s'il existait un lien entre l'angle d'incidence du soleil sur la sonde et la probabilité de rencontrer une valeur exclue par le critère des 50%. La Figure III-69 montre en fonction de l'angle d'incidence, le pourcentage de données pour lesquelles l'écart entre les mesures et les résultats des simulations dépasse $\pm 50\%$.

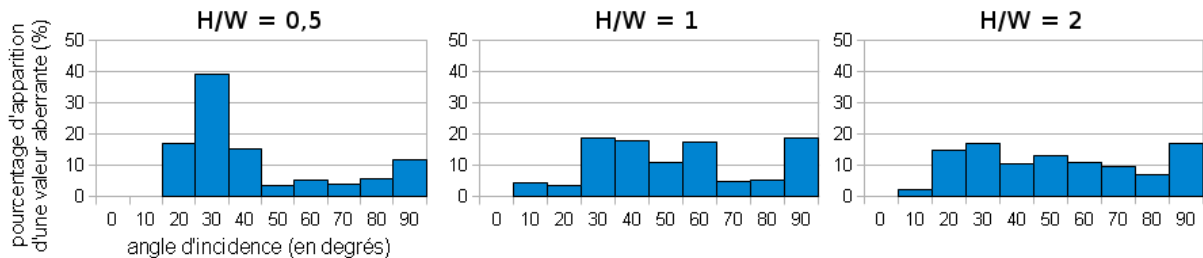


Figure III-69 : Fréquence à laquelle l'écart entre les mesures et les modèles (soit Daysim, soit Citysim) dépasse 50%

Les résultats sont présentés pour chaque rapport d'aspect en combinant les quatre types de façade, lorsque le soleil est visible (EVS_N>12 klux, cf. section IV.1.2.1). La présence d'un plus grand nombre de mesures rejetées pour des angles d'incidence proches de 90° est susceptible de correspondre à la dégradation de la correction en cosinus des sondes utilisées pour la mesure (cf. section III.2.3.2).

Il y a un pourcentage élevé de valeurs aberrantes pour des angles entre 20° et 40° avec le rapport d'aspect H/W=0,5. Ces situations correspondent à des ciels sans nuages, avec des éclairagements mesurés plus faibles que les éclairagements calculés par les logiciels. L'analyse des données n'a pas permis de mettre en cause de phénomène particulier à l'origine de cette exclusion plus importante de mesures pour ces angles d'incidence du soleil. Pour H/W=1 et H/W=2, il est difficile de remarquer cette tendance étant donné que les pourcentages de valeurs aberrantes varient moins en fonction de l'angle d'incidence.

Pour exclure des valeurs aberrantes, il est possible de choisir un critère absolu ou relatif. Un critère absolu pourrait être de ne conserver que les données dont l'écart entre les simulations et la maquette est inférieur à 1 klux, par exemple. Si un écart absolu de 1 klux est tout à fait tolérable pour des niveaux d'éclairagement avoisinant les 50 klux (2%), il est intolérable pour un éclairagement de 5 klux (cela représente 20% de la mesure). Le critère relatif semble donc plus adapté.

Les données mesurées sur la maquette ont donc été soumises au contrôle de qualité décrit dans cette section afin de pouvoir être utilisées par la suite. Après élimination des valeurs aberrantes, il reste 4460 données au pas horaire, de 5h à 23h pour chacun des 331 jours, couvrant la période de mesure entre juin 2011 et août 2012. L'utilisation d'une caméra aurait permis de mieux situer les instants pendant lesquels les sondes étaient vraiment masquées et de connaître la nature des masques. Il existe des programmes qui permettent de déclencher la caméra à intervalle régulier et/ou lorsqu'un mouvement est détecté. Cela aurait pu permettre de conserver un plus grand nombre de mesures, exclues peut-être abusivement par le contrôle de qualité. Dans la section suivante, nous produisons une analyse des données qui ont passées le contrôle de qualité en fonction des conditions de ciel, que nous allons classer selon les types de ciel définis par la CIE.

III.2.4.2. Conditions climatiques couvertes par les mesures

L'analyse de la fréquence des différents types de ciels représentés dans la base de données permet de vérifier si tous les types de ciel sont bien représentés et sous quelles proportions. Cela permet également de vérifier si l'année durant laquelle les mesures ont été effectuées est représentative du climat local.

Pour chaque minute de mesure, le type de ciel CIE a été déterminé en utilisant la méthode décrite dans la section II.3.4.2. La Figure III-70 représente la fréquence d'observation de chaque type de ciel calculée à partir de 223 110 valeurs. Les mesures ayant été effectuées sur légèrement plus d'une année, les mois supplémentaires ont été exclus pour ne pas introduire de biais. Sur la période prise en compte, un total de 24 451 valeurs (11%) a été exclu par le contrôle de qualité de la station IDMP (cf. section II.3.2.4). Cela signifie que ce dernier a détecté des incohérences sur au moins un des paramètres qui permet de calculer le type de ciel (éclaircissements énergétiques diffus horizontal et direct normal). Concernant l'éclaircissement diffus horizontal énergétique ou lumineux, il peut s'agir d'un défaut d'alignement de la bande d'ombre. Il est peu probable qu'une erreur soit constatée sur l'éclaircissement énergétique direct normal, cependant une obstruction peut être causée par le technicien qui vérifie l'état de la station quotidiennement si ce dernier se trouve dans le champ de l'appareil au moment de la mesure. La Figure III-70 est basée sur des données collectées pendant un peu plus d'une année (de juin 2011 à août 2012), il représente donc le climat Lyonnais pour cette période.

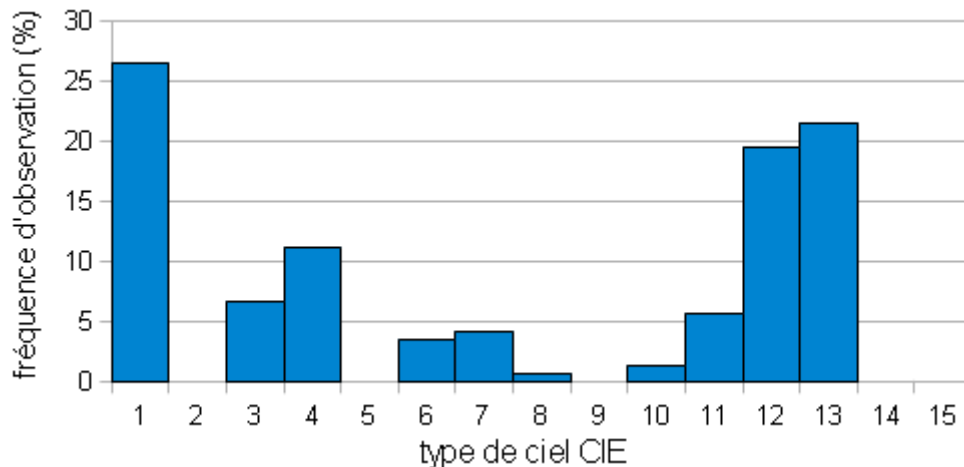


Figure III-70 : Fréquence d'observation des types de ciel CIE dans la BDD

Le type de ciel 1 qui représente le ciel couvert standard de la CIE représente un quart des observations. Les types de ciel sans nuages (types 11 à 13) en représentent quasiment la moitié. Les types 2, 5, 9, 14 et 15 n'ont jamais été observés sur la période de mesure. Ce fait peut être expliqué par la distribution particulière des luminances de ces types de ciel, notamment dans la zone circumsolaire. Ainsi, le type 2 est très proche du type 1, la seule différence est que la zone autour du soleil est légèrement plus lumineuse (cf. Tableau II-1 page 111). Cette différence ne peut s'observer qu'en mesurant les luminances du ciel, certainement pas à partir d'une mesure de l'éclaircissement horizontal.

Une étude dont l'objectif était de déterminer la distribution des types de ciel CIE pour la ville de Hong-Kong a mené à des résultats similaires (DHW Li et Tang, 2008). Li et Tang utilisent la même méthode pour déterminer les types de ciel, à la différence qu'ils utilisent des luminances provenant d'un scanner de ciel, au lieu de les calculer à partir d'un modèle. De ce fait, les types CIE 2, 5 et 9 apparaissent dans leurs statistiques. Toutefois, leur fréquence d'apparition est inférieure à 5%. L'EQM entre les luminances CIE et les valeurs mesurées étant plus important pour ces types de ciel que pour les autres, Li et Tang décident d'exclure ces trois types de ciel de leur analyse. Finalement, les types 1, 3, 6, 7, 8 et 13 à 15, sont les plus fréquents à Hong-Kong. Les types 14 et 15 (ciels sans nuages troubles) s'expliquent par l'atmosphère polluée de la ville de Hong-Kong.

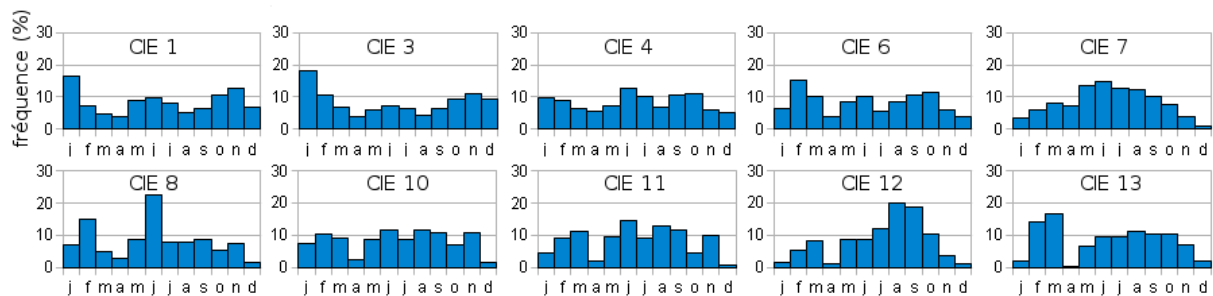


Figure III-71 : Fréquences mensuelles d'observation des ciels CIE dans la BDD

La Figure III-71 montre la fréquence d'observation de chaque type de ciel CIE tout au long de l'année que représente la base de données. Les histogrammes sont représentatifs du climat de Vaulx-en-Velin, où se trouve la station IDMP, et de la période de mesure en particulier. Il est théoriquement possible de trouver n'importe quel type de ciel, quelles que soient l'heure et la saison. Le type de ciel CIE 1 représente un ciel couvert de nuages ne permettant pas de distinguer le soleil. La Figure III-70 montre que ce dernier apparaît bien toute l'année, même si son pourcentage d'occurrence varie en fonction du mois. Il est plus courant de trouver ce type de ciel d'octobre à janvier car il est représentatif de conditions hivernales. À l'opposé, le type de ciel CIE 12, sans nuages et peu troublé, se retrouve principalement en été.

Dans sa thèse, Dumortier donne la fraction d'insolation pour 30 années entre 1961 et 1992 (D. Dumortier, 1995). Il s'agit de la durée d'ensoleillement divisé par la durée du jour. Pour calculer la fraction d'insolation, il suffit de calculer le pourcentage de situations pour lesquelles le soleil est visible par un plan horizontal. Le critère utilisé pour déterminer la visibilité du soleil est décrit en détail dans la section IV.1.2.1 : le soleil est dit visible lorsque l'éclairement lumineux direct normal (EVSND) est supérieur à 12 klux. Ces valeurs mensuelles sont superposées au graphique de Dumortier sur la Figure III-72. Sur ce graphique, la ligne noire représente la moyenne des 30 années et la zone grise représente l'ensemble des valeurs de cette période. Les points rouges correspondent aux fractions d'insolation pour les données IDMP couvrant la période de mesure sur la maquette. L'année est globalement représentative du climat car les points rouges se situent entre les valeurs minimales et maximales à l'exception du mois de juillet qui se trouve en dehors de la valeur minimale des 30 années. Cela indique un mois de juillet particulièrement couvert. Les mois d'août à décembre sont représentatifs de la moyenne alors que les mois de février à avril

s'en éloignent. La moyenne annuelle est de 41%, ce qui est légèrement inférieure à la moyenne annuelle sur 30 ans qui est de 45%.

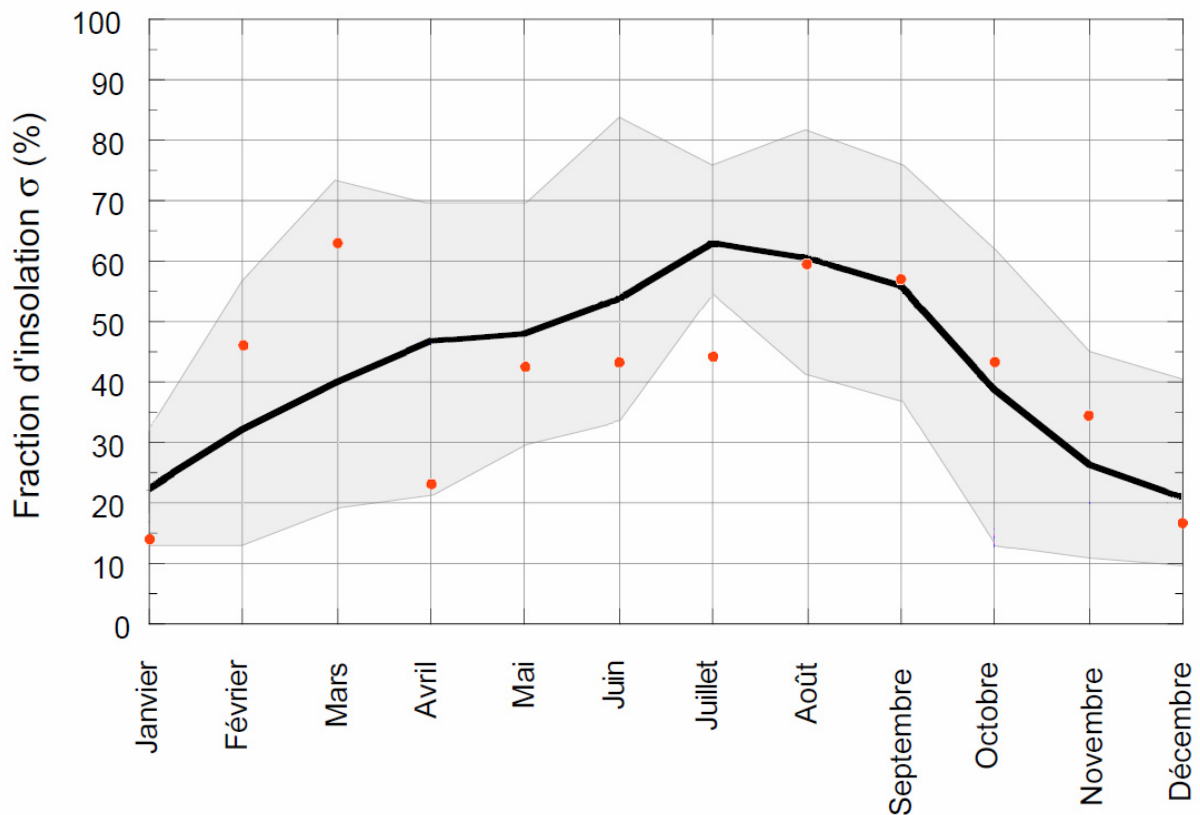


Figure III-72 : Fraction d'insolation de la période de mesure par rapport aux valeurs sur 30 ans pour le même lieu. Les points rouges correspondent à la période de mesure sur la maquette

Les conditions climatiques présentes durant la période de mesure sont donc assez représentatives du climat local et ne présentent pas de particularité remarquable. Certains types de ciels ne sont pas représentés, nous en avons déduit qu'ils ne peuvent être détectés pour le climat du lieu où se trouve la station, du moins à partir de mesures d'éclaircements énergétiques uniquement. Durant sa thèse à l'ENTPE, Kobav a installé, sur la station IDMP, et utilisé un scanner de ciel (Kobav, 2009). Il a détecté la présence de ces types plus rares, mais avec une fréquence d'apparition faible : inférieure à 2,5% pour les types 5 et 14, et inférieure à 1% pour les types 9 et 15.

Nous disposons donc de la capacité de classer les mesures effectuées sur la maquette selon les types de ciel CIE, et nous pouvons justifier l'absence de l'observation de certains types de ciel pour certaines configurations de la maquette. La partie suivante contient l'analyse des mesures effectuées sur la maquette pour tous les types de ciel qui ont pu être observés durant la période de mesures.

Partie IV - Analyse des mesures et test des logiciels

Dans la partie précédente, nous avons décrit deux dispositifs expérimentaux ayant pour but de mesurer des éclairagements lumineux à l'intérieur d'un canyon urbain. Nous allons donc analyser les différents résultats obtenus à partir de ces dispositifs.

Dans un premier temps, les éclairagements lumineux mesurés à la surface des façades de la maquette seront étudiés. Cela nous permettra d'évaluer l'influence du rapport d'aspect et de la nature des façades sur l'accès à la lumière naturelle à l'intérieur d'un canyon urbain. La présence de rayonnement solaire direct sur les sondes implique un traitement différent des mesures. Ainsi, le premier chapitre présente une méthode destinée à séparer dans la base de données : les situations pour lesquelles les sondes étaient ensoleillées et les autres. Pour chaque type de situation, nous présentons les éclairagements relatifs, c'est-à-dire les éclairagements lumineux normalisés par rapport à l'éclairage lumineux global horizontal. Nous commençons par la sonde au sol, puis par les sondes de chaque étage, pour chacune des façades Est et Ouest.

Le second chapitre présente les corrélations entre les mesures effectuées sur la maquette, et les valeurs simulées à partir des logiciels Citysim, Daysim et Heliodon, pour les différents types de revêtements et les rapports d'aspects disponibles dans la BDD de mesures effectuées sur la maquette. Cela permet d'évaluer la capacité de chacun des logiciels à produire des éclairagements lumineux proches d'une situation réelle, en fonction de la géométrie du canyon et du facteur de réflexion lumineux des façades.

Le troisième chapitre présente les résultats des mesures sur site. Ces mesures sont mises en parallèle avec les mesures effectuées sur la maquette, et permettent d'évaluer la méthode de mesure des éclairagements lumineux à partir des cartes de luminances, ainsi que de valider l'utilisation du logiciel Daysim.

IV.1. Analyse des mesures sur la maquette

Deux paramètres liés à la morphologie d'un canyon urbain ont été étudiés. Il s'agit du rapport d'aspect et de la nature du revêtement des façades. Outre l'orientation du canyon, ce sont les paramètres qui ont un impact majeur sur la quantité d'éclairement mesurable à la surface des bâtiments et du sol. Afin d'étudier leur influence, un modèle réduit de canyon urbain a été réalisé à l'échelle 1/50^{ème}. Il a été conçu de façon à pouvoir faire varier trois rapports d'aspect (H/W) et quatre types de revêtements. Nous présenterons dans un premier temps les éclairements lumineux mesurés sur cette maquette pour des journées de ciel sans nuages. Cela nous conduira à présenter ensuite une analyse plus détaillée pour tous les types de ciels CIE, en utilisant l'éclairement lumineux normalisé en le divisant par l'éclairement global horizontal sans obstruction : nous appellerons cela l'éclairement relatif.

IV.1.1. Variation journalière de l'éclairement lumineux par ciel sans nuages

Dans cette section, nous présentons les éclairements lumineux mesurés à l'intérieur de la maquette pour la journée dont le ciel était le plus dégagé. Nous le faisons pour les 12 configurations. Cela nous permet d'observer les variations des éclairements lumineux dans la journée ainsi que l'influence du rapport d'aspect et du revêtement des façades. Nous avons sélectionné des journées de ciels sans nuages car c'est sous ces conditions climatiques que les variations les plus importantes sont susceptibles d'être observées.

La Figure IV-1 présente les éclairements lumineux mesurés à l'intérieur du canyon pour la journée ayant le ciel clair le plus idéal durant cette configuration de maquette, c'est-à-dire avec le moins de passages de nuages devant le soleil. La configuration correspond à un rapport d'aspect H/W=0,5 (canyon le plus large par rapport à H/W=1 et H/W=2) et à des façades noires. Les façades noires réduisent fortement les réflexions multiples au sein du canyon.

Les sondes *e1* à *e6* (traits pleins) représentent les 6 niveaux de la façade Est. Le niveau *e1* correspond au premier étage, le niveau *e6* correspond au sixième et dernier étage. Les sondes *w1* à *w6* (pointillés) représentent les 6 niveaux de la façade Ouest, présentés dans le même ordre que ceux de la façade Est. Les heures de la journée sont données en heures légales. La courbe EVG correspond à l'éclairement lumineux global horizontal mesuré par la station IDMP. L'allure des courbes est caractéristique des tendances déjà observées dans de précédentes études du rayonnement solaire dans un canyon urbain, comme par exemple le projet RECLUS (Najjar *et al.*, 2004).

La façade Ouest reçoit du rayonnement direct durant toute la matinée. La façade Est reçoit du rayonnement direct durant toute l'après-midi. Lorsqu'il n'y a pas de soleil direct, l'éclairement reçu par les sondes ne provient que de la partie du ciel qui est visible et de la lumière réfléchiée par la façade opposée. Étant donné que les façades sont noires, la contribution de ces réflexions est très faible, cela explique pourquoi les éclairements sont peu élevés.

Les éclairagements lumineux mesurés par la sonde située au sol sont plus faibles que la valeur de EVG lorsque le soleil éclaire directement la sonde, c'est-à-dire lorsque son azimut est proche de 180°. Cela provient du fait que la contribution du rayonnement diffus est limitée pour la sonde au sol du fait que l'accès au ciel est réduit par la présence des façades.

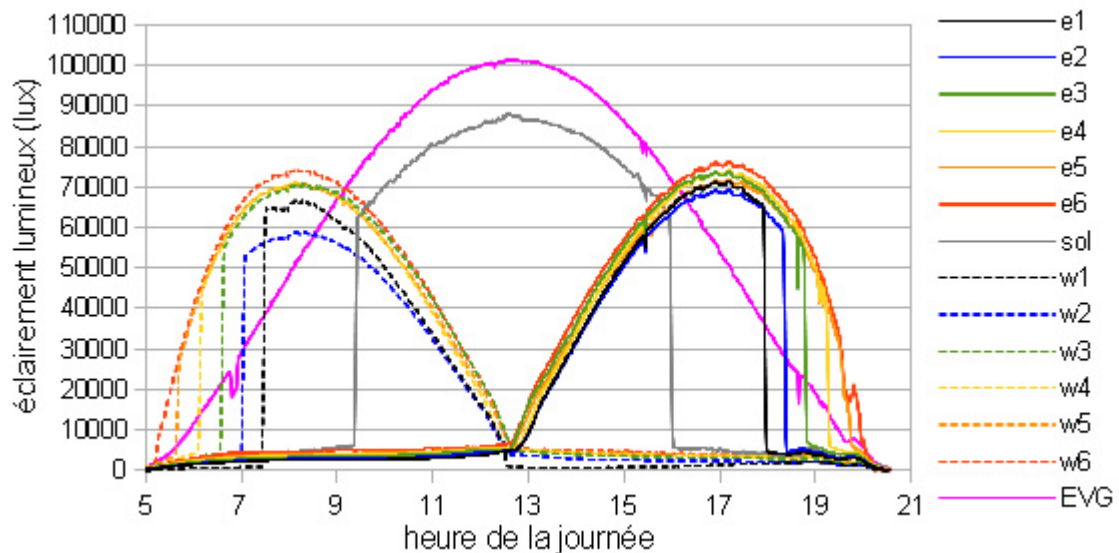


Figure IV-1 : Éclairagements lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=0,5$ avec les façades noires le 22/06/12

Le revêtement du sol, dont le facteur de réflexion lumineux est de 5%, a une influence sur la valeur d'éclairage mesurée par les sondes en façade. Les sondes *e1* et *w1* donnent des valeurs supérieures aux sondes des étages 2, voire 3 (façade Est). Les lignes verticales représentent la courte transition pendant laquelle chaque sonde est ou n'est plus éclairée directement par le soleil parce qu'il est, ou devient, caché par la façade opposée. Le moment où la transition se produit dépend de la position de la sonde, de la géométrie du canyon et de la géométrie solaire. Cette transition n'existe pas pour les sondes situées au 6^{ème} niveau du canyon car elles sont ensoleillées dès le lever (façade ouest) ou jusqu'au coucher (façade est). Pour les sondes situées sur les façades, la diminution lente de éclairage lumineux correspond à l'augmentation de l'angle d'incidence du soleil jusqu'à une valeur de 90°, il se retrouve ensuite derrière la façade. En revanche, pour la sonde au sol, il existe deux transitions franches. Ces transitions interviennent à un moment de la journée qui dépend du jour de l'année mais surtout du rapport d'aspect. Plusieurs caractéristiques de ces courbes remarquables peuvent donc être observées :

- Délai entre les transitions de la sonde au sol
- Délai entre les transitions franches de chaque sonde pour une même façade
- Niveau d'éclairage en l'absence de rayonnement solaire direct
- Niveau d'éclairage lorsque la façade est entièrement éclairée par le soleil

Ces caractéristiques varient en fonction du rapport d'aspect et du facteur de réflexion lumineux des façades et du sol.

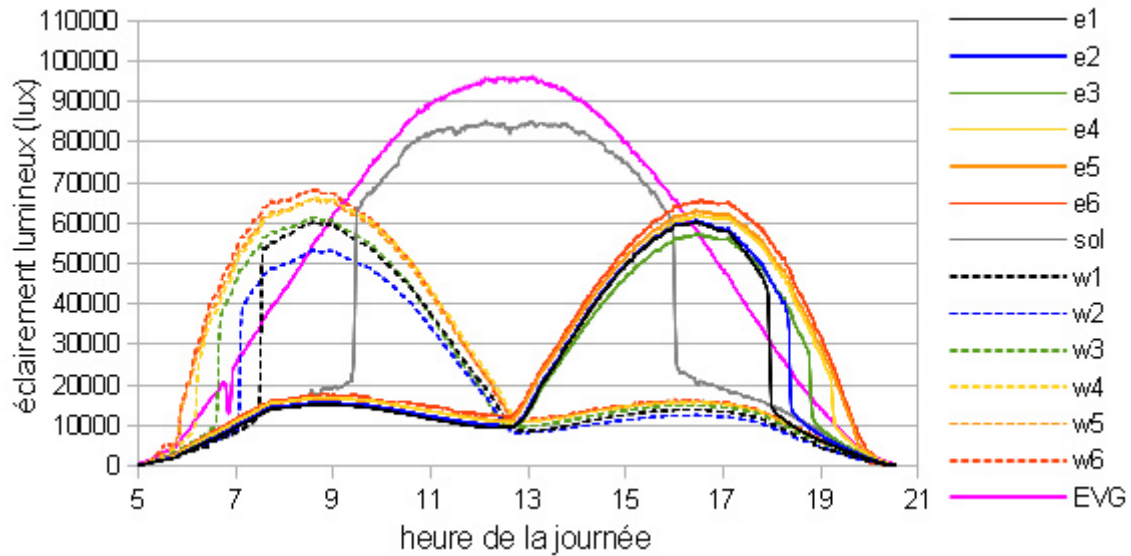


Figure IV-2 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=0,5$ avec les façades blanches le 29/06/12

La Figure IV-2 représente les valeurs d'éclairage pour un canyon $H/W=0,5$ avec des façades blanches. Les mêmes observations que pour la configuration avec les façades noires peuvent être effectuées. En effet, il existe toujours des transitions franches pour chaque sonde et des transitions lentes pour les sondes situées sur les façades. Il existe une différence remarquable concernant les niveaux d'éclairage en l'absence de rayonnement solaire direct. En effet, avec les façades noires, les valeurs mesurées par les sondes en façade sont faibles (jusqu'à 5 klux) durant ces situations et ne fluctuent quasiment pas. Dans le cas des façades blanches, l'éclairage mesuré est trois fois supérieur (jusqu'à 15 klux). Ces valeurs peuvent être comparées étant donné qu'il s'agit de conditions de ciel similaires obtenues à seulement une semaine d'intervalle. De plus l'éclairage lumineux mesuré en l'absence de soleil direct varie sur toute la demi-journée. Cet éclairage croît assez linéairement au fur et à mesure que les sondes de la façade opposée se mettent à être directement éclairées par le soleil, l'éclairage est maximal lorsqu'elles le sont toutes. Ensuite, une légère décroissance est observée, elle correspond à l'augmentation de l'angle d'incidence du soleil. Cela traduit le fait que l'indicatrice de diffusion des façades n'est pas une sphère respectant la loi de Lambert.

Comme pour les façades noires, l'ordre des sondes est influencé par le revêtement du sol, cela se constate par des éclairages, mesurés au premier niveau, plus élevés que ceux mesurés aux niveaux supérieurs (2, voire 3). Le gain apporté par les façades blanches se constate aussi sur la forme de la courbe de l'éclairage mesuré au sol. Cette forme de cloche est plus aplatie avec les façades blanches. De même, l'écart entre les valeurs de EVG et de la sonde au sol est moins important que dans le cas des façades noires car la contribution des façades compense légèrement le fait que le ciel soit masqué par les façades.

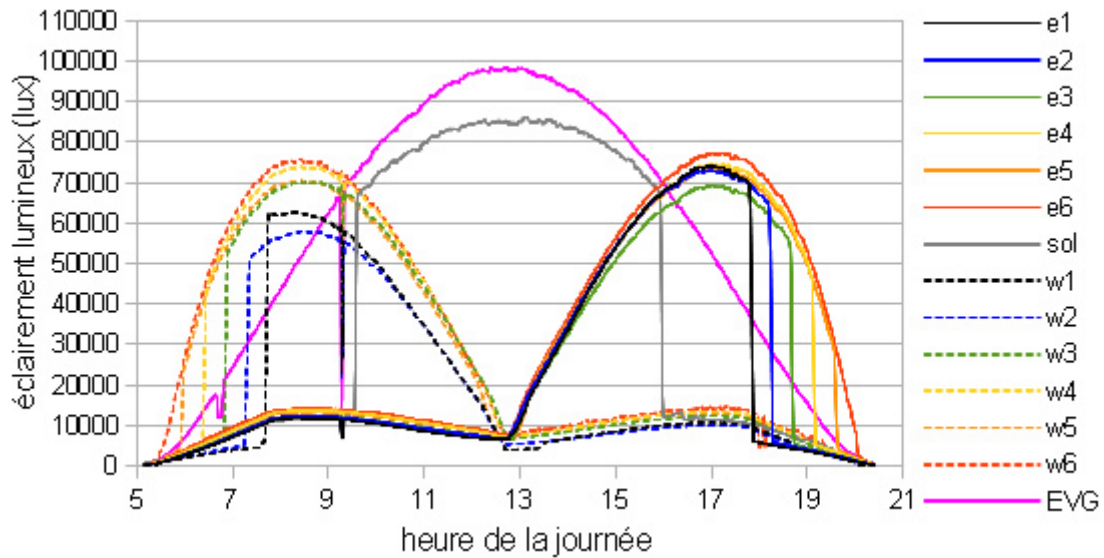


Figure IV-3 : Éclairéments lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=0,5$ avec les façades en crépi le 17/07/12

Pour un rapport d'aspect identique aux deux cas précédents ($H/W=0,5$) mais pour un revêtement en crépi, les mêmes observations que pour les façades blanches peuvent être mentionnées. Cela dit, l'éclairément mesuré sur les façades à l'ombre décrit une courbe plus aplatie ce qui est dû à un facteur de réflexion plus faible. Durant la matinée, un nuage est vraisemblablement passé devant le soleil ce qui a eu pour effet de réduire fortement les éclairéments mesurés par les sondes de la façade Ouest déjà éclairées directement par le soleil. Ainsi, il est possible de voir, sur la Figure IV-3, l'influence que cela a eu sur les sondes situées sur la façade opposée (à l'ombre). L'écart constaté correspond au gain apporté par les réflexions multiples au sein du canyon.

La Figure IV-4 montre les éclairéments mesurés pour le rapport d'aspect $H/W=0,5$ avec les façades en crépi comportant des éléments vitrés. L'allure des courbes pour les sondes situées sur les façades à l'ombre est similaire au cas précédent (façades en crépi). Les parties vitrées de la façade ont une influence remarquable sur l'éclairément mesuré par la sonde au sol. La courbe correspondante présente en effet des variations de plusieurs centaines voire de milliers de lux (entouré en rouge sur la figure) notamment lorsqu'elle ne reçoit pas de rayonnement solaire direct. Il s'agit clairement d'un gain occasionné par la réflexion du rayonnement solaire sur au moins une zone vitrée. Ce phénomène peut aussi être observé sur les courbes représentant le premier niveau, aussi bien pour la façade Est que pour la façade Ouest. Il serait intéressant d'étudier plus en détail le gain annuel d'énergie apporté sur les façades par ces réflexions spéculaires en le comparant à la perte d'énergie diffuse associée à la diminution du facteur de réflexion des façades liée à la présence de vitrages. Il ne faut toutefois pas oublier que ces réflexions spéculaires sont susceptibles de créer de la gêne pour les passants, les conducteurs et les habitants de la rue.

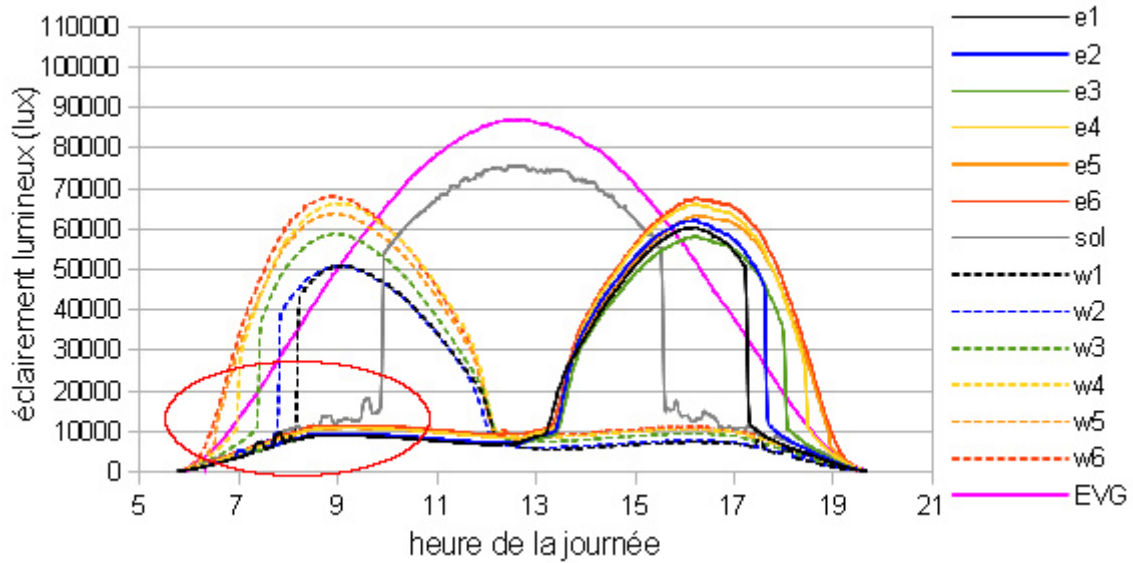


Figure IV-4 : Éclairages lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=0,5$ avec les façades en crépi vitré le 19/08/12

Différents phénomènes ont été observés concernant le rapport d'aspect $H/W=0,5$ pour les 4 types de revêtement qui ont été utilisés sur la maquette. Nous allons étudier l'allure des courbes pour le rapport d'aspect $H/W=1$, puis $H/W=2$, afin de déterminer l'influence du changement de ce paramètre sur les observations menées précédemment.

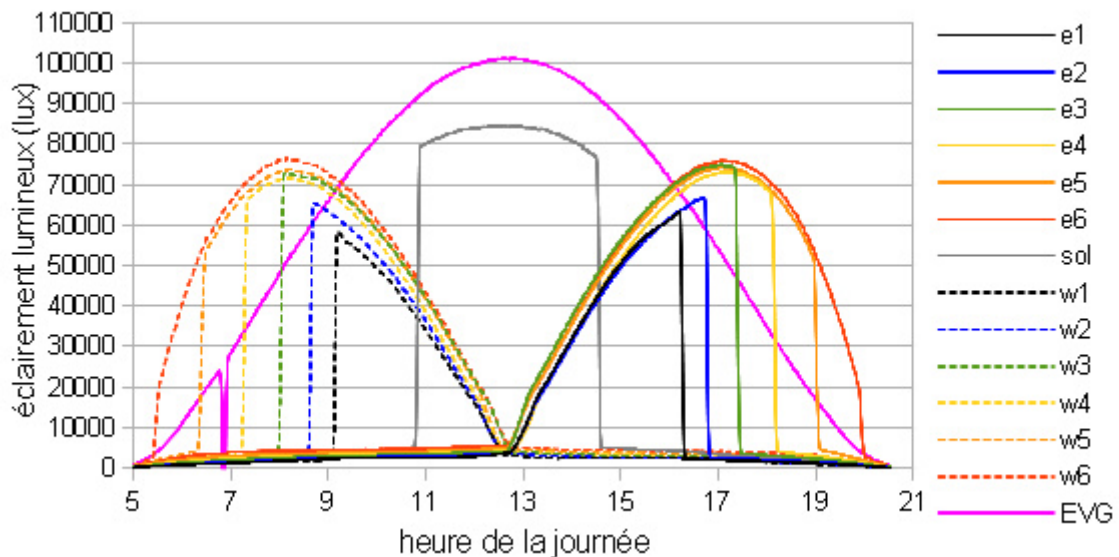


Figure IV-5 : Éclairages lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=1$ avec les façades noires le 25/06/11

La Figure IV-5 représente donc les valeurs d'éclairage lumineux mesurées sur la maquette avec un rapport $H/W=1$ et avec les façades noires. Le premier fait remarquable concerne le délai entre les transitions franches pour la sonde au sol. En effet, ce délai est plus court que pour les cas $H/W=0,5$. Cela suit une logique géométrique : étant donné que le canyon est plus étroit et que la vitesse angulaire du soleil est constante (15° par heure), la

distance angulaire que parcourt le soleil alors qu'il éclaire directement la sonde au sol est plus courte. Pour les mêmes raisons, le délai entre les transitions franches des sondes d'une même façade est plus élevé. Les formules mathématiques qui définissent cette géométrie sont décrites en détail dans la section IV.1.2.1 dans le cas d'un canyon de longueur infinie. Tout comme pour les façades noires, avec le rapport d'aspect précédent ($H/W=0,5$) la contribution des façades est moindre, ce qui se traduit par des faibles niveaux d'éclairement lorsque le soleil n'éclaire pas directement les sondes. Il est intéressant de noter qu'au niveau 3, les éclairagements mesurés avec ensoleillement des sondes donnent des valeurs supérieures à celles du niveau 4. Cela peut signifier que dans cette configuration, ce niveau permet de bénéficier au mieux de l'énergie provenant du ciel, du soleil et des réflexions des façades et du sol qui sont faibles, mais réelles. Cela pourrait aussi provenir d'un mauvais placement des sondes, cependant les deux façades donnent la même tendance. Concernant l'ordre des sondes, contrairement aux configurations avec $H/W=0,5$, les sondes du premier niveau ne donnent plus de valeurs supérieures à celles des niveaux plus élevés. Cela provient d'une contribution du sol moins importante que pour la rue la plus large et éventuellement d'une influence moins marquée des réflexions multiples.

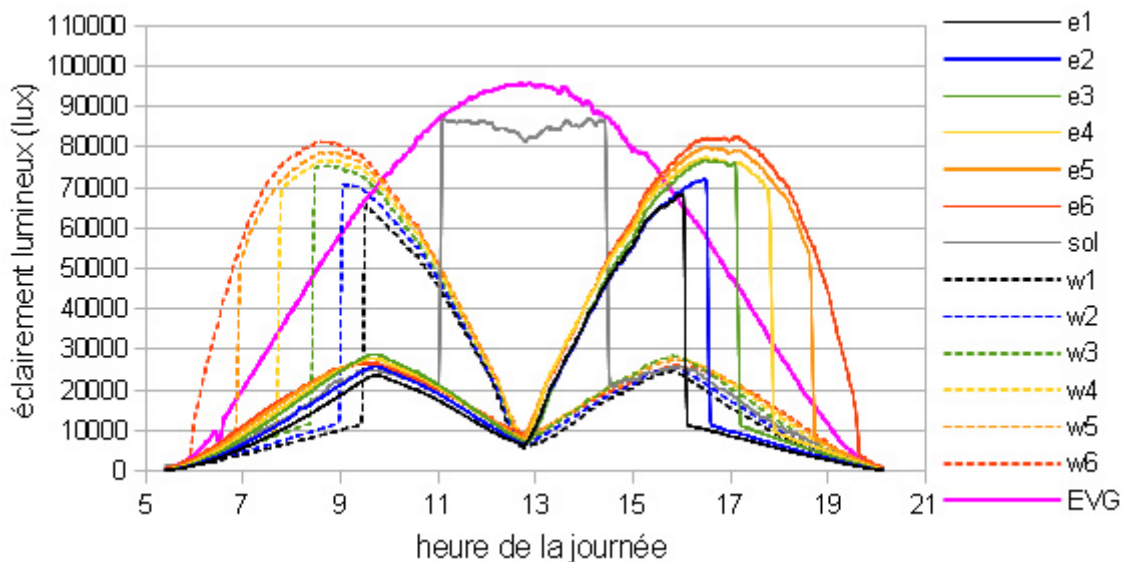


Figure IV-6 : Éclairagements lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=1$ avec les façades blanches le 01/08/11

La Figure IV-6 montre les valeurs d'éclairement pour une journée de ciel sans nuages avec $H/W=1$ et les façades blanches. Tout comme pour $H/W=0,5$ le gain apporté par les façades est nettement visible. Cependant la forme de la courbe est moins aplatie et témoigne d'une forte contribution des réflexions à l'intérieur du canyon. Les niveaux d'éclairement à l'ombre valent le tiers de ceux mesurés en plein soleil. Le rapprochement des façades a donc pour conséquence directe d'augmenter l'influence qu'elles ont l'une envers l'autre. Cette influence est telle que la forme de la courbe pour la sonde au sol en présence de soleil direct est inversée par rapport à $H/W=0,5$ avec une valeur minimale lorsque le soleil est aligné selon l'axe du canyon. Ces observations permettent de constater le fort potentiel du revêtement des façades concernant la quantité de lumière dans une rue, aussi bien sur les façades qu'au sol.

Toutefois, le gain apporté par les façades blanches s'approche d'une valeur maximale étant donné que le facteur de réflexion lumineux qui les caractérise est très élevé. C'est pour cette raison que les façades avec le revêtement crépi ont été utilisées. La Figure IV-7 montre les éclairagements obtenus avec ces façades pour $H/W=1$. Le gain apporté à la façade située à l'ombre est certes moins élevé mais atteint tout de même environ 20% de l'éclairage mesuré sur la façade ensoleillée à son maximum. Le facteur de réflexion de ce revêtement étant plus réaliste, ces résultats permettent d'approcher le gain réel apporté par une façade même si la présence des fenêtres n'a pas été prise en compte. La forme de la courbe pour la sonde au sol est similaire à celle pour les façades blanches avec le même rapport d'aspect bien que l'influence des façades soit moins marquée.

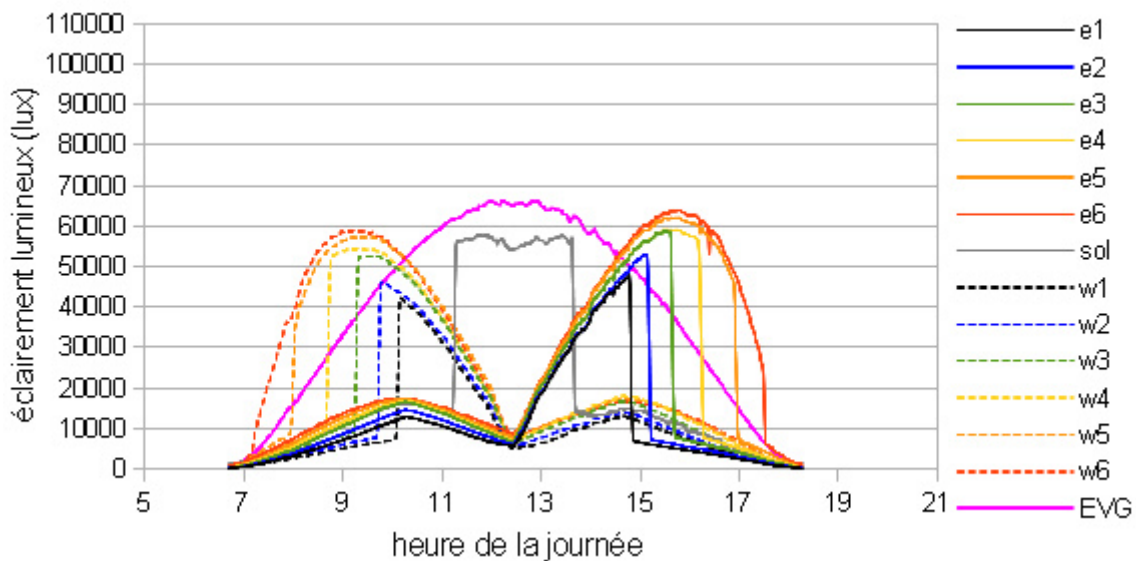


Figure IV-7 : Éclairages lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=1$ avec les façades en crépi le 03/10/11

La Figure IV-8 montre les éclairages lumineux pour $H/W=1$ avec les façades en crépi avec des fenêtres réparties sur toute la façade. L'échelle des abscisses et des ordonnées a été ajustée spécialement par rapport aux autres figures de cette section. En effet, les niveaux d'éclairage mesurés sont bien plus faibles et la durée du jour réduite par rapport aux autres journées présentées, ce qui aurait rendu la lecture difficile avec la même échelle. La présence des fenêtres réduit le gain apporté par la façade ensoleillée, ce qui se constate par une courbe plus aplatie pour les sondes verticales à l'ombre par rapport à la Figure IV-7.

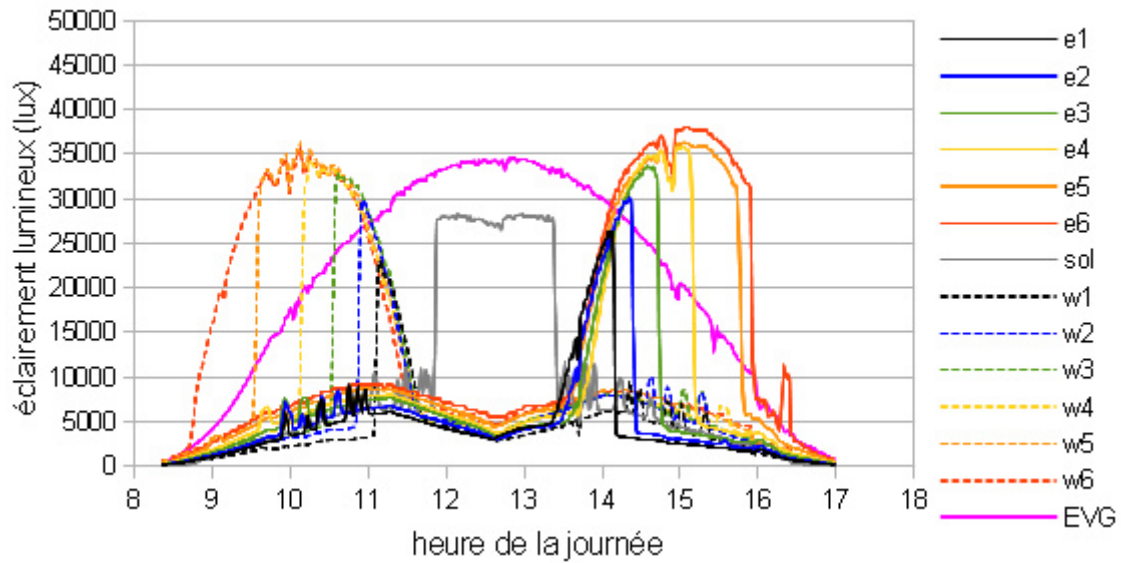


Figure IV-8 : Éclairagements lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=1$ avec les façades en crépi vitré le 25/12/11

Les courbes présentent des irrégularités tout comme pour le cas $H/W=0,5$ avec le même revêtement. Notons que quelques nuages ont obstrué le soleil durant certains moments, ce qui se remarque par des irrégularités sur les sondes situées aux étages 5 et 6. En revanche, les variations visibles sur les parties des courbes représentant les moments de la journée pendant lesquels celles-ci sont à l'ombre du soleil ne sont pas dues aux passages de nuages, mais aux réflexions spéculaires de la façade opposée. Cela se justifie simplement par le fait que ces variations ne sont pas synchronisées, ce qui aurait été le cas si un nuage avait caché le soleil. L'amplitude et la fréquence de ces variations est plus élevée que pour le canyon $H/W=0,5$. De plus, ces variations peuvent être constatées jusqu'au niveau 4, alors qu'elles ne sont visibles que pour le premier niveau dans le cas de $H/W=0,5$. Cela s'explique par une règle de géométrie simple représentée sur la Figure IV-9.

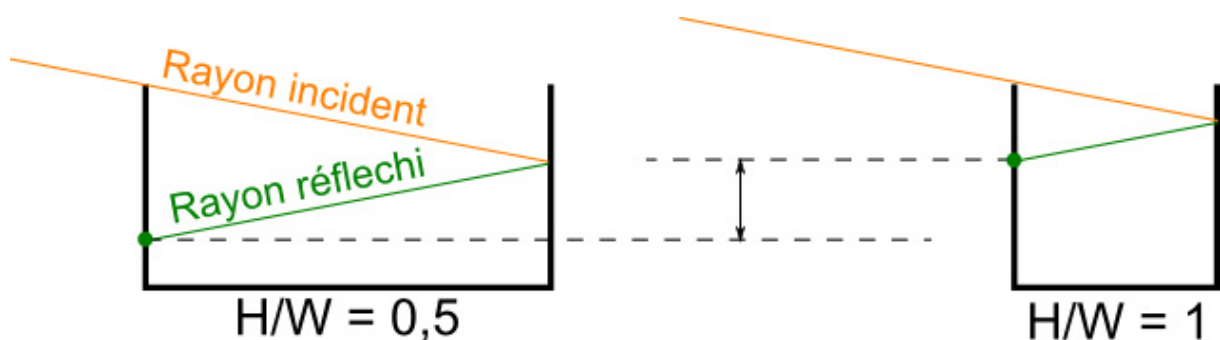


Figure IV-9 : Influence du rapport d'aspect sur la hauteur, sur la façade opposée, que peuvent atteindre les réflexions spéculaires dans un canyon

Sur ce schéma, les traits orange symbolisent un rayon incident provenant du soleil, ils sont parallèles. Le point d'intersection du rayon réfléchi (en vert) sur la façade ombragée ne se situe pas à la même hauteur, plus le canyon est étroit plus la position de ce dernier est élevée. Une fois de plus cela implique des réflexions spéculaires pouvant être gênantes pour

les passants et les occupants des bâtiments, mais ces réflexions apportent une contribution d'énergie conséquente durant ces pics, l'éclairement mesuré par les sondes peut être doublé. Il est intéressant de noter que les étages supérieurs n'étant pas touchés par ce phénomène, ils constituent une cible de choix pour un logement car ils permettent de bénéficier d'une grande quantité de lumière naturelle sans subir les reflets de la façade opposée.

À partir de la Figure IV-10, les éclairagements mesurés concernent le rapport d'aspect $H/W=2$. L'influence du rétrécissement de la largeur de la rue se remarque tout d'abord par une durée d'ensoleillement de la sonde au sol largement réduite par rapport aux rapports d'aspect étudiés précédemment. Cela se remarque aussi par l'écart entre les transitions franches pour les sondes situées sur une même façade. Le temps entre chaque transition varie plutôt linéairement avec la hauteur des sondes sur la façade pour $H/W=0,5$, ce n'est plus le cas pour $H/W=1$, ça l'est encore moins pour $H/W=2$. Cette durée est plus importante entre les sondes des étages supérieurs. Nous pouvons aussi remarquer qu'à la moitié de la façade (niveau 3), l'éclairement maximal sous influence directe du soleil vaut moins de la moitié (40%) du même éclairement au dernier étage.

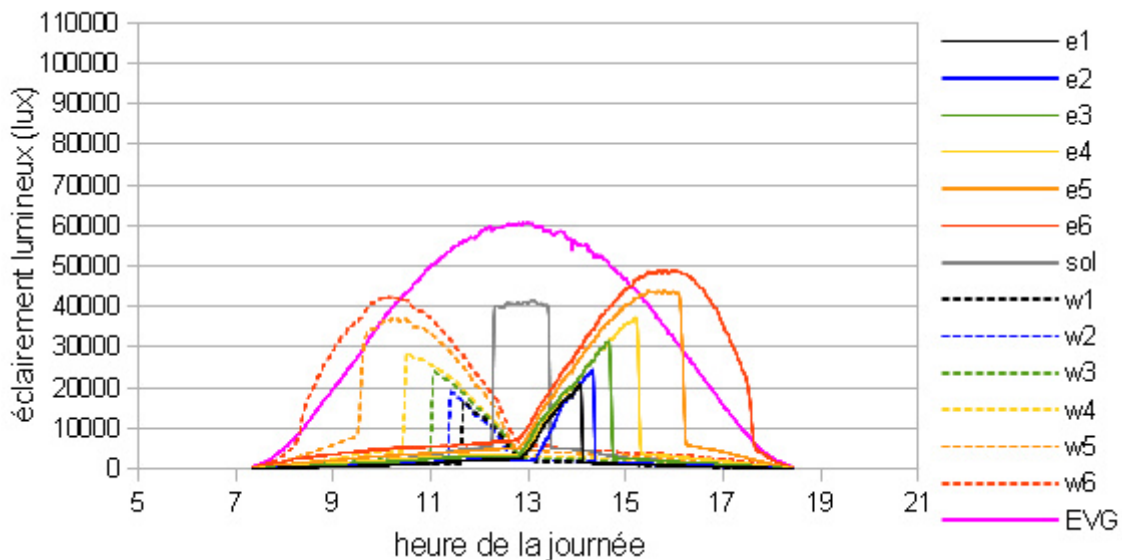


Figure IV-10 : Éclairagements lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=2$ avec les façades noires le 01/03/12

L'éclairement mesuré sur les façades non ensoleillées atteint des niveaux différents en fonction de la hauteur. Alors que pour les canyons plus larges, les courbes se confondent relativement bien, dans le cas de $H/W=2$, il existe une nette différence entre les éclairagements mesurés entre le niveau 6 et le niveau 1. Cela est dû à l'accès au rayonnement diffus qui diminue avec l'angle de vue du ciel en s'enfonçant dans le canyon.

La Figure IV-11 montre les éclairagements pour $H/W=2$ avec les façades blanches. Ce graphique est intéressant car il permet de constater le gain de lumière qu'il est possible d'obtenir en augmentant le facteur de réflexion lumineuse des façades dans les rues où l'accès à la lumière est le plus critique. Tout d'abord, la sonde au sol présente la même caractéristique que pour $H/W=1$, c'est-à-dire que l'influence des façades est clairement

visible du fait que la valeur mesurée, en condition ensoleillée, est minimal lorsque le soleil n'éclaire pas les façades car il est alors aligné avec l'axe nord/sud du canyon.

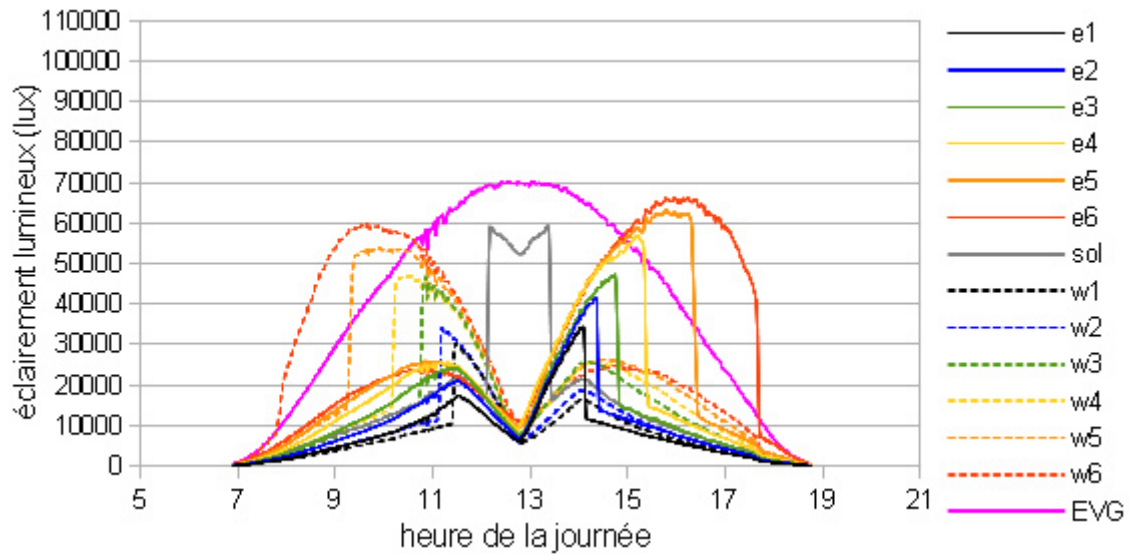


Figure IV-11 : Éclairements lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=2$ avec les façades blanches le 15/03/12

La Figure IV-11 montre aussi une grande variation de l'éclairement mesuré en l'absence de rayonnement solaire direct en fonction de l'étage considéré. Contrairement aux exemples précédents, la forme des courbes lors de ces situations n'est pas la même pour chaque niveau. Plus le niveau est élevé, plus la courbe prend une forme de dôme, ce qui traduit un gain de lumière provenant à la fois du ciel et du rayonnement réfléchi par la façade opposée. Lorsque le niveau se rapproche du sol du canyon, la courbe se creuse et forme un pic. Cela peut correspondre à la composante spéculaire de la réflexion du matériau, dont l'amplitude dépend de l'angle d'incidence des rayons du soleil. Les matériaux sont supposés suivre la loi de Lambert mais présentent certainement, en réalité, une indicatrice de diffusion avec un pic de spécularité. En constatant l'influence de cette indicatrice de diffusion, l'utilisation d'un revêtement de façade parfaitement diffusant permettrait de réduire l'amplitude du pic observé et de contribuer à une répartition journalière plus stable de la lumière dans le canyon.

La Figure IV-12 montre les éclairements mesurés pour $H/W=2$ avec les façades en crépi. Il n'y a pas eu de conditions de ciel parfaitement sans nuages pour cette configuration. La journée retenue comporte ainsi une couverture nuageuse très légère. Toutefois, pour les sondes sur les façades sans soleil direct, nous observons la même différence d'allure des courbes que pour la configuration avec façades blanches.

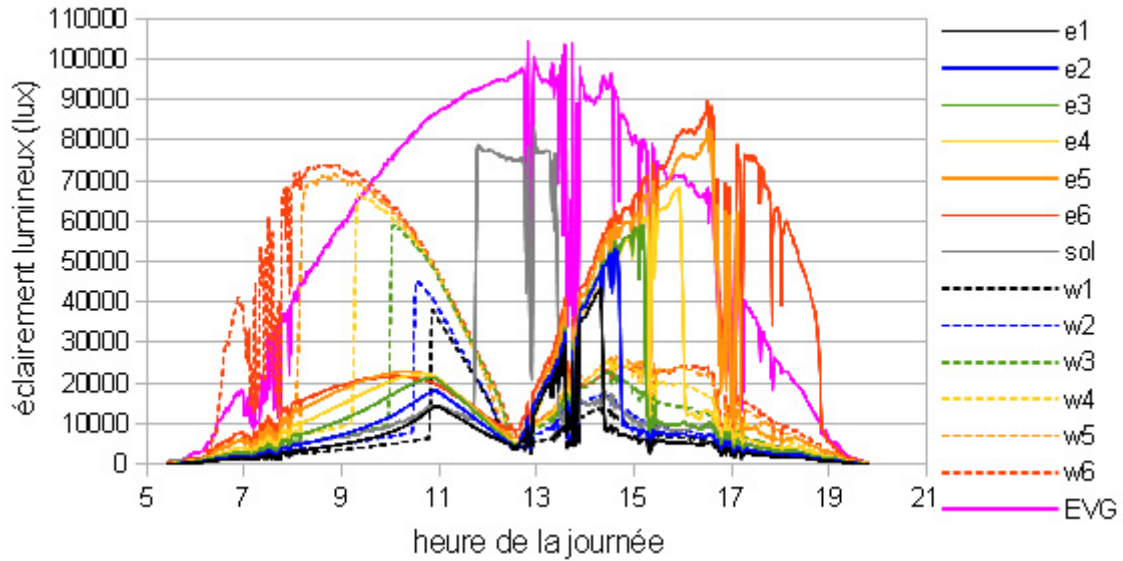


Figure IV-12 : Éclairéments lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=2$ avec les façades en crépi le 03/05/12

Enfin, la Figure IV-13 montre les éclairéments pour les façades avec crépi et fenêtres pour le rapport d'aspect $H/W=2$. Il est intéressant de noter que l'allure des courbes pour les sondes situées sur les façades est la même que pour le revêtement en crépi.

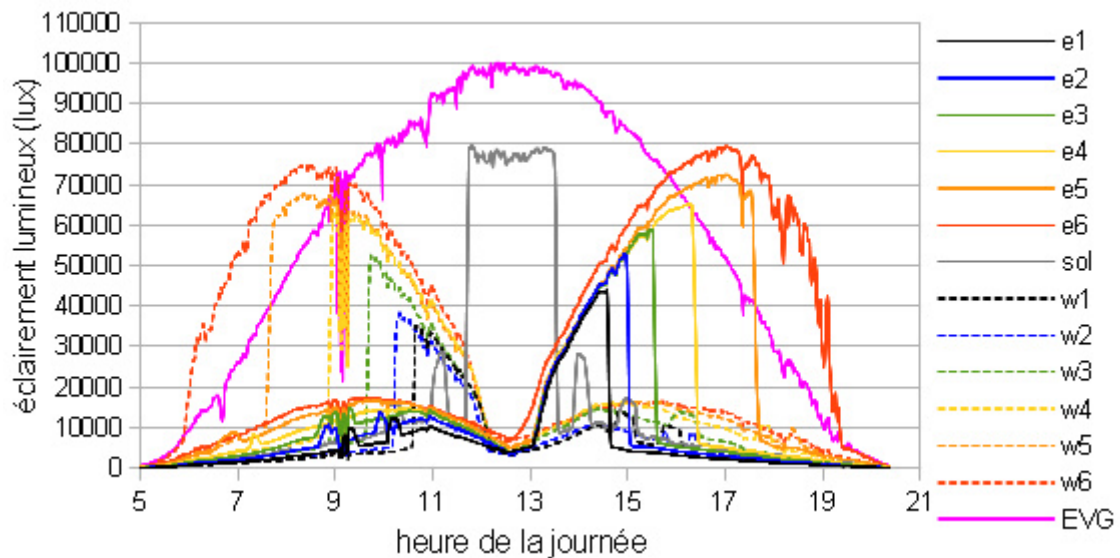


Figure IV-13 : Éclairéments lumineux mesurés sur la maquette pour $H/W=2$ avec les façades en crépi vitré le 01/06/12

Bien que le ciel ait été légèrement nuageux durant cette journée, il est possible de distinguer les variations caractéristiques de ce type de revêtement liées à la contribution des réflexions spéculaires. Cette contribution est fortement remarquable sur la sonde au sol qui présente deux pics d'éclairément lumineux alors qu'elle ne reçoit pas de rayonnement solaire direct. Cela se remarquerait beaucoup moins dans les canyons plus larges. Avec ces valeurs

relativement ponctuelles trois fois supérieures à l'éclairement mesuré en l'absence de ce reflet, il est évident qu'une gêne peut être occasionnée au niveau des automobilistes.

Nous venons d'étudier la quantité d'éclairement lumineux au sol et sur les façades pour différentes configurations d'un canyon urbain, sous des conditions de ciel sans nuages. L'ordre de grandeur des éclairagements mesurés peut varier fortement d'une journée à l'autre, malgré des conditions de ciel équivalentes. Cela provient de la variation des positions du soleil. Les résultats des mesures effectuées sont donc présentés dans cette partie selon une approche relative de l'éclairement lumineux.

L'approche relative consiste à exprimer les valeurs de chacune des sondes par rapport à l'éclairement lumineux horizontal global (EVG). Les résultats sont donnés pour chaque type de ciel défini par la CIE. Cette approche permet d'exploiter toutes les données qui ont pu être mesurées tout en restant indépendant des niveaux d'éclairement. En effet, la campagne de mesure s'est déroulée sur plus d'une année, le rapport d'aspect et le revêtement des façades ont été modifiés à tour de rôle afin de couvrir les 12 combinaisons possibles. De ce fait, l'étude d'un paramètre peut se référer à des données provenant de saisons différentes. Par exemple, le rapport d'aspect $H/W=0,5$ avec les façades noires a été mis en place durant le mois de juin 2012 alors que pour les mêmes façades, le rapport d'aspect $H/W=2$ avait été mis en place pendant le mois de février 2012. Étant donné que les niveaux d'éclairement lumineux en hiver sont plus faibles qu'en été, les valeurs mesurées ne sont pas comparables en l'état. Cependant, si le fait de normaliser les valeurs d'éclairement lumineux mesurées sur la maquette par rapport à l'EVG permet de s'affranchir de la saisonnalité, les mesures restent sensibles à la position du soleil. En effet, la visibilité du soleil dépend à la fois de sa position et de la géométrie de la rue. Pour les ciels CIE pour lesquels le soleil est apparent, il n'est possible d'effectuer une comparaison entre deux configurations que si les positions du soleil sont proches. De plus, la classification CIE est obtenue à partir de la méthode décrite dans la section II.3.4, c'est-à-dire en assimilant les ciels réels à des ciels théoriques à partir des éclairagements lumineux direct normal et diffus horizontal. Selon les limites du modèle, il n'est pas exclu qu'un ciel sans nuages soit détecté alors que le soleil était partiellement occulté par des nuages. Deux situations conduisant au même type de ciel CIE peuvent dans la réalité correspondre à un soleil plus ou moins visible. La comparaison de telles situations donnerait un écart élevé pour un même type de ciel théorique.

Plusieurs méthodes permettent d'éviter de comparer ces situations. Par exemple, il est possible d'utiliser un critère supplémentaire permettant de déterminer si le soleil est visible ou non par les sondes. Cela peut être fait en utilisant une valeur limite de rayonnement solaire direct normal (EVSND), en dessous de laquelle le soleil est supposé caché par la couverture nuageuse et au-dessus de laquelle il est supposé visible. Une autre solution consiste à regrouper les positions du soleil, durant les périodes correspondant aux différentes configurations de la maquette, autour de valeurs arrondies (de la Flor, Ortiz Cebolla, Luis Molina Félix, et Álvarez Domínguez, 2005). Il s'agit de discrétiser les positions du soleil selon des zones du ciel comme cela a été vu dans la section II.4.2 (cf. Figure II-26, page 120). Ces zones permettent de ne comparer que des valeurs mesurées pour des positions de soleil équivalentes. Elles couvrent différentes périodes de l'année et donc éventuellement différentes configurations de la maquette. La Figure IV-14 montre

ainsi des diagrammes solaires générés à partir des données mesurées pour chaque configuration de la maquette. Les périodes de mesure pour un même revêtement peuvent être suffisamment proches pour posséder quelques points communs. Par exemple, il existe un grand nombre de positions de soleil en commun entre le revêtement blanc pour $H/W=1$ et le revêtement noir pour $H/W=2$. Toutefois, il aurait été préférable d'obtenir des positions en commun pour des revêtements identiques. Hors, cela est assez rare puisque les mesures se sont déroulées sur à peine plus d'une année et que les configurations de la maquette ont été mises en place consécutivement. Des diagrammes détaillés sont disponibles dans l'annexe L, les positions du soleil y sont regroupées dans un maillage de 9 degrés de côté. Pour chaque maille, le nombre de situations pour lesquelles le soleil est visible selon le critère géométrique est noté, pour chaque rapport d'aspect et pour chaque revêtement.

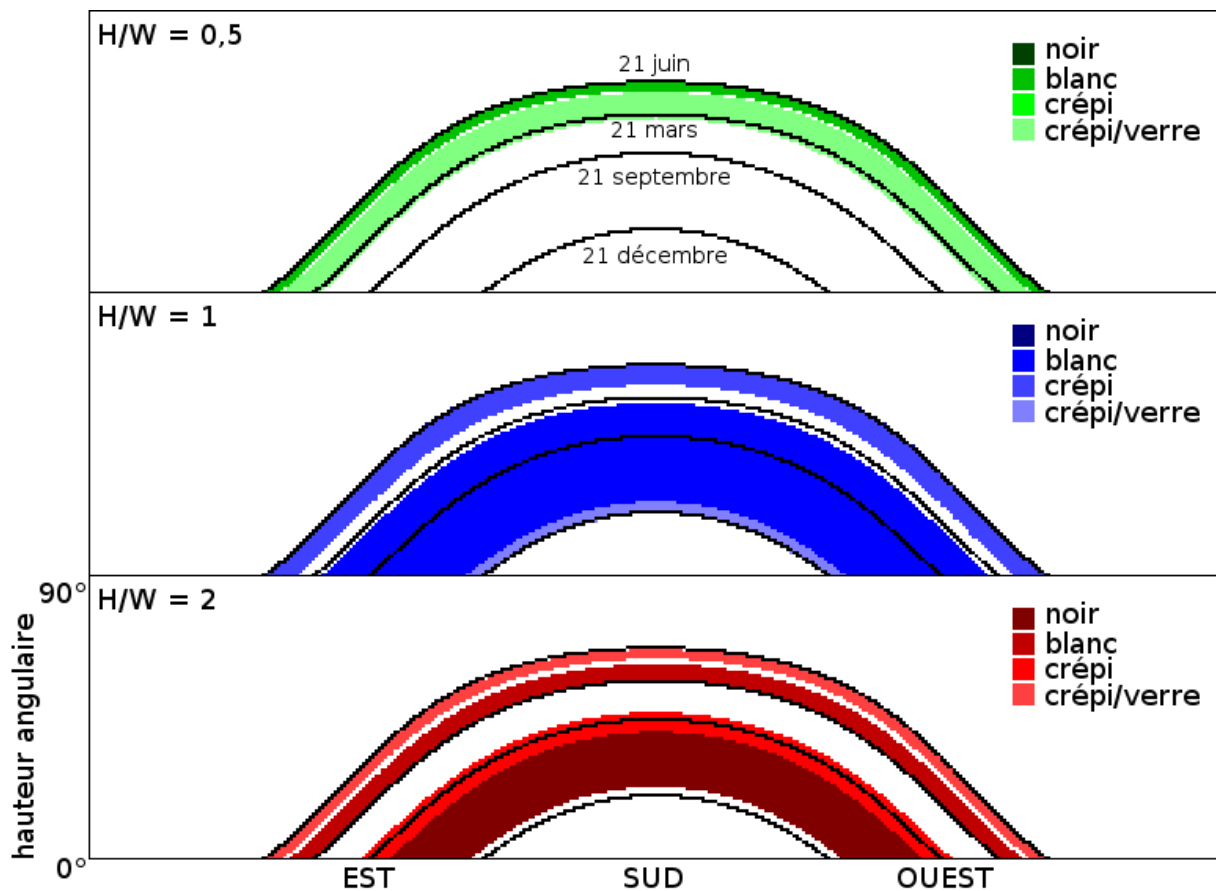


Figure IV-14 : Ensemble des positions du soleil disponibles, pour chaque configuration de la maquette

Compte tenu de la difficulté à trouver des positions du soleil voisines pour des configurations différentes, la base de données est donc divisée en deux pour l'analyse : une partie pour des situations sans soleil qui devrait permettre de comparer les configurations plus facilement, du fait que ces situations sont moins dépendantes de la position du soleil, et une autre partie pour les situations avec soleil visible qui devraient entraîner des écarts plus élevés car les positions de soleil ne seront pas souvent les mêmes. La visibilité du soleil par une sonde sera déterminée à partir de la valeur de l'éclairement direct normal et de la géométrie entre la sonde et le soleil. Le fait de mettre ensemble des situations avec le soleil

non obstrué reste une approximation car en fonction de l'angle d'incidence, la quantité de rayonnement n'est pas identique pour un plan donné. Le seul moyen d'obtenir des résultats indépendants de ce problème serait de comparer une année complète pour chaque configuration. Cela n'aurait été réalisable qu'en mesurant les éclairagements simultanément sur douze maquettes, ce qui représente un dispositif de mesure conséquent. L'intérêt de disposer de logiciels de simulation validés est justement de s'affranchir de ce type de dispositif.

IV.1.2. Réception de soleil direct par les sondes

Le rapport d'aspect du canyon agit directement sur l'accès au rayonnement solaire direct. Dans la suite du document, le soleil est dit "visible" pour une sonde lorsqu'il n'y a pas d'obstacle entre ce dernier et la sonde. La sonde reçoit alors un rayonnement solaire direct et donne une valeur d'éclairement élevée. Toutefois, l'absence d'obstacle ne garantit pas une valeur d'éclairement élevée, ce dernier dépendant aussi de l'angle d'incidence des rayons du soleil. En l'absence de soleil, la sonde ne reçoit qu'un éclairage provenant du ciel et des multiples réflexions du soleil, l'éclairement mesuré est alors généralement dans un ordre de grandeur plus faible. La maquette a été mise en place pour une durée légèrement supérieure à une année mais le rapport d'aspect a été modifié à trois reprises.

IV.1.2.1. Détermination de la visibilité du soleil par une sonde

La méthode permettant de déterminer si le soleil est visible ou non par une sonde est décrite dans cette section. Deux critères vont être décrits dans ce but, le premier (critère géométrique) consiste en une méthode mathématique, le second (critère climatique) utilise les éclairagements mesurés par la station IDMP.

Critère géométrique

Pour simplifier les calculs, le canyon est supposé de longueur infinie. La Figure IV-15 représente le schéma d'un canyon urbain qui permet de calculer l'angle α en dessous duquel le soleil est caché par la façade opposée. Le calcul a été effectué pour les positions de chaque sonde (rond blanc dont l'un est rouge) sur les façades Est et Ouest ainsi que pour la sonde au sol. L'obtention de la valeur de l'angle α se fait à partir des équations suivantes, en commençant par le calcul de β :

$$\beta = azis - 90 \quad (IV-1)$$

Avec *azis* l'azimut du soleil en degrés par rapport au nord, la valeur 90° est liée à l'orientation nord/sud du canyon, cette valeur doit donc être modifiée pour un canyon orienté différemment.

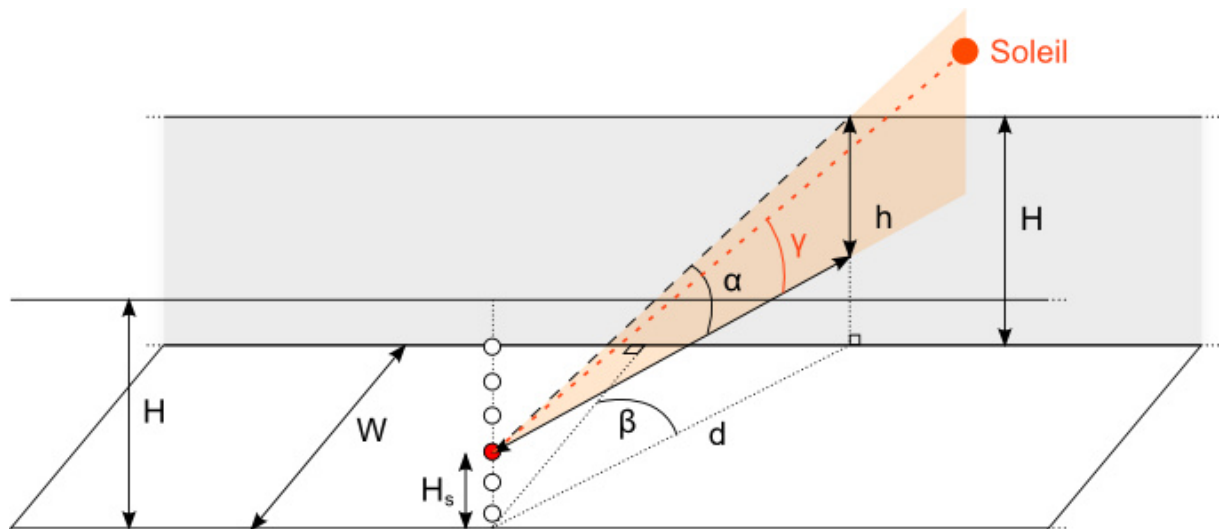


Figure IV-15 : Schéma d'un canyon avec une façade transparente

La valeur de h se calcule de la façon suivante :

$$h = H - (H_s + 0,4) \quad (IV-2)$$

Avec H_s la hauteur de la sonde considérée dans le canyon et H la hauteur des façades, toutes les deux en centimètres. La valeur de 0,4 cm correspond au rayon du disque que représente la surface sensible de la sonde. Le moment où la sonde est ensoleillée correspond donc au moment où le soleil commence à éclairer une partie de cette surface sensible. Enfin il reste à calculer la valeur de d :

$$d = \left| \frac{W}{\cos \beta} \right| \quad (IV-3)$$

Avec W la largeur du canyon en centimètres. Le calcul de α peut être alors effectué à partir des valeurs de β et de h :

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (IV-4)$$

Pour chaque position du soleil, il est maintenant possible de savoir si sa hauteur angulaire γ_s est supérieure ou inférieure à l'angle α et donc de savoir si le soleil est visible ou caché par la façade opposée. Lorsque l'on considère la façade Est qui n'est exposée au rayonnement solaire direct qu'à partir du midi solaire, les sondes sont dans l'ombre tant que l'azimut du soleil est inférieur à 180° , au-delà la formule est appliquée. L'azimut du soleil est donné par rapport au nord, soit 90° pour l'Est et 270° pour l'Ouest. La même hypothèse est effectuée pour la façade opposée, la formule n'est appliquée que pour un azimut du soleil inférieur à

180°. Pour la sonde au sol, la largeur W du canyon est divisée par 2 car elle se trouve à égale distance de chaque façade et sa hauteur est de 0 cm.

En utilisant les données d'azimut et de hauteur angulaire du soleil, il est possible de déterminer à chaque minute si une sonde reçoit du rayonnement solaire direct ou non. Ces données proviennent de la station IDMP dont l'heure et les coordonnées géographiques sont contrôlées. Nous avons vu dans la section III.2.1.2 qu'un décalage vertical entre les façades pouvait mener à des écarts entre le moment où le soleil éclaire directement une sonde par rapport à une géométrie idéale de canyon. Ce décalage varie en fonction de la position du soleil et seulement pour certaines configurations. Comme il n'a pas été journalisé, il n'a pas été pris en compte dans l'estimation de la visibilité du soleil par les sondes. Toutefois, comme cela a été présenté dans la section III.2.1.2, ce décalage peut être à l'origine d'écarts plus importants entre les éclairagements modélisés et mesurés durant l'hiver.

La visibilité géométrique du soleil peut être exprimée sous la forme d'un pourcentage correspondant au nombre de mesures pour lesquelles une sonde a été estimée ensoleillée par rapport au nombre total de mesures enregistrées par cette sonde, cela pour un rapport d'aspect donné. Le résultat pour chaque sonde est représenté sur la Figure IV-16. Les labels de chaque sonde sont tels que ceux définis dans l'annexe F, l'étage 1 est le plus près du sol et l'étage 6 le plus haut. La symétrie des courbes vient de l'orientation nord/sud du canyon, il existe un écart inférieur à 1,2% entre les valeurs d'un même étage entre la façade Est et la façade Ouest. Cet écart s'explique par la présence du relief lointain du côté Ouest légèrement supérieur causé par un bâtiment plus proche que les autres (cf. Figure III-48 page 203). La Figure IV-16 montre que plus la rue est étroite, plus le soleil est caché par la façade opposée pour un étage donné : ainsi au troisième étage, il y a 20% de situations en plus pour lesquelles le soleil est caché pour un ratio $H/W=2$ par rapport à $H/W=0,5$. Lorsque la rue est large, le pourcentage de visibilité du soleil direct décroît linéairement avec la hauteur de l'étage considéré. En revanche, plus la rue est étroite, plus cette linéarité s'estompe, au profit d'une variation dont l'écart est plus important entre les étages les plus hauts. Même pour une rue dont la largeur mesure deux fois la hauteur des bâtiments ($H/W=0,5$), le soleil n'est visible que 50% du temps.

L'accès au soleil est différent pour la sonde au sol selon le rapport d'aspect. Pour $H/W=2$, il s'agit de la sonde la moins exposée, dans la continuité des étages. Pour les deux autres ratios, c'est le premier étage qui prend cette place, voire le second dans le cas de $H/W=0,5$. Il est évident que la contribution du sol dépend de la surface totale de ce dernier, cependant le pourcentage de situations avec soleil ne varie pas linéairement avec la surface de sol à l'intérieur du canyon.

Il est possible d'appliquer le même raisonnement pour n'importe quel lieu, il suffit de calculer les positions théoriques du soleil. Cependant les valeurs utilisées ici sont celles de la BDD, cela permet d'apporter un élément permettant de compléter l'analyse des mesures effectuées sur la maquette. En supposant que le canyon a une longueur infinie, les calculs sont simplifiés, cependant l'erreur commise reste faible car plus l'angle β est grand (avec un maximum à 90°) plus l'angle α est petit et le soleil risque d'être caché par le relief lointain qui varie entre 10° et 15° dans cette situation (cf. Figure III-46).

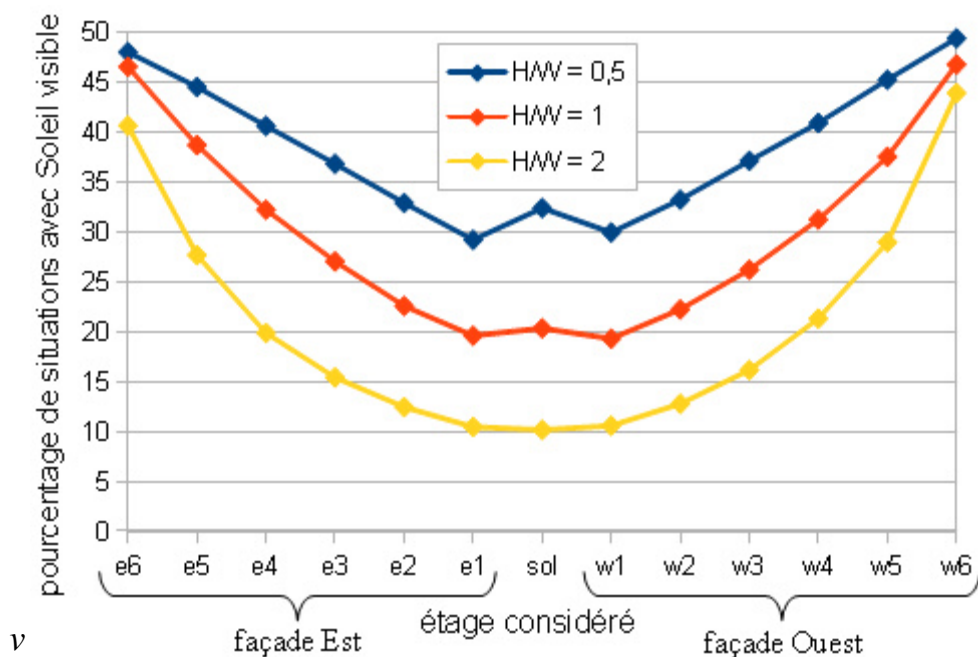


Figure IV-16 : Pourcentage de situations dans la BDD, pour lesquelles le soleil est visible par une des sondes selon le critère géométrique uniquement

Critère climatique

La méthode appliquée précédemment est purement géométrique, il est donc possible que la position du soleil soit telle que ce dernier soit visible dans le cas d'un ciel dépourvu de nuages. En revanche, dans la réalité, il peut aussi être caché par la couverture nuageuse. Dans le cas de notre étude, l'information du rayonnement direct normal (EVSN) est connue, elle peut donc être utilisée pour valider la visibilité du soleil à l'aide d'un critère lié à la météo locale. Cela peut être fait à partir de la valeur du seuil d'ensoleillement de 120 W/m^2 définie par l'OMM (cf. section II.3.1.2). En utilisant une efficacité lumineuse de 98 lm/W (cf. section I.2.3.1 et annexe M) la valeur arrondie d'EVSN au-dessus de laquelle le soleil est supposé visible est de 12 klux.

La Figure IV-17 montre le pourcentage de situations dans la BDD, pour lesquelles le soleil est géométriquement visible par au moins une sonde, mais en réalité caché par la couverture nuageuse. Le pourcentage est présenté pour chaque type de ciel CIE. Comme on pouvait s'y attendre, le critère climatique exclut moins de 4% des données des ciels sans nuages CIE 11 à 13. En revanche, il exclut la totalité des données des ciels couverts CIE 1 à 3 (explications dans la section IV.1.2.2).

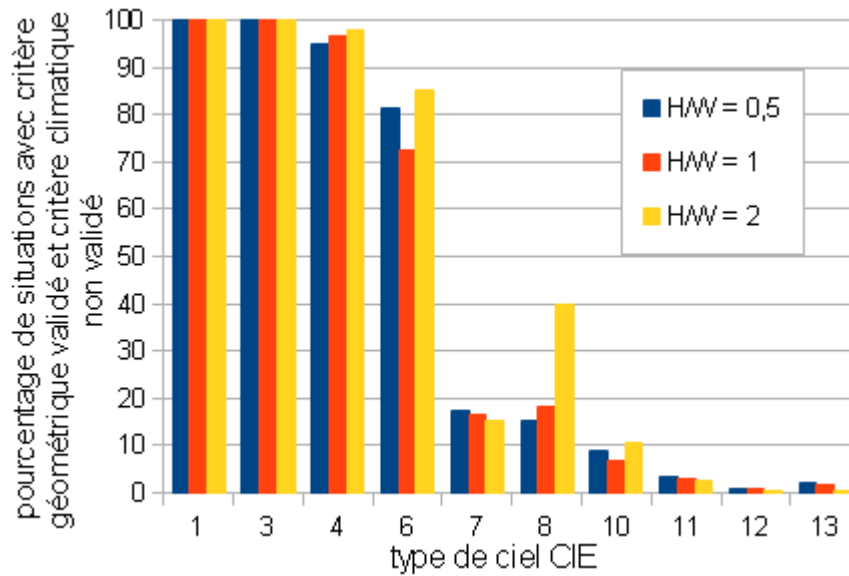


Figure IV-17 : Pourcentage de situations dans la BDD pour lesquelles le soleil est géométriquement visible par au moins une sonde, mais avec $EVSN < 12$ klux

Utilisation combinée des deux critères

La Figure IV-18 montre les résultats obtenus en combinant la condition géométrique de visibilité du soleil et la condition sur le direct normal. Ils sont évidemment plus pessimistes vis à vis de l'accès au soleil des différents étages du canyon. En effet, le soleil est désormais visible pour moins de 30% des situations contre 50% si le critère climatique n'est pas appliqué. Cette différence montre l'importance de l'erreur commise lorsque les méthodes utilisées ne prennent pas en compte les conditions climatiques du lieu. La variation d'un étage à l'autre est aussi moins prononcée. Les valeurs pour un étage donné varient en moyenne, d'une façade à l'autre, de 0,5% pour $H/W=2$, de 1,1% pour $H/W=1$ et de 2,6% pour $H/W=0,5$. Cet écart est supérieur aux situations pour lesquelles seul le critère géométrique était retenu, cela s'explique simplement par le fait que la couverture nuageuse change tout au long de la journée et qu'il n'y a pas de raison qu'une situation s'étant produite le matin se reproduise l'après-midi d'une même journée.

Alors que l'écart entre chaque étage pour $H/W=0,5$ était plutôt linéaire dans le cas de l'utilisation du critère géométrique uniquement, le comportement est différent dans ce cas. En effet, il y a autant de situations avec soleil visible pour les étages 5 et 6, une pente (négative pour la façade Est, positive à l'Ouest) n'est observée qu'à partir du 4^{ème} étage. En revanche pour les deux autres rapports d'aspect, la tendance est conservée bien que l'écart entre les étages soit nettement inférieur et se constate par la forme aplatie des courbes jaune et rouge. Pour la sonde au sol, le pourcentage de situations pour lesquelles le soleil est visible, est divisé par 1,6 par rapport à l'utilisation du critère géométrique seul.

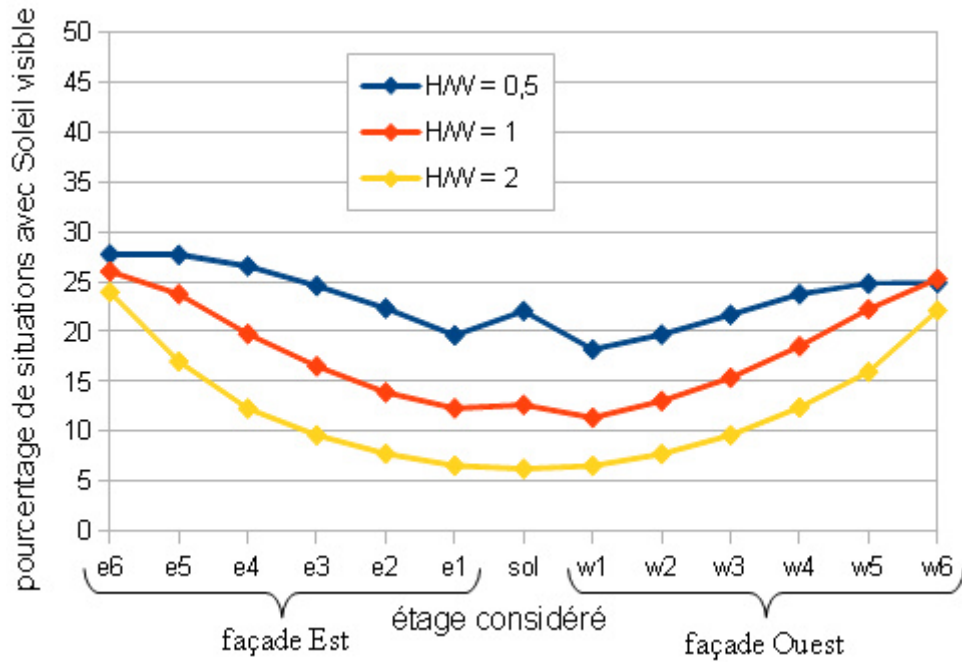


Figure IV-18 : Pourcentage du temps dans la BDD ou le soleil est caché pour chaque sonde avec le critère géométrique et le critère climatique (selon l'OMM)

Afin de les comparer, les résultats obtenus à partir du critère géométrique uniquement et de l'ensemble des critères géométrique et climatique sont confrontés sur la Figure IV-19.

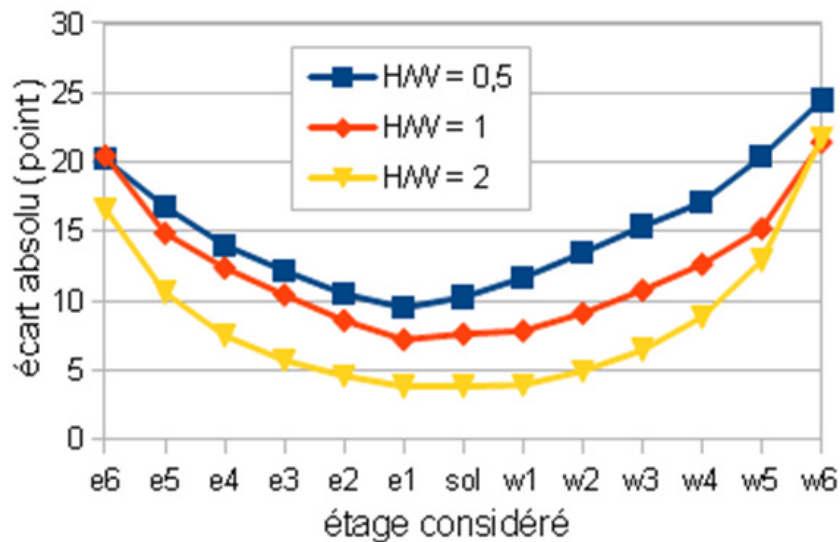


Figure IV-19 : Écart absolu entre le pourcentage de situations avec soleil visible suivant le critère géométrique et suivant les critères géométrique et climatique

Les étages les plus hauts présentent les écarts les plus importants. Cela est dû au fait qu'ils ont une visibilité du ciel plus importante. Ainsi, la probabilité que le soleil soit caché par des nuages est plus grande. Cela confirme qu'il est nécessaire de prendre en compte le climat dans cette analyse. Par exemple, si le lieu était plus ensoleillé, l'écart entre les deux méthodes serait certainement moins important.

La méthode précédemment décrite permet donc de déterminer la visibilité du soleil pour une sonde donnée. Dans la section suivante, les critères géométrique et climatique sont appliqués sur l'ensemble de la base de données afin de caractériser l'accès au soleil de chacune des sondes pendant la période de mesure.

IV.1.2.2. Fréquences de visibilité du soleil pour chaque sonde

Pour chacun des rapports d'aspect, la visibilité du soleil a été déterminée à chaque étage, représenté par une hauteur de sonde, pour toutes les mesures de la base de données, en prenant en compte chaque type de ciel CIE. Ces résultats sont présentés sous la forme de diagrammes en bâtons indiquant la fréquence de situations avec soleil visible.

La Figure IV-20 donne les valeurs obtenues pour le rapport d'aspect $H/W=0,5$. Les types de ciel CIE peuvent être regroupés en trois catégories, les ciels couverts (1 à 5), les ciels partiellement nuageux (6 à 11) et les ciels sans nuages (12 à 15). Pour ce rapport d'aspect, la fréquence de situations pendant lesquelles le soleil est visible est équivalente pour les ciels sans nuages et les ciels partiellement nuageux, à l'exception du type 6 qui se comporte plutôt comme un ciel couvert. Pour la sonde au sol, nous remarquons qu'il n'y a pas de situations avec soleil visible pour le type de ciel CIE 10. L'analyse des données montre en effet que ce type de ciel n'a été observé que pour des azimuts du soleil inférieurs à 105° et supérieurs à 249° , soit lorsque le soleil est caché par les façades pour cette sonde.

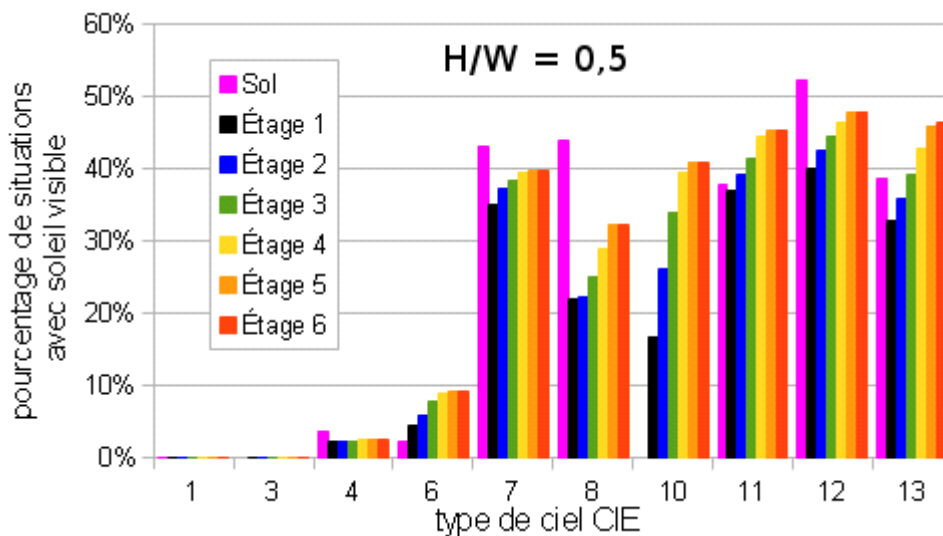


Figure IV-20 : Pourcentage de situations avec soleil visible pour $H/W=0,5$

La variation des fréquences en fonction de l'étage considéré n'est pas tout à fait constante, plus l'étage est haut, plus la fréquence d'un étage à l'autre est proche sauf pour le type de ciel 4 pour lequel la fréquence ne varie quasiment pas d'un étage à l'autre. Les valeurs pour les étages 5 et 6 sont quasiment identiques pour tous les types de ciel. Le fait de constater un ensoleillement plus souvent pour les étages supérieurs correspond à la conclusion générale de la section précédente. En revanche, la sonde au sol ne se classe pas de la même façon en fonction du type de ciel. Par exemple, elle donne une fréquence largement supérieure à tous les étages pour les types 4, 7, 8 et 12. Pour les types 11 et 13, elle est

respectivement supérieure aux valeurs du premier et du deuxième étage, alors qu'elle est la plus faible pour le type 6. La considération du type de ciel est donc très importante pour juger de l'accès au soleil. L'évolution des fréquences d'accès au soleil en fonction du type de ciel présente une rupture nette du type 6 au type 7, les fréquences sont multipliées par 4.

La Figure IV-21 montre les fréquences pour $H/W=1$. L'ordre des fréquences en fonction de l'étage est le même que pour $H/W=0,5$. Cependant l'écart entre les étages est nettement supérieur. Alors que l'écart entre les étages 5 et 6 était quasiment nul pour le cas précédent, l'écart absolu prend des valeurs entre 3% et 8% pour les types 8 à 12 avec $H/W=1$. La variation de cet écart ne suit pas la même loi non plus au-delà du type 7. En effet, contrairement au cas précédent, plus l'étage est haut plus l'écart entre les étages est important. La sonde au sol ne donne des fréquences supérieures à certains étages que pour les types 7 et 8. Pour les autres, elle donne systématiquement la valeur la plus basse. Il y a donc un très net changement d'accès au soleil au niveau du sol en fonction de la largeur de la rue. On observe tout comme pour le rapport d'aspect précédent que l'ordre de grandeur des valeurs du type 7 est supérieur aux types 6 et 8 qui l'encadrent. La distribution des luminances des ciels 6, 7 et 8 sont proches : seule la zone circumsolaire présente une différence. Cela peut provenir d'un moins grand nombre de données disponibles pour les types 8 et 10 par rapport au type 7, comme cela sera présenté à la fin de la section.

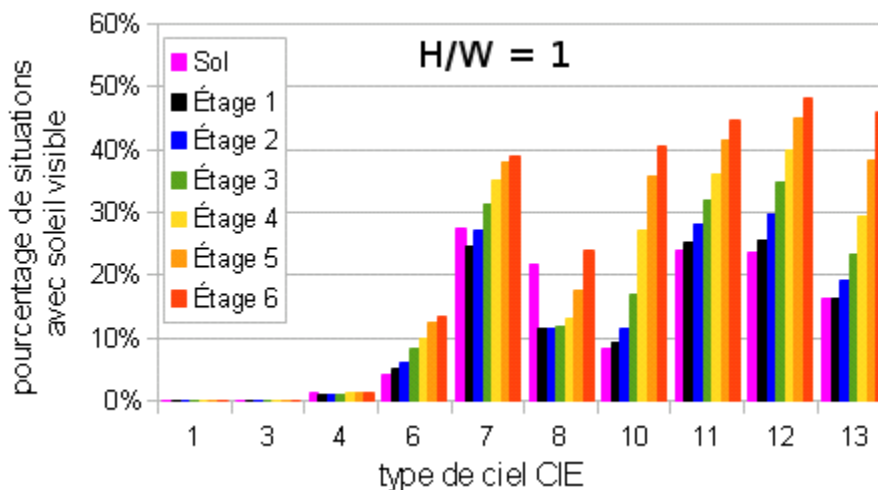


Figure IV-21 : Pourcentage de situations avec soleil visible pour $H/W=1$

La Figure IV-22 montre les fréquences obtenues pour le rapport d'aspect $H/W=2$. Bien que la rue soit plus étroite, les valeurs pour les étages supérieurs ne varient que très peu par rapport aux autres rapports d'aspect pour les types de ciel 10 à 13 avec un écart type inférieur à 2,5% pour l'étage 6 entre les 3 rapports d'aspect, alors qu'il se trouve entre 5% et 12% pour l'étage 5.

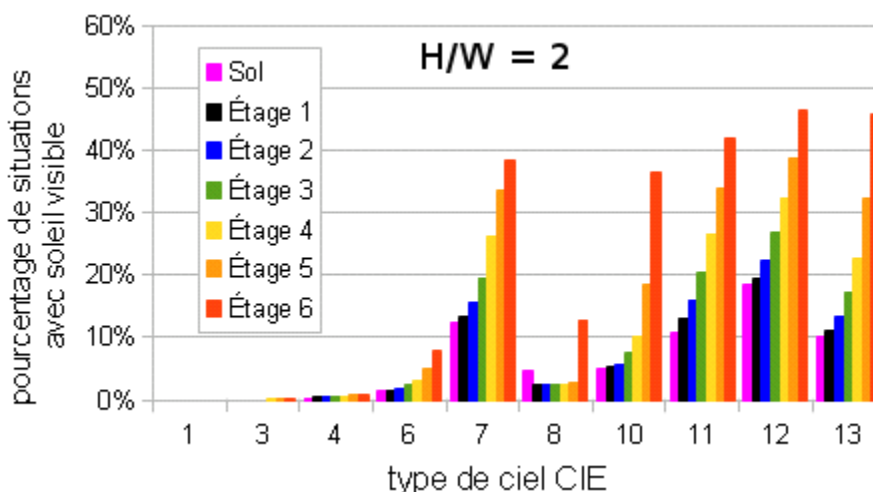


Figure IV-22 : Pourcentage de situations avec soleil visible pour $H/W=2$

La tendance observée pour $H/W=1$ concernant l'écart des valeurs entre les étages est conservée : plus l'étage est haut plus l'écart entre les étages est important. Toutefois la tendance est inversée par rapport à $H/W=0,5$. En effet, les fréquences étaient quasiment identiques pour les étages supérieurs, alors que pour $H/W=2$, ce sont les étages inférieurs qui présentent des valeurs quasiment identiques. L'écart entre les étages 5 et 6 est deux fois plus grand pour $H/W=2$ que pour $H/W=1$. Cette différence est presque nulle pour l'écart entre l'étage 4 et l'étage 5. Enfin, l'ordre de grandeur des valeurs pour le type 7 est une fois de plus supérieur aux types 6 et 8 qui l'encadrent, il s'agit donc d'une tendance systématique.

D'une manière générale, dans chacun des cas, la fréquence des situations avec soleil visible pour chaque étage varie en fonction du type de ciel et du rapport d'aspect. Il en est de même pour l'écart entre chaque étage. Pour les ciels couverts (1, 3 et 4), la valeur est relativement identique, et quasiment nulle, pour chaque niveau y compris au sol. Pour tous les autres types, plus l'étage est haut plus la fréquence est élevée même si la variation dépend du rapport d'aspect. En fonction du rapport d'aspect, le passage d'un étage à l'autre n'implique pas la même perte d'accès au soleil. À hauteur de bâtiment fixe, pour une rue large, le passage d'un étage à l'autre varie peu pour les étages supérieurs, alors que pour une rue étroite, l'écart est le plus important. L'étage le plus haut est une valeur sûre concernant l'accès au rayonnement solaire direct. Quelles que soient les conditions, c'est celui qui garantit le plus de situations pour lesquelles le soleil est visible. Dans le domaine de l'immobilier, le prix des appartements est croissant avec la hauteur de l'étage (Chevallard, 2013). Le Tableau IV-1 montre la variation du prix d'un logement en fonction de son étage, ces données ont été obtenues à partir de statistiques sur plusieurs milliers d'annonces immobilières et des données provenant d'organismes de statistiques non fournies par l'auteur, mais mentionné par ce dernier lors d'un entretien téléphonique. Cela implique certainement plusieurs paramètres, cependant l'article d'où le Tableau IV-1 est tiré, indique l'importance de l'ensoleillement.

| Étage | Écart avec le mètre carré moyen |
|--|---------------------------------|
| Rez-de-chaussée | -15% à -25% |
| 1 ^{er} étage | -7% |
| Du 3 ^{ème} au 6 ^{ème} étage avec ascenseur | +2,5% par niveau |

Tableau IV-1 : Variation du prix du mètre carré d'un logement à l'achat, en fonction de l'étage où il se situe (Chevillard, 2013)

La Figure IV-23 permet de voir l'influence du rapport d'aspect sur la visibilité du soleil par la sonde au sol. Pour les types de ciel sans nuages 12 et 13, cette influence n'est pas linéaire, car l'écart entre $H/W=0,5$ et $H/W=1$ est largement plus grand qu'entre $H/W=1$ et $H/W=2$. En revanche pour les types de ciel 7 et 8, l'écart est quasiment identique. Notons que la visibilité du soleil dépend du rapport d'aspect mais aussi de la position du soleil, et, pour un même type de ciel, il n'est pas garanti que les positions du soleil pour les différentes mesures soient proches. Rappelons aussi que les résultats présentés dépendent du climat de Vaulx-en-Velin. Toutefois, pour les urbanistes, cela signifie que la largeur de la rue doit être corrélée avec l'ensoleillement local. Cela rappelle le principe d'enveloppe solaire énoncé dans la section I.2.1, notamment avec l'observation de Knowles concernant les habitations des Amérindiens, adaptées à l'ensoleillement local aussi bien l'été que l'hiver (cf. Figure I-8 page 35). Le type de ciel 6 présente une particularité, le canyon le plus large ($H/W=0,5$) présente des valeurs inférieures au canyon intermédiaire ($H/W=1$), ce qui n'est pas le cas pour les types de ciels 7 à 13. Cela peut être imputé une fois de plus au fait qu'il y a moins de données disponibles pour cette configuration : deux fois moins de situations avec un ciel de type 6 pour $H/W=0,5$ par rapport aux autres rapports d'aspect.

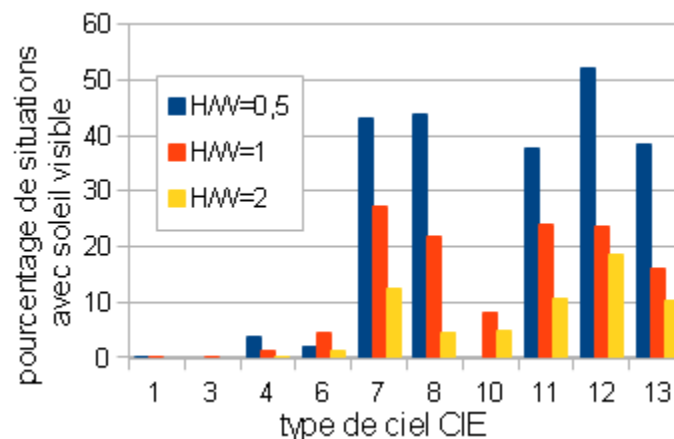


Figure IV-23 : Pourcentage de situations avec soleil visible depuis la sonde au sol en fonction du rapport d'aspect

La Figure IV-24 montre pour chaque étage, les pourcentages de situations avec soleil visible. Les résultats vont dans le sens de la logique, plus l'étage considéré est haut, plus l'influence du rapport d'aspect est faible, cela se traduit par un écart faible entre les différentes valeurs. Par exemple, pour l'étage 6, il y a quasiment autant de situations avec soleil visible pour chaque rapport d'aspect et pour la majorité des types de ciel. En descendant, l'étage 5 présente une variation plus importante qui reste cependant plutôt linéaire. Plus l'étage est près du sol, plus la tendance rejoint celle de la sonde au sol, c'est-

à-dire que l'écart se creuse plus rapidement entre $H/W=0,5$ et $H/W=1$, qu'entre $H/W=1$ et $H/W=2$. La même tendance que pour la sonde au sol se remarque pour tous les étages concernant le type de ciel 6. Contrairement aux autres types de ciel, les valeurs pour $H/W=0,5$ sont inférieures à celles pour le rapport d'aspect $H/W=1$. L'analyse détaillée des données révèle qu'il n'y a pas eu de type CIE 6 détecté pour le canyon $H/W=0,5$ pour des azimuts de soleil situés entre 137° et 225° par rapport au nord. Cela représente une grande partie des situations pour lesquelles le soleil est susceptible d'être visible depuis les sondes, voire la grande majorité pour la sonde située au sol. La tendance remarquée pour ce type de ciel aurait donc pu être différente si des données avaient été disponibles pour ces positions de soleil. Ce biais pourra être pris en compte dans l'analyse ultérieure des données pour ce type de ciel.

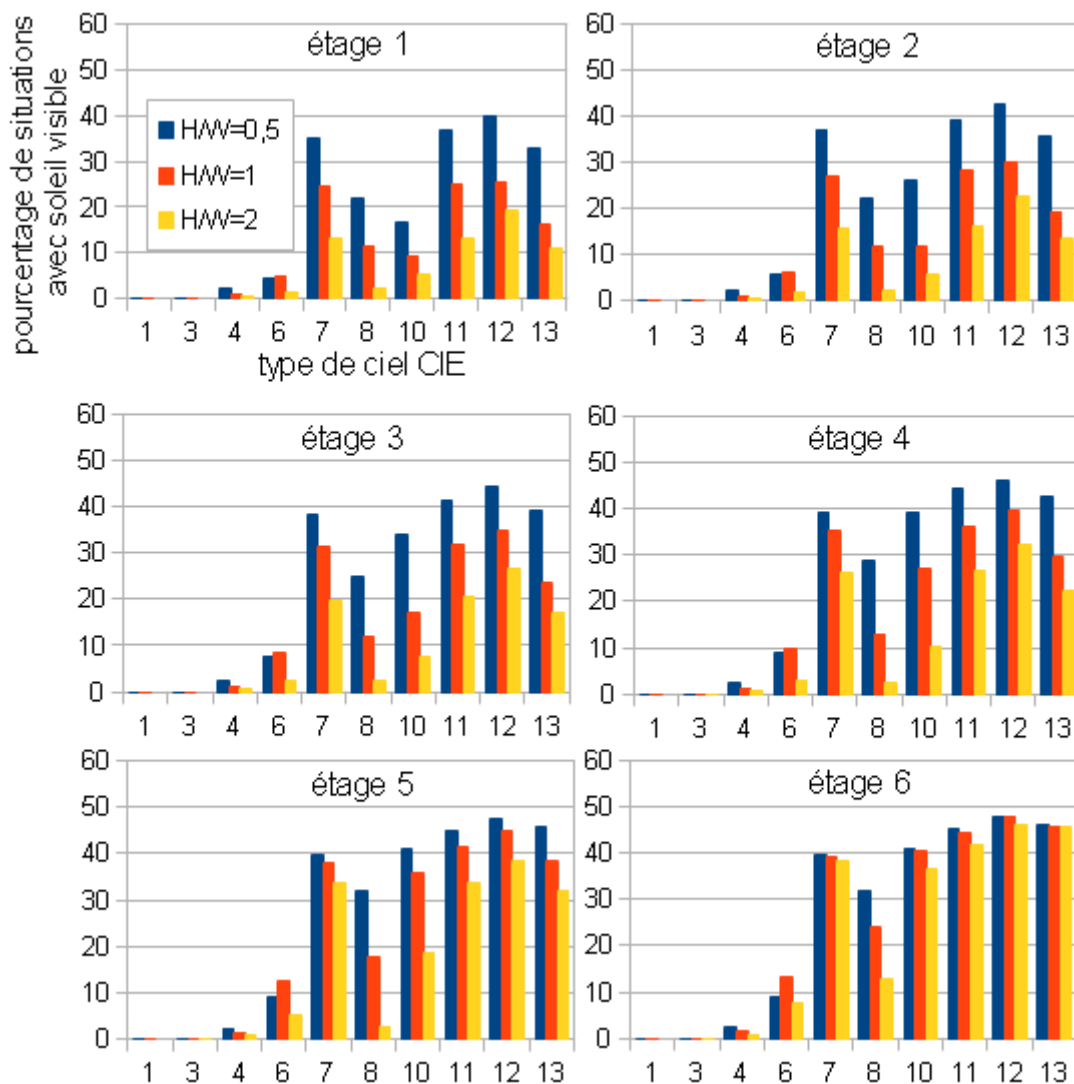


Figure IV-24 : Pourcentage de situations avec soleil visible depuis le centre de chaque étage en fonction du rapport d'aspect

Pour le premier étage, les types de ciel 7, 8 et 10 permettent d'obtenir un plus grand pourcentage de situations avec soleil pour un canyon avec $H/W=0,5$, que des ciels sans nuages (types 11, 12 et 13) pour un canyon avec $H/W=2$. Cette tendance s'observe pour les

étages 2, 3 et 4 et tend à s'estomper à partir du 5^{ème} étage, pour n'avoir plus aucune influence au dernier niveau. Ainsi pour obtenir le meilleur accès au soleil pour les étages inférieurs, il vaut mieux concevoir des rues plus larges que compter sur un climat ensoleillé. Pour quelqu'un qui souhaite acquérir un logement, une règle simple peut être appliquée : l'accès au soleil des étages 4 à 6 dépend peu du rapport d'aspect de la rue, alors que celui des étages inférieurs en dépend plus fortement.

Discussion

Tous ces résultats doivent être mis en parallèle avec la quantité de valeurs qui a permis de les mettre en évidence. En effet, la Figure IV-25 montre, pour chaque rapport d'aspect, la quantité totale de mesures par type de ciel. Si les fréquences utilisées précédemment donnent une indication relative, celle-ci peut être plus ou moins fiable en fonction de la quantité de données qu'elle caractérise. Par exemple, le type CIE 8, qui présente souvent des caractéristiques différentes des autres types, est aussi celui ayant le moins de valeurs enregistrées. D'une manière générale, les ciels couverts (étudiés dans les sections suivantes) et les ciels sans nuages ont bénéficié d'un plus grand nombre de valeurs que les ciels intermédiaires, les fréquences obtenues peuvent donc être utilisées avec plus de confiance.

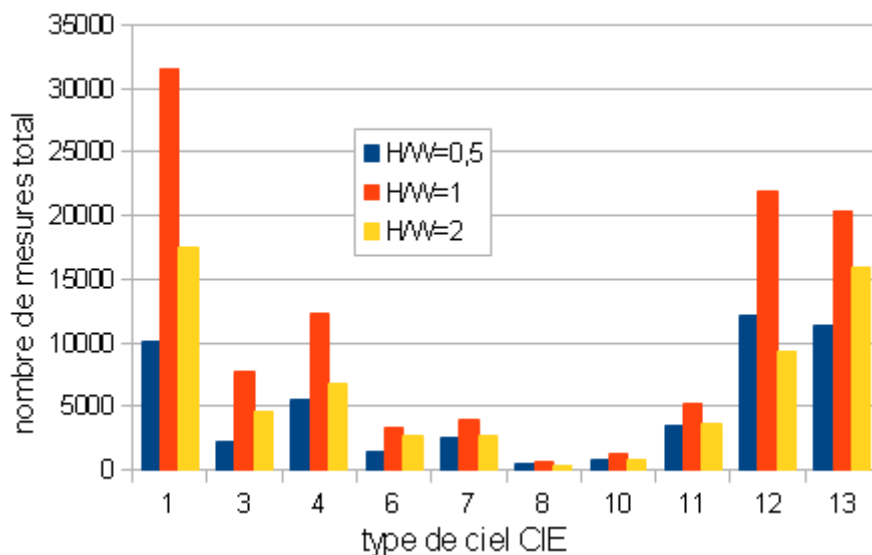


Figure IV-25 : Nombre total de mesures effectuées pour chaque rapport d'aspect, par type de ciel

IV.1.3. Variation de l'éclairement relatif au sol

Cette section présente les variations de l'éclairement relatif mesuré sur le sol de la maquette du canyon urbain. L'éclairement relatif correspond au rapport entre l'éclairement lumineux mesuré par la sonde et l'éclairement lumineux global horizontal mesuré par la station IDMP. Comme annoncé précédemment, les résultats sont présentés d'une part pour des situations sans soleil direct sur la sonde et d'autre part pour des situations avec soleil direct. Les types de ciel CIE sont pris en compte, mais les types 2, 5, 9, 14 et 15 (cf. Tableau II-1

page 111) n'apparaissent pas sur les graphiques car ils n'ont pas été détectés dans la base de données (cf. section III.2.4.2).

IV.1.3.1. Analyse des situations sans soleil direct

La Figure IV-26 montre les éclairagements relatifs de la sonde située au sol, au milieu de la rue, alors qu'elle ne recevait pas de rayonnement direct provenant du soleil. Les résultats sont présentés pour chaque type de ciel CIE, pour chaque rapport d'aspect et pour chaque type de revêtement des façades. Les données sont présentées à l'aide de boîtes à moustaches indiquant la valeur médiane (trait noir), le 1^{er} et le 3^{ème} quartile (la boîte), ainsi que les valeurs minimale et maximale.

Pour $H/W=1$, les valeurs mesurées avec le revêtement noir sont très inférieures à celles mesurées avec les autres revêtements. L'analyse détaillée des données a montré que cet écart était dû à un mauvais alignement de la sonde au sol. En effet la première configuration correspondait un rapport d'aspect de $H/W=1$ avec les façades noires. Lors du montage des façades blanches qui a suivi, il a été remarqué que la sonde n'était plus horizontale, la légère inclinaison qu'elle a subie a conduit à une captation inférieure de l'éclairage lumineux du fait d'une visibilité du ciel amoindrie. Ce problème a été corrigé et n'a plus été remarqué. Les données de cette sonde seront donc ignorées pour cette configuration.

En premier lieu, l'observation des boîtes sur la Figure IV-26 montre que plus le ciel est dépourvu de nuages (autrement dit que plus le numéro du type CIE est élevé), plus l'éclairage relatif est faible, ce quel que soit le rapport d'aspect. Lorsque l'éclairage relatif est proche de 1, cela signifie que l'éclairage mesuré est proche du global horizontal (EVG). Cette valeur est approchée au mieux pour les ciels couverts, notamment le type CIE 1. Pour ce type de ciel, l'horizon est la zone la moins lumineuse, jusqu'à trois fois moins que le zénith. Lorsque celui-ci est masqué par les façades, le reste du ciel contribue suffisamment pour que l'éclairage lumineux mesuré reste proche de la situation dégagée. Ce phénomène est cohérent avec la répartition des luminances en fonction de la couverture nuageuse comme le montre la Figure II-17 (page 105). La luminance au zénith est plus élevée qu'à l'horizon pour des ciels couverts et inversement pour des ciels sans nuages. Étant donné que cette sonde est placée horizontalement et que les façades créent une obstruction de la majeure partie de la voûte céleste, il est normal que les résultats soient très représentatifs de la luminance du zénith car il s'agit quasiment de la seule zone qui est visible par la sonde.

Le changement de rapport d'aspect conserve la tendance de la diminution de l'éclairage relatif entre les ciels couverts et les ciels sans nuages, bien qu'il ait une influence sur les valeurs mesurées. En réduisant la largeur de la rue, la visibilité du ciel s'amoindrie et implique la réduction de l'éclairage mesuré par la sonde au sol. Du fait de la répartition des luminances du ciel, cette diminution de l'éclairage relatif est plus visible pour les ciels couverts.

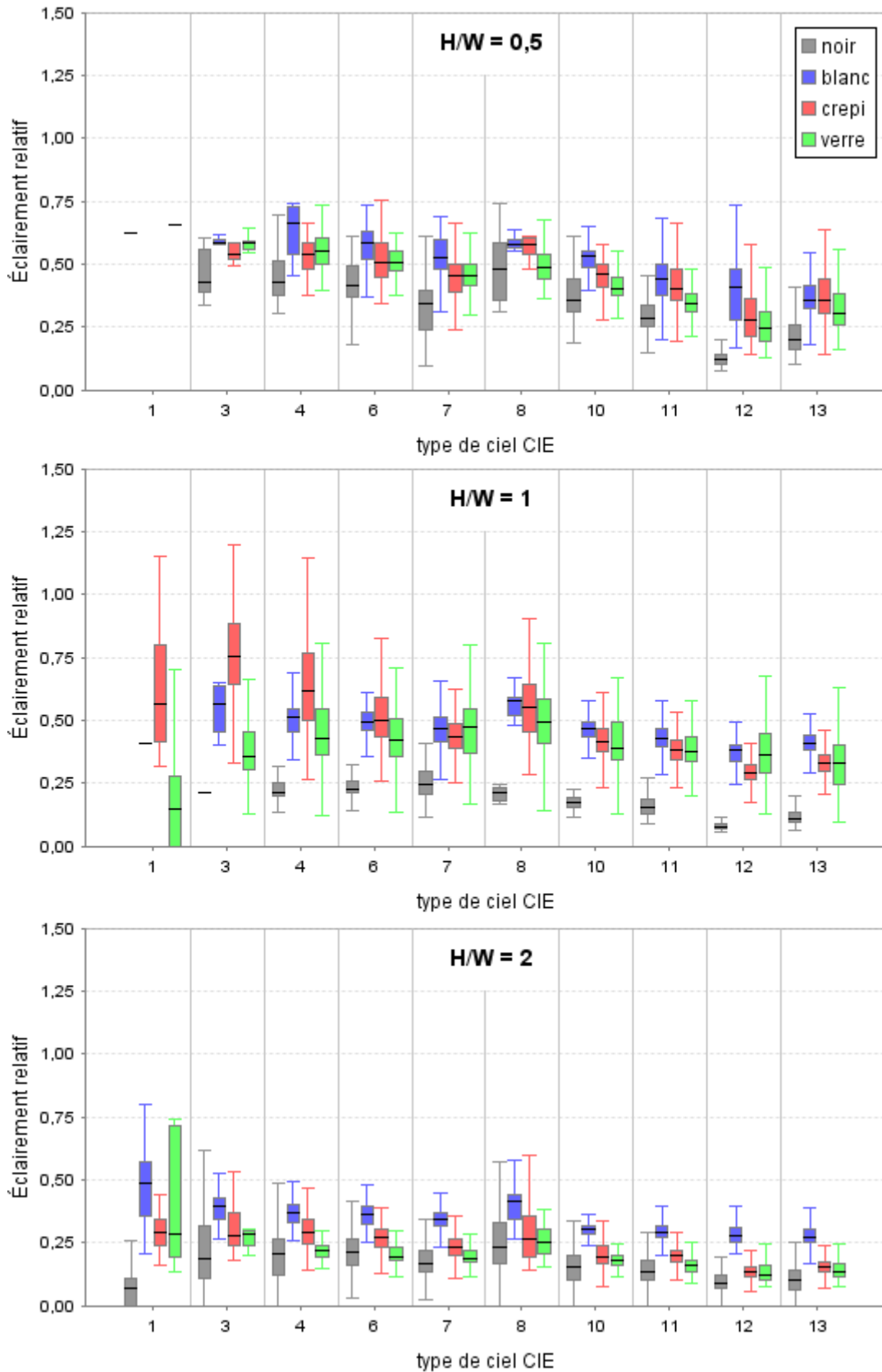


Figure IV-26 : Éclairage relatif mesuré au sol pour chaque rapport d'aspect et pour chaque revêtement sans soleil visible

Nous pouvons observer des valeurs très élevées pour le revêtement crépi avec $H/W=1$. En effet, l'éclairement relatif prend des valeurs supérieures à 1, cela signifie que la sonde mesure un éclairement lumineux plus élevé qu'à l'horizontal. En l'absence de rayonnement solaire direct, cela est peu probable car la sonde mesure l'éclairement provenant uniquement du ciel, dont elle a une visibilité réduite du fait de la présence des façades, contrairement à l'éclairement lumineux global horizontal qui lui est mesuré en l'absence d'obstruction. Cela signifierait alors que la contribution du revêtement crépi est très importante. L'étude détaillée de ces valeurs montre qu'il s'agit de situations pour lesquelles le soleil se trouvait en face de la sonde. Cela indique une erreur dans l'estimation de la visibilité du soleil : des situations avec la sonde directement éclairée ont été prises en compte. Ce phénomène se retrouve au niveau des sondes situées sur les façades et provient d'un écart entre la géométrie réelle de la maquette, qui est imparfaite, et la géométrie idéale qui a été utilisée pour définir le critère géométrique ayant pour but de déterminer la visibilité du soleil pour une sonde en fonction de sa position dans le canyon.

Le type CIE 8 provoque une légère rupture avec cette tendance. En effet, ce dernier présente des valeurs plus élevées que le type CIE 7, notamment visibles pour $H/W=2$. Cela peut être expliqué par la combinaison de deux faits. D'une part, la Figure IV-25 montre qu'il y a eu peu de situations avec ce type de ciel, ce pic pourrait donc être moins important avec un plus grand nombre de valeurs. Rappelons qu'il s'agit d'un ciel partiellement nuageux (cf. Tableau II-1, page 111), avec une visibilité du soleil qui varie régulièrement. D'autre part, la Figure IV-27 montre que les hauteurs angulaires de soleil pour ce type étaient soit parmi les plus faibles soit parmi les plus élevées. Ainsi, lorsque le soleil était situé à une hauteur angulaire élevée, il a pu être caché par des nuages, entraînant ainsi une diminution de EVSN sous le seuil de 12 klux, mais contribuant pourtant à une luminosité élevée du ciel du fait de la présence de ces nuages.

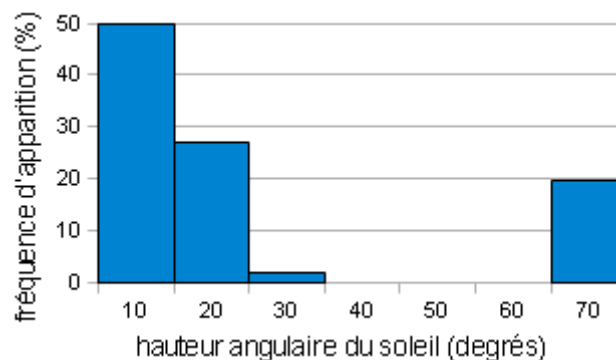


Figure IV-27 : Distribution des hauteurs angulaires du soleil pour les ciels CIE 8

L'analyse visuelle des boîtes de la Figure IV-26 permet de mettre en évidence l'influence du type de revêtement sur l'éclairement relatif au sol. Le revêtement noir donne systématiquement les valeurs médianes les plus faibles. Le revêtement blanc donne majoritairement les valeurs les plus élevées. Ces deux résultats étaient attendus et s'expliquent directement par le fait que la contribution des façades est plus importante lorsque leur facteur de réflexion lumineux est élevé. L'écart entre le revêtement crépi et le

revêtement crépi vitré est peu marqué : ce dernier menant à des valeurs médianes inférieures de 12% en moyenne.

La Figure IV-28 montre la variation des valeurs médianes d'éclairement relatif de la Figure IV-26. Rappelons qu'il ne faut pas considérer les valeurs pour $H/W=1$ avec le revêtement noir car la sonde au sol a subi un désalignement durant la période de mesures. Ces diagrammes permettent de mettre en valeur la réduction de l'éclairement relatif au sol avec la réduction de la couverture nuageuse, ce pour tous les revêtements. Les valeurs obtenues avec $H/W=2$, soit la rue la plus étroite, sont les plus faibles la plupart du temps. Elles oscillent autour de 0,2 pour tous les revêtements sauf le blanc qui permet d'obtenir des valeurs quasiment deux fois plus élevées. Concernant les rapports d'aspect $H/W=0,5$ et $H/W=1$, il n'y a pas de tendance remarquable, quel que soit le revêtement. La valeur pour le type de ciel CIE 13 est cependant systématiquement supérieure à celle du type 12. Il s'agit bien de deux ciels sans nuages mais le type 13 est plus troublé, ce qui contribue à une luminosité du ciel plus élevée. La partie visible du ciel est donc plus lumineuse, ce qui implique un écart moins important par rapport à l'éclairement global horizontal, et donc un éclairement relatif légèrement plus élevé.

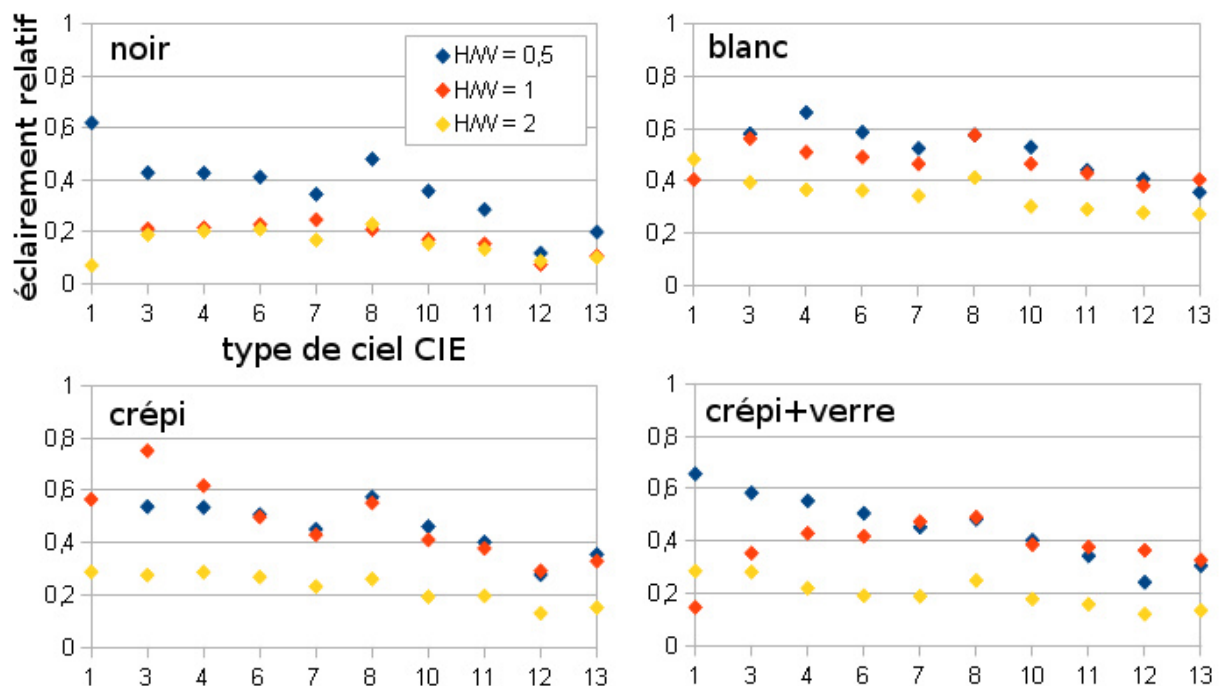


Figure IV-28 : Variations de la valeur médiane de l'éclairement relatif, pour la sonde au sol

La Figure IV-29 permet de visualiser l'influence du changement de revêtement pour un même rapport d'aspect. Chaque valeur correspond au rapport entre l'éclairement relatif d'un revêtement et l'éclairement relatif du revêtement noir. Des valeurs proches de 1 indiquent par conséquent des valeurs d'éclairement relatif équivalentes à celles mesurées avec le revêtement noir. Pour $H/W=1$, les valeurs pour le revêtement noir sont supposées inférieures à la réalité du fait du mauvais alignement de la sonde. Ainsi, l'écart relatif réel pour ce rapport d'aspect doit donner des valeurs plus petites. Nous remarquons que pour $H/W=0,5$

et $H/W=2$, les écarts relatifs ont le même ordre de grandeur, il est raisonnable de supposer que cela en soit de même pour $H/W=1$.

Étant donné que les valeurs sont proches, quel que soit le rapport d'aspect, l'influence de ce paramètre est peu marquée. Cela s'explique par la position de la sonde. En effet, les échanges radiatifs entre deux éléments de surface dépendent de l'angle entre la normale à leur surface et la droite qui les relie (cf. annexe K). Lorsque la rue est large, la visibilité des façades depuis la sonde au sol est moindre, son importance grandit avec le rapprochement de ces dernières. Les écarts sont plus importants pour les types de ciel sans nuages, notamment le type CIE 12, cela implique que la blancheur des façades contribue d'autant plus à un éclairage lumineux élevé au sol lors de conditions de ciel dégagé. Notons aussi que le revêtement blanc donne des valeurs quasiment deux fois supérieures aux autres revêtements pour $H/W=2$. L'utilisation d'un revêtement très clair est donc plus bénéfique à une rue étroite qu'à une rue large ($H/W=0,5$) pour l'obtention d'un éclairage relatif plus élevé au milieu de la rue. Les valeurs pour le revêtement crépi sans verre sont peu différentes de celles pour le revêtement crépi avec verre, la présence des parties vitrées modifie donc peu la quantité d'éclairage relatif mesurable au sol.

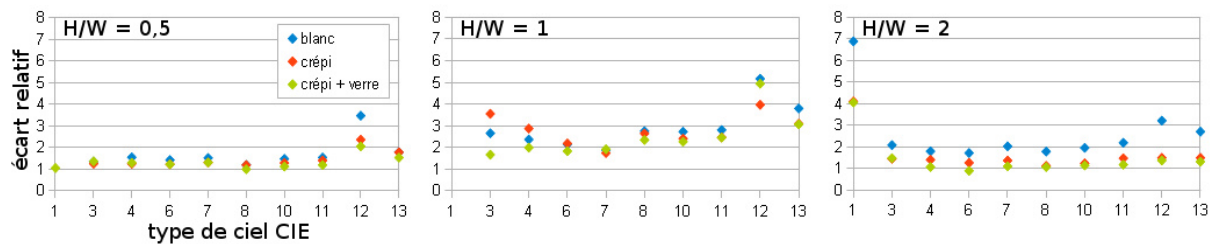


Figure IV-29 : Écart relatif entre les valeurs médianes de chaque type de revêtement, par rapport aux façades noires

IV.1.3.2. Analyse des situations avec soleil direct

La Figure IV-30 montre le même type de résultat pour la sonde au sol mais cette fois uniquement lorsque le soleil est visible par la sonde selon les critères décrits précédemment. Cette situation intervient essentiellement en milieu de journée : le matin et l'après-midi, le soleil étant caché par les façades. En fonction du rapport d'aspect, la durée d'ensoleillement de la sonde au sol est plus ou moins longue (cf. section IV.1.1). Malgré la campagne de mesures relativement longue, les graphiques présentent des valeurs manquantes. En effet, certaines combinaisons de type de ciel, de position de soleil, de revêtement de façade et de rapport d'aspect ne se sont pas produites. Nous pouvons remarquer des valeurs pour le type CIE 1, alors que le soleil n'est pas censé être visible pour ces conditions de ciel. L'étude détaillée des données montre qu'il n'y a en réalité que cinq valeurs représentées : deux pour $H/W=0,5$ et trois pour $H/W=1$. Pour ces situations, EVSN est compris entre 12 klux et 19 klux. Ces valeurs sont suffisamment élevées pour satisfaire le critère de visibilité du soleil décrit précédemment, dont la valeur seuil de 12 klux n'est pas suffisamment élevée pour exclure ces situations.

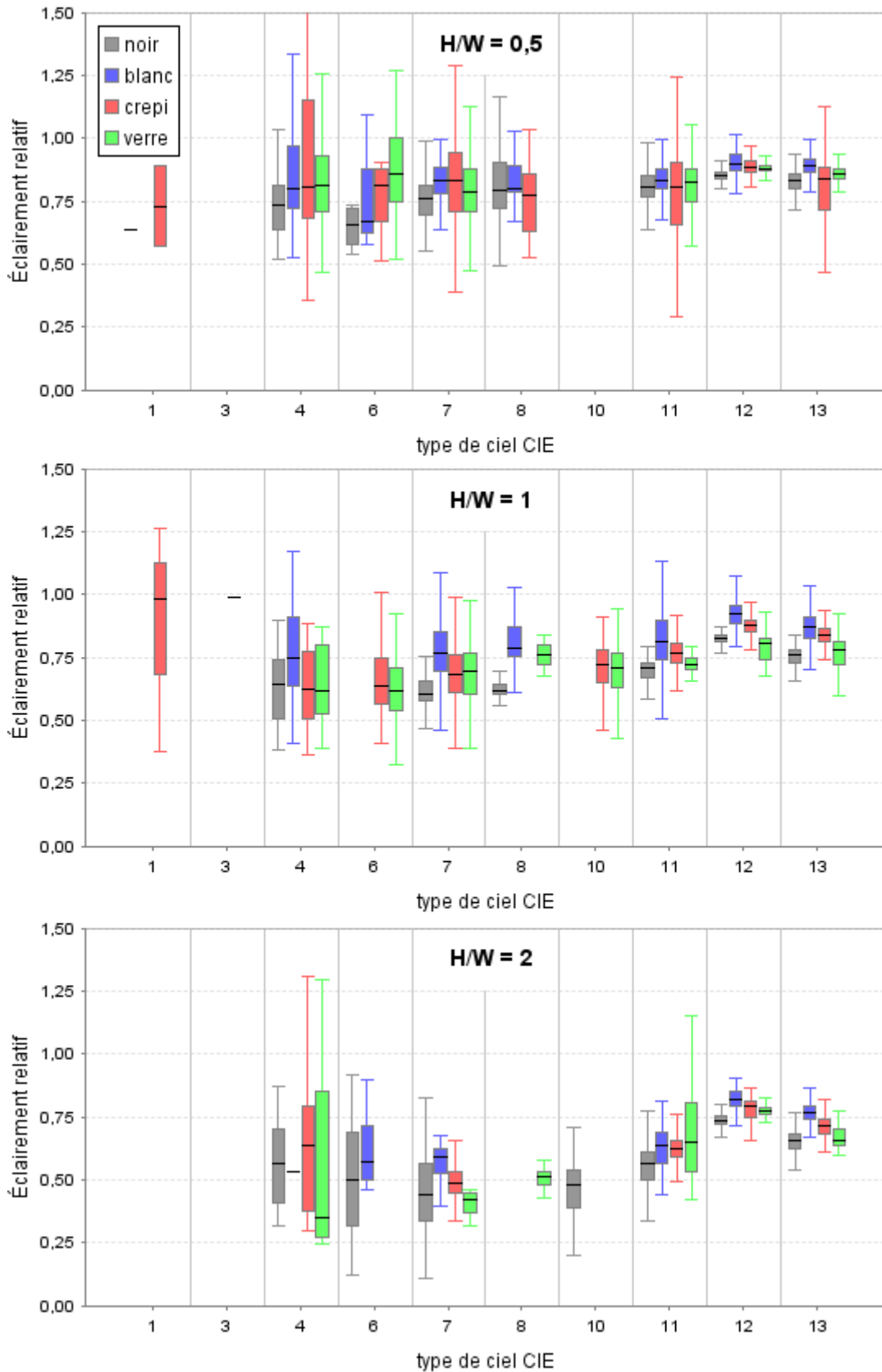


Figure IV-30 : Éclaircement relatif au sol pour chaque rapport d'aspect avec soleil visible

Tout comme pour les résultats obtenus sans soleil, plus le rapport d'aspect est grand (plus le canyon est étroit), plus l'éclairement relatif au sol est faible. Cependant, la tendance s'inverse légèrement en fonction du type de ciel. En effet, quel que soit le type de ciel, l'éclairement relatif est relativement constant pour $H/W=0,5$. En revanche, pour les canyons plus étroits, nous observons le contraire des situations sans soleil visible, c'est-à-dire que plus le ciel est dégagé, plus l'éclairement relatif est élevé, pour un rapport d'aspect donné. La contribution des façades est plus importante pour les situations de ciel sans nuages car le rayonnement solaire direct est plus élevé, ce qui augmente les échanges radiatifs entre les façades au sein du canyon. Il est ainsi possible d'observer des valeurs d'éclairement relatif supérieures à 1, sauf dans le cas du revêtement noir pour lequel les échanges entre les façades sont fortement réduits.

Il est difficile de déterminer avec précision l'influence du revêtement sur l'éclairement relatif mesuré au sol, du fait du manque de données, contrairement aux situations sans soleil pour lesquelles la lecture du graphique était plus évidente. De plus, les plages d'éclairements relatifs sont assez larges, avec des valeurs extrêmes plus éloignées. Cela s'explique notamment pour les types 4 à 10, par la présence d'une couverture nuageuse variable. En ce qui concerne l'influence du revêtement sur l'éclairement relatif pour les types 11, 12 et 13, nous observons le même type de résultats que pour les situations sans soleil visible. Le revêtement noir donne les valeurs les plus faibles alors que le revêtement blanc donne les plus élevées, suivi par le crépi et le crépi vitré, tout comme pour les situations sans soleil visible.

D'après les données disponibles, le revêtement noir donne tout de même majoritairement les valeurs les plus faibles. Pour $H/W=0,5$, les revêtements blanc, crépi et crépi avec fenêtres permettent d'obtenir des valeurs médianes assez proches, traduisant une faible influence du revêtement des façades pour ce rapport d'aspect. Un écart se crée pour $H/W=1$ en faveur du revêtement blanc. Le revêtement crépi peut donner des valeurs plus élevées, ce résultat pourrait néanmoins être différent si nous avions bénéficié d'un plus grand nombre de données. Cependant, il est possible d'expliquer les moments où le revêtement avec les fenêtres donne les valeurs les plus élevées. Comme le montre la photo de droite sur la Figure III-40 (page 194), en présence de soleil, il est possible que la sonde au sol reçoive une forte quantité d'éclairement provenant de la réflexion du soleil sur les parties vitrées.

L'éclairement relatif au sol est donc peu dépendant du revêtement des façades, avec ou sans soleil visible. Cette influence est cependant plus marquée avec les façades possédant le facteur de réflexion lumineux le plus élevé, quelles que soient les conditions de ciel. Elle augmente aussi avec le rapport d'aspect, qui creuse l'écart des valeurs médianes pour chaque revêtement quelles que soient les conditions de ciel. Toutefois, les situations avec ciel sans nuages montrent une plus grande sensibilité au revêtement des façades. Durant la période de mesures, la maquette était équipée de 13 sondes placées au milieu du canyon, une au sol et 6 sur chaque façade. Nous allons étudier dans les sections suivantes les éclairements relatifs obtenus sur les façades de la même façon que pour la sonde au sol, c'est-à-dire pour des situations avec ou sans soleil.

IV.1.4. Variation de l'éclairement relatif à chaque étage

Dans les sections suivantes, les valeurs d'éclairement relatif sont présentées conjointement pour les façades Est et Ouest. Par convention, la façade dite "Est", se trouve vers l'Est, elle est donc orientée face à l'Ouest, elle est susceptible de recevoir du rayonnement solaire direct durant l'après-midi. Le premier étage correspond à la sonde située le plus du sol sur une façade, l'étage 6 correspond au niveau le plus haut. Comme pour les diagrammes utilisés pour la sonde au sol, les résultats sont présentés pour les quatre revêtements utilisés et pour chacun des trois rapports d'aspect.

IV.1.4.1. Analyse des situations sans soleil direct

La Figure IV-31 et la Figure IV-32 représentent les valeurs d'éclairement relatif à tous les étages pour le rapport d'aspect $H/W=0,5$, soit le canyon le plus large, ce pour les façades Est et Ouest.

Pour ce rapport d'aspect, les valeurs médianes de l'éclairement relatif oscillent majoritairement entre 0,15 et 0,3. L'influence de la hauteur de l'étage est assez faible, il en va de même pour celle du type de ciel. Notons toutefois un fait remarquable concernant les types CIE 1 et 13. Pour les autres types de ciel, couverts (3 ou 4) ou sans nuages (11 ou 12), la médiane la plus élevée est généralement obtenue avec le revêtement blanc, soit 64% des 120 valeurs présentées. Mais pour les types 1 et 13, c'est systématiquement le revêtement crépi qui permet d'obtenir la médiane la plus élevée. Il semble donc que la combinaison d'un revêtement de façade avec une distribution de luminances du ciel modifie la distribution des éclairagements au sein du canyon. Il y a moins de 10 valeurs disponibles par sonde pour le type CIE 1 et le revêtement crépi, avec ce rapport d'aspect. Cela est trop faible pour tirer des conclusions à partir de ces données, alors qu'il y a plus de 1000 valeurs pour le type 13. La médiane par revêtement, en regroupant les types de ciel et les étages pour les deux façades, se trouve en moyenne à 0,19 pour le revêtement noir, à 0,28 pour les revêtements crépi et crépi vitré, et à 0,3 pour le revêtement blanc.

Nous observons des différences entre les valeurs pour la façade Est et la façade Ouest. Cela peut être dû à la différence d'orientation entre les sondes placées verticalement. Cependant, des sondes opposées ont une visibilité différente du ciel, ce qui mène directement à des mesures différentes de l'éclairement lumineux, il est donc normal d'observer des écarts entre les données provenant des deux façades.

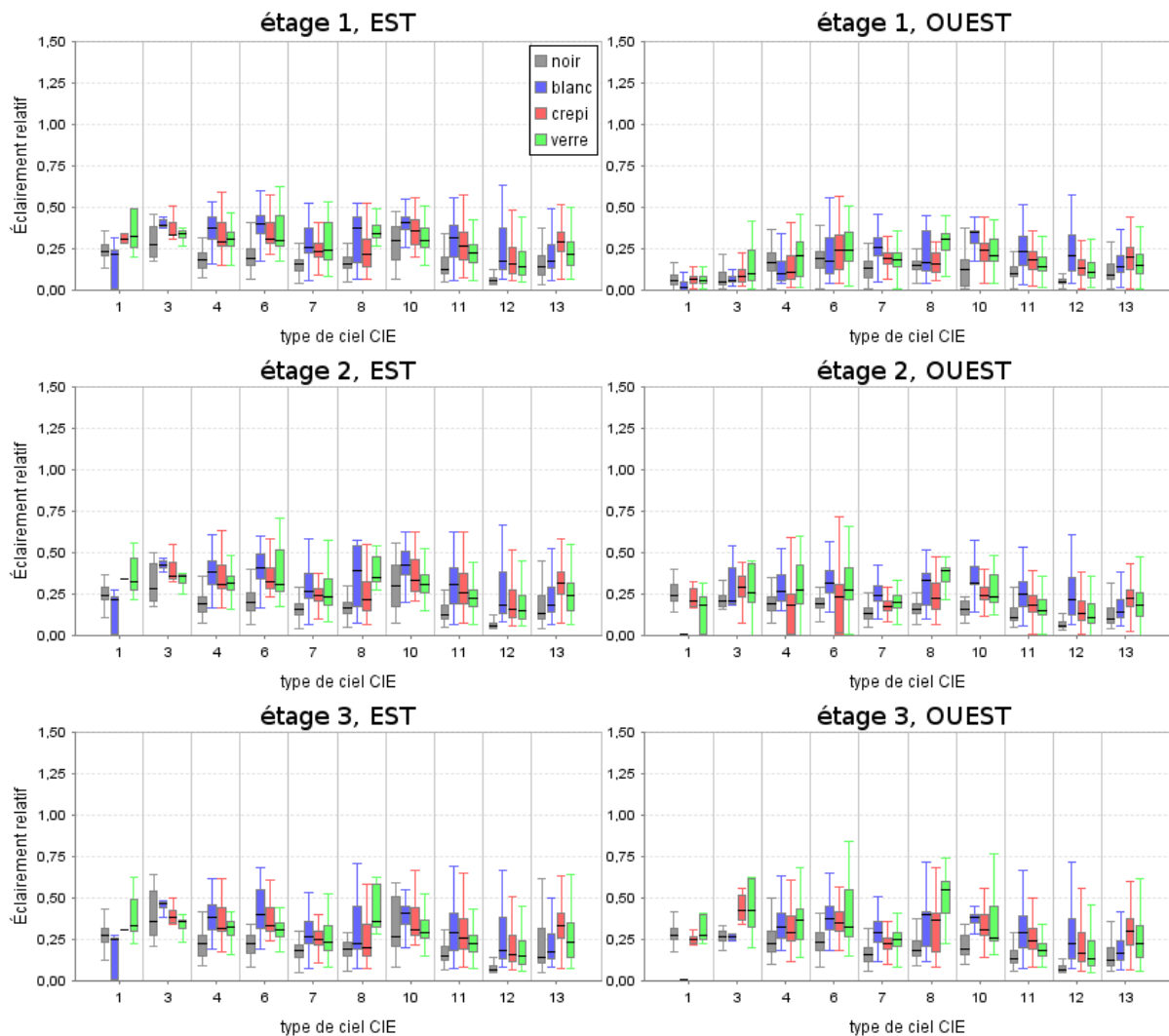


Figure IV-31 : Éclaircement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec $H/W=0,5$ pour les situations sans soleil visible

Nous remarquons des valeurs assez élevées pour le revêtement en crépi vitré avec le type CIE 8 au niveau de l'étage 4 (cf. Figure IV-32). Des éclaircissements relatifs compris entre 0,6 et 0,9 ont été calculés pour les sondes correspondant à cet étage. Pour chacune des sondes, cela correspond à des situations pour lesquelles le soleil se trouve juste en face de la sonde. Ces données correspondent donc à des situations pour lesquelles le soleil était visible et ne devraient donc pas apparaître. Rappelons que deux critères sont utilisés pour définir la visibilité du soleil par une sonde : le fait qu'il soit caché par la façade opposée (ou derrière la sonde), et que l'éclaircement direct normal soit inférieur à une valeur de 12 klux. C'est le critère géométrique qui a laissé passer ces valeurs. En effet, cela provient d'un écart entre la géométrie réelle de la maquette et la géométrie idéale qui a été utilisée pour définir les valeurs limites de ce critère. Les mêmes conditions ont été observées pour la sonde située à l'Est au niveau de l'étage 5 et pour le type CIE 10.

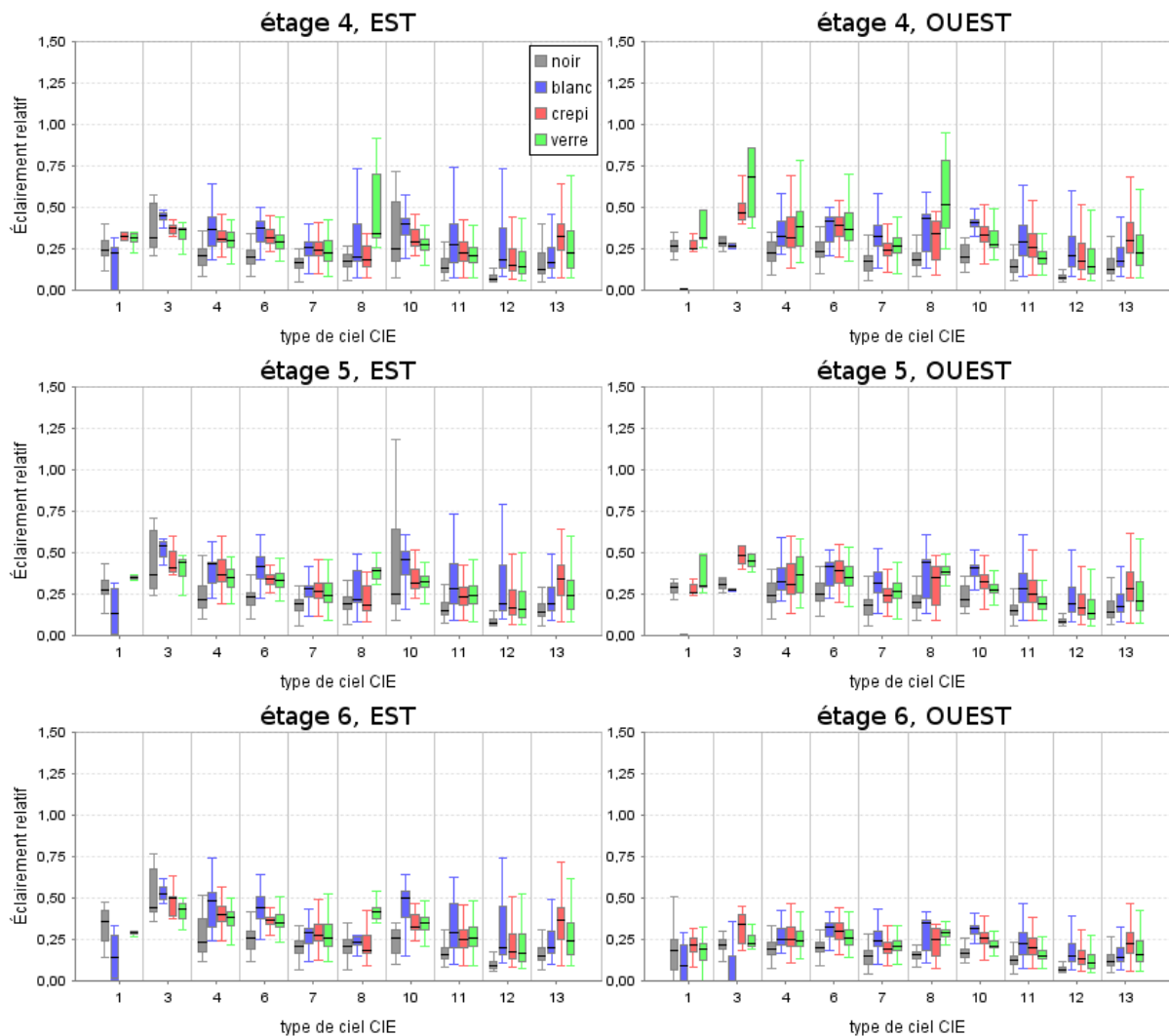


Figure IV-32 : Éclaircement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec $H/W=0,5$ pour les situations sans soleil visible

La Figure IV-33 et la Figure IV-34 présentent les éclaircissements relatifs pour $H/W=1$, des tendances apparaissent par rapport à $H/W=0,5$. Dans un premier temps, nous remarquons que les données pour les façades Est et Ouest sont moins différentes. Cela se remarque d'autant plus au niveau des étages inférieurs. Quel que soit le revêtement, 90% des écarts relatifs entre les médianes Est et Ouest sont inférieurs à 0,2. Les étages situés plus haut ayant une visibilité du ciel plus importante, les valeurs mesurées à ces niveaux dépendent donc plus des variations de la couverture nuageuse. L'influence de l'étage considéré est donc plus importante pour ce rapport d'aspect : l'éclaircement relatif augmente avec la hauteur de l'étage, de même que la dispersion des valeurs. Notons que ce rapport d'aspect permet beaucoup mieux de constater l'influence du revêtement. Nous pouvons séparer l'analyse en deux parties : pour les étages 1 à 3 et pour les étages 4 à 6. Les étages inférieurs sont plus propices à l'étude de l'influence du revêtement. Le revêtement blanc donne toujours les valeurs les plus élevées, et le noir, les moins élevées. Cela s'inscrit bien dans le souhait initial de disposer de revêtements permettant d'obtenir les valeurs les plus élevées et les moins élevées, pour situer ensuite le comportement d'un revêtement plus réaliste, le crépi, voire aussi pour évaluer l'influence de la présence des fenêtres.

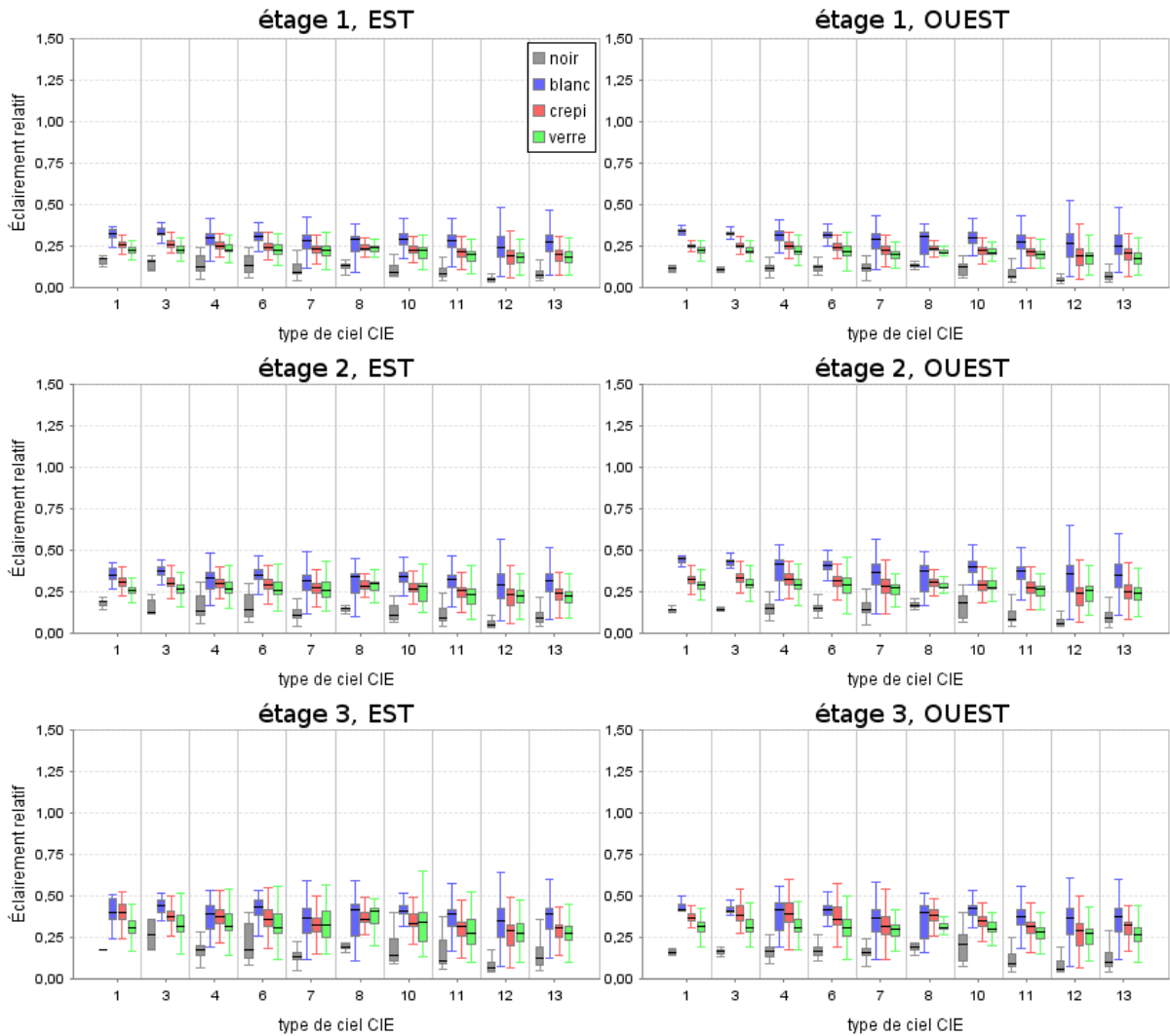


Figure IV-33 : Éclairage relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec $H/W=1$ pour les situations sans soleil visible

Pour les étages supérieurs (4 à 6), les valeurs extrêmes sont plus éloignées que pour les étages inférieurs. Nous pouvons même remarquer des éclairages relatifs supérieurs 1. En l'absence de soleil visible, une valeur d'éclairage relatif supérieure à 0,6 peut être considérée comme élevée. L'étude des situations pour lesquelles ces valeurs sont constatées mène à la même conclusion que pour $H/W=0,5$. En effet, lors de ces situations, le soleil se trouve en position d'éclairer directement les sondes considérées. Cela met donc en cause la différence entre la géométrie réelle de la maquette qui n'est pas parfaite, par rapport aux calculs géométriques qui ont été utilisés pour déterminer l'ensoleillement des différentes sondes. Le fait que cela se produise plus souvent pour le revêtement crépi s'explique par le fait que ce type de façade, avec $H/W=1$, a été installé durant 96 jours, contre une moyenne de 21 jours pour les autres combinaisons de revêtements et de rapports d'aspect. Avec presque quatre fois plus de mesures, la probabilité de constater l'écart entre la géométrie réelle et idéale est donc plus élevée.

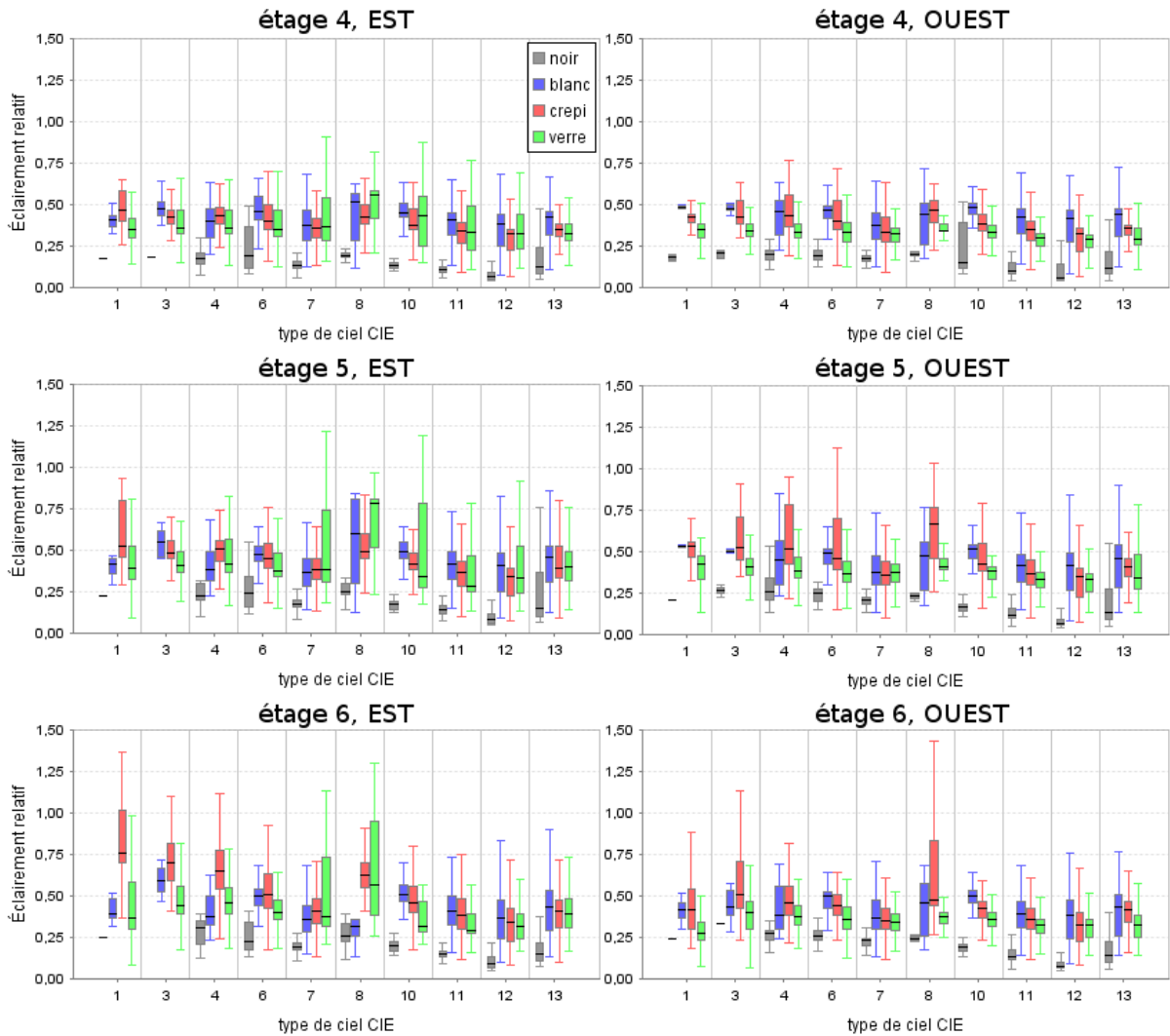


Figure IV-34 : Éclaircissement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec $H/W=1$ pour les situations sans soleil visible

La Figure IV-35 et la Figure IV-36 montrent l'éclaircissement relatif pour $H/W=2$. Ce rapport d'aspect permet d'obtenir des résultats très intéressants concernant l'influence du revêtement et de la hauteur de l'étage. En effet, avec une visibilité du ciel fortement réduite quelle que soit la sonde considérée, le facteur de réflexion lumineux du revêtement devient un paramètre plus critique. Notons que ces données ne mettent pas en évidence de situations avec un écart induit par la géométrie réelle de la maquette. L'éclaircissement relatif prend des valeurs élevées pour le revêtement blanc au niveau de l'étage 6. Cela pourrait être dû à l'erreur sur la géométrie, cependant, le soleil se trouve aussi bien en face de la sonde pour ces situations que dos à celle-ci. Avec le soleil derrière, le critère géométrique ne peut être à l'origine des valeurs élevées. Cela est donc dû à la contribution de la façade opposée, qui est ensoleillée à ces moments. L'écart entre les médianes obtenues pour la façade Est et Ouest est inférieur à 0,2 dans 90% des cas tout comme pour $H/W=1$.

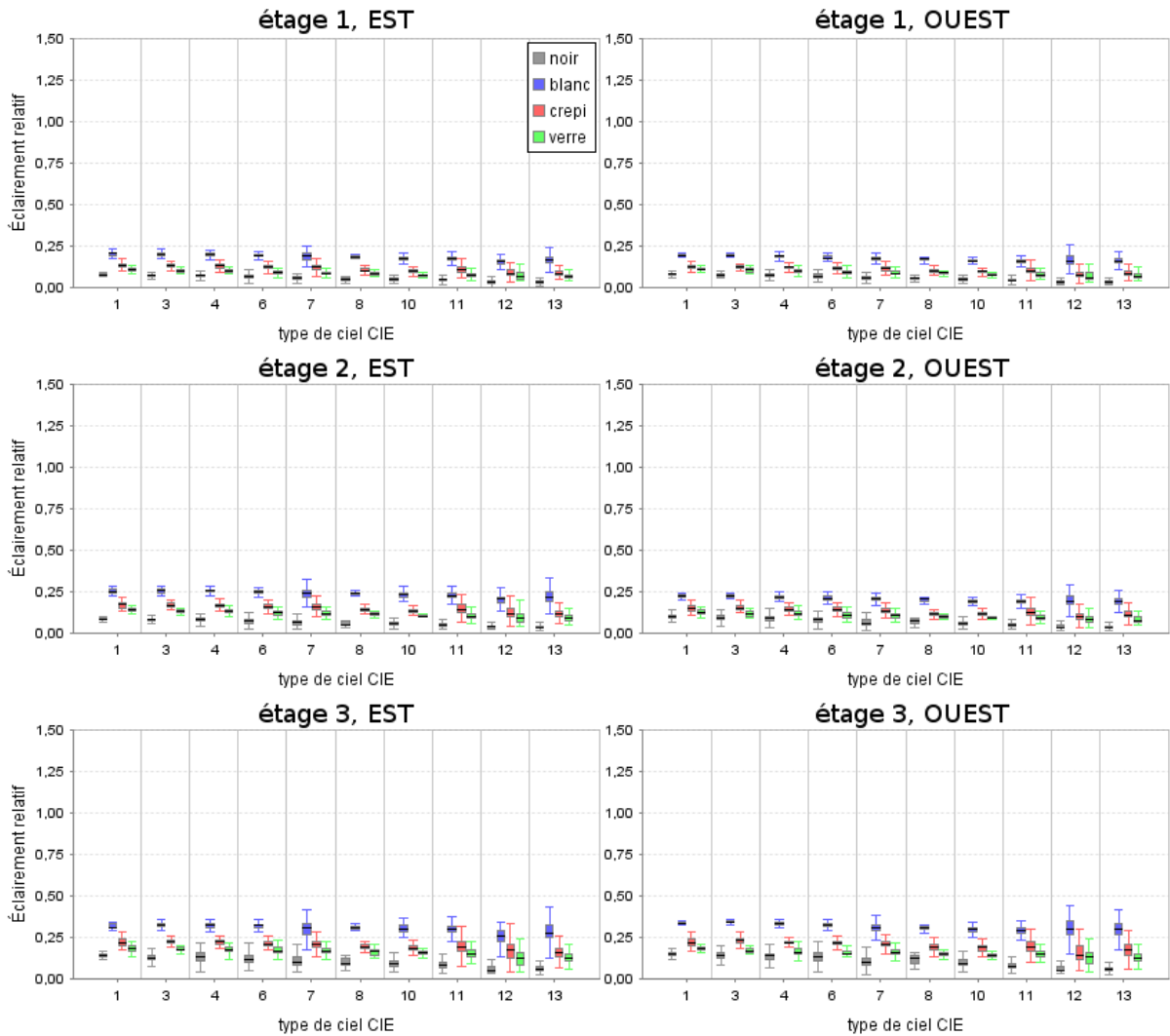


Figure IV-35 : Éclaircissement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec $H/W=2$ pour les situations sans soleil visible

Il est intéressant de remarquer l'écart entre les valeurs extrêmes en fonction de l'étage. La même conclusion que pour les autres rapports d'aspect peut être effectuée : plus l'étage considéré est haut, plus cet écart augmente. Toutefois, pour $H/W=2$, les étages inférieurs donnent des écarts vraiment très faibles, de l'ordre de 0,1 pour les étages 1 et 2 par exemple.

Comme pour $H/W=0,5$ et $H/W=1$, les revêtements noir et blanc donnent respectivement la médiane la plus faible et la plus élevée. Les revêtements crépi et vitré, se situent entre les deux, dans le même ordre, validant les hypothèses sur l'influence de la présence des fenêtres mais permettant aussi de la chiffrer. Cela est fait dans le paragraphe suivant.

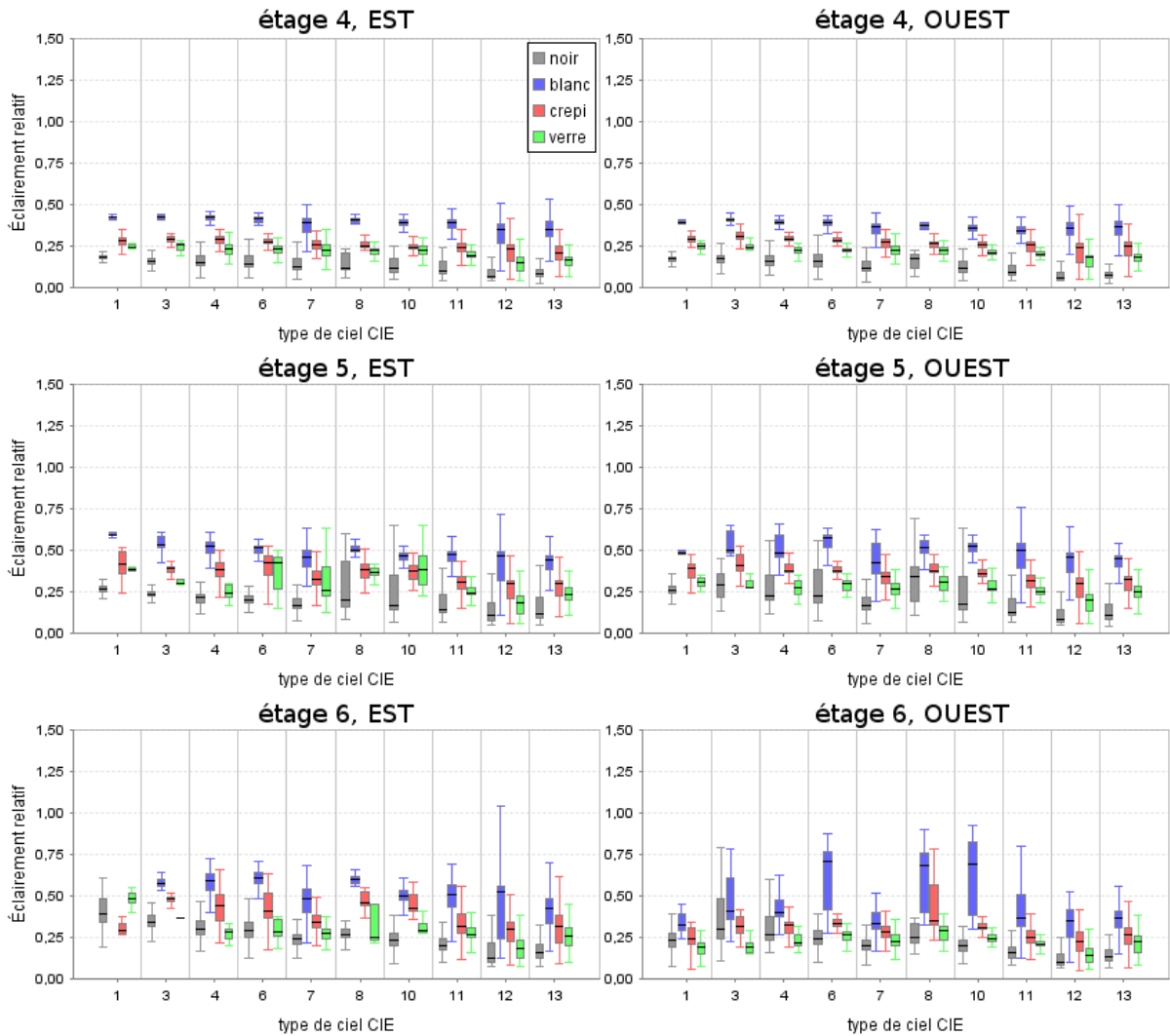


Figure IV-36 : Éclaircement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec $H/W=2$ pour les situations sans soleil visible

Pour analyser l'influence du type de revêtement sur l'éclaircement relatif, il est possible de calculer l'écart entre les valeurs obtenues pour chaque revêtement par rapport au revêtement noir, comme cela a été fait dans la section précédente pour la sonde située au sol. Dans le cas des sondes situées sur les façades, cela implique une grande quantité de diagrammes dont la lecture peut être peu évidente. Afin de pouvoir évaluer l'influence des différents paramètres, c'est-à-dire la hauteur de l'étage, le type de ciel, le rapport d'aspect et le revêtement, sur la valeur de l'éclaircement relatif, une représentation graphique des résultats a été mise en place.

Gain d'éclaircement par rapport à un revêtement noir :

plus de 3
 de 2,5 à 3
 de 2 à 2,5
 de 1,5 à 2
 de 1 à 1,5
 moins de 1
 pas de donnée

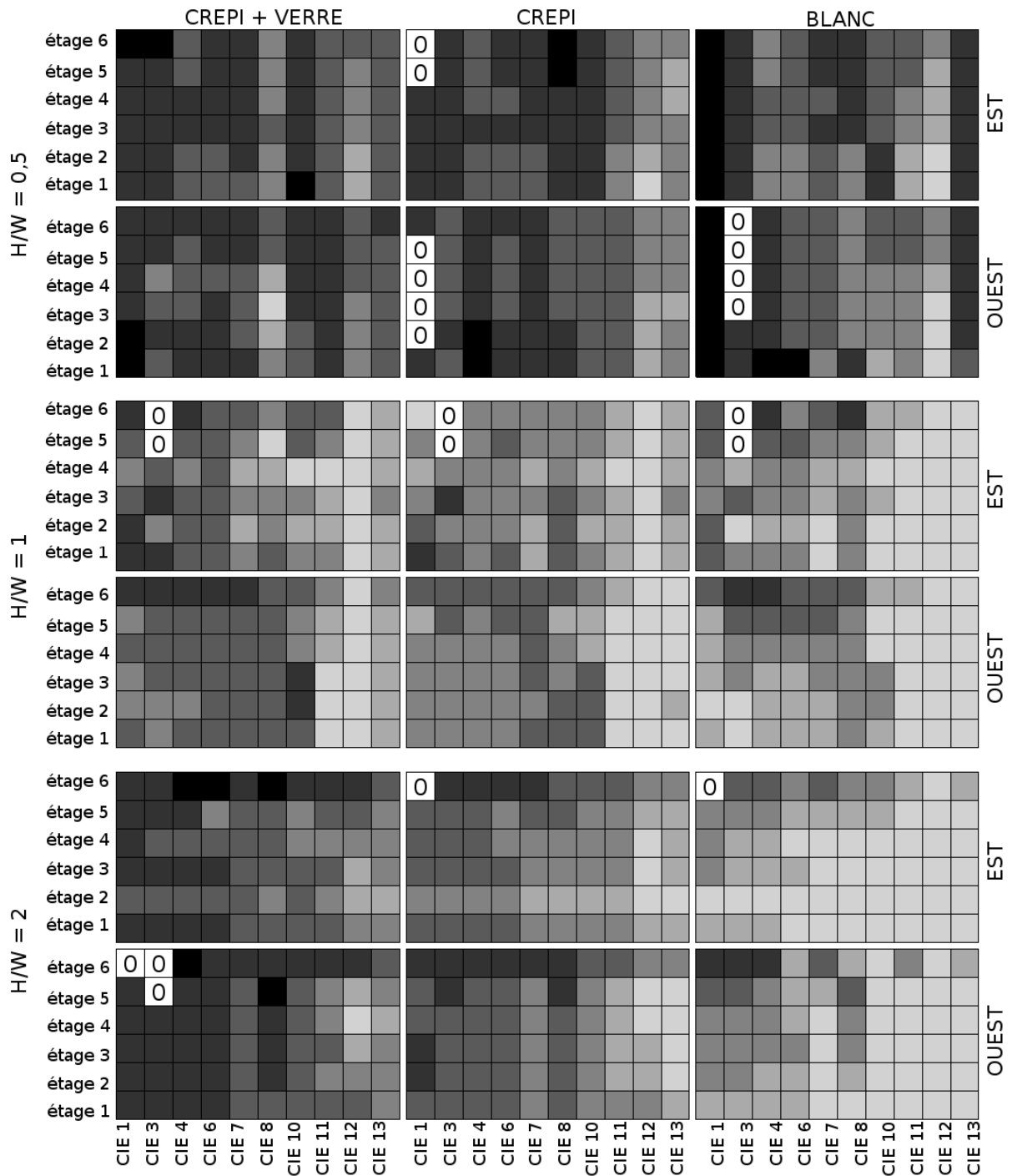


Figure IV-37 : Influence du revêtement des façades en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations sans soleil direct

La Figure IV-37 représente donc, à l'aide de nuances de gris, la valeur du rapport entre l'éclaircement relatif obtenu pour les revêtements blanc, crépi et crépi avec fenêtres, et la valeur obtenue avec le revêtement noir. Cette représentation permet de présenter les résultats pour toutes les combinaisons de paramètres, en l'absence de soleil visible. Une valeur supérieure à 1 implique que le revêtement apporte un gain de lumière pour une

configuration donnée du canyon, par rapport à la même configuration avec le revêtement noir.

D'une manière générale, les gains sont faibles avec le rapport d'aspect $H/W=0,5$, les gris étant majoritairement foncés par rapport aux données pour les autres rapports d'aspect. Les gains les plus importants sont observés pour $H/W=1$, configuration qui dispose du plus grand nombre de cases avec un éclairage relatif au moins trois fois supérieur à ceux mesurés pour le revêtement noir. Afin de confirmer cette impression visuelle, la valeur moyenne du gain a été calculée les valeurs de tous les étages, de tous les types de ciel et des façades Est et Ouest. Ce gain est de 1,6 pour $H/W=0,5$, de 2,7 pour $H/W=1$ et de 2,4 pour $H/W=2$.

Des cases noires sont visibles pour $H/W=0,5$, indiquant des valeurs inférieures à 1, notamment pour le type CIE 1 avec le revêtement blanc. Nous avons vu, au début de cette section, qu'il y avait moins de 10 situations pour cette configuration. L'analyse détaillée montre en plus que pour trois d'entre elles, qui correspondent à trois mesures consécutives, les sondes situées sur les façades ont mesuré un éclairage lumineux proche de zéro, alors que ce n'était pas le cas de la sonde au sol. Les données précédentes et suivantes possèdent des valeurs cohérentes avec les conditions de ciel mesurées par la station IDMP, il s'agit donc d'un évènement de maintenance au niveau des sondes qui, n'ayant pas été identifié, n'a pas mené à l'exclusion de ces valeurs par le contrôle de qualité. L'analyse visuelle se révèle à cette occasion être un outil de choix pour mettre en évidence les données manquantes.

Il est peu évident de tirer des tendances sur l'apport des différents revêtements pour ce rapport d'aspect. En effet, à l'instar des boîtes à moustache, les valeurs présentent une faible cohérence. Toutefois, nous pouvons remarquer que le gain tend à être plus élevé pour les ciels sans nuages, ce pour les trois revêtements. Les étages inférieurs semblent davantage bénéficier de l'augmentation du facteur de réflexion des revêtements. Dans tous les cas, le gain apporté par les trois revêtements n'est pas négligeable pour autant puisqu'il permet d'obtenir des valeurs de 1,5 à 2,5 fois supérieures à celles obtenues avec le revêtement noir. Ce gain peut aller jusqu'à 3 fois pour des conditions de ciel sans nuages (type CIE 12).

Le rapport d'aspect $H/W=1$ rend compte de valeurs moins dispersées. Les valeurs manquantes sont dues à l'absence de données pour le revêtement noir, c'est pourquoi il s'agit des mêmes cases pour tous les revêtements. Les données obtenues pour les façades Est et Ouest présentent des similitudes plus remarquables. Comme cela a été mentionné précédemment, cela est dû à une visibilité plus réduite du ciel, réduisant ainsi l'effet des conditions changeantes de la couverture nuageuse. Pour ce rapport d'aspect, les types CIE 11, 12 et 13, correspondant aux ciels sans nuages, se détachent clairement des autres types. Ils permettent en effet d'obtenir des éclairages relatifs au moins 2,5 fois supérieurs à ceux obtenus avec le revêtement noir. Le type 12 permet d'ailleurs d'obtenir un facteur 3 pour les trois revêtements. Il est intéressant de noter qu'avec un ciel plus troublé (type CIE 13), ce gain est moins important. Comparé aux autres revêtements, le revêtement blanc permet d'obtenir un gain plus élevé pour le type CIE 11. Ces conditions de ciel correspondent aux cas où le direct est élevé, mais le diffus l'est aussi en raison des réflexions du soleil sur les nuages blancs, par conséquent l'augmentation de la composante diffuse du ciel augmente

l'influence de la nature du revêtement. Les simulations ne peuvent reproduire cela que si l'on utilise un diffus important. Cela prêche à penser que plus le facteur de réflexion est élevé, plus un gain est susceptible d'être observé pour des ciels partiellement nuageux. Cela pourrait être vérifié à l'aide de simulations par exemple. L'influence de l'étage se remarque pour les ciels partiellement nuageux et couvert (types CIE de 1 à 10). Les étages supérieurs bénéficient moins de l'apport du revêtement, notamment les étages 5 et 6, ces derniers restent donc plus sensibles aux variations des conditions de ciel que les étages inférieurs, ce qui est pertinent.

Le rapport d'aspect $H/W=2$ conduit à des nuances de gris plus homogènes, l'influence du ciel est donc peu marquée. Cela est confirmé par les données pour les façades Est et Ouest, lesquelles sont très similaires par rapport aux autres rapports d'aspect. Étant donné que la visibilité du ciel est fortement réduite, l'influence du type de ciel est faible. C'est cela que traduit l'homogénéité des nuances de gris pour un même étage. En revanche, pour un même type CIE, nous pouvons observer des variations concernant l'étage. Le sixième étage permet d'obtenir les gains les plus faibles, ce qui est normal puisque les échanges radiatifs entre les façades sont moins importants que pour les niveaux inférieurs. Le revêtement blanc permet de constater que plus le ciel est nuageux, plus le revêtement permet d'obtenir un éclairage relatif élevé. Cela se remarque moins pour le revêtement crépi et encore moins pour le crépi avec fenêtres, ce qui appuie l'hypothèse formulée pour $H/W=1$ concernant le lien entre le facteur de réflexion lumineux des façades et l'augmentation du gain avec la couverture nuageuse. Nous pouvons remarquer que l'étage 1 marque une légère rupture : il donne des gains moins élevés que l'étage supérieur, ce qui est plutôt le contraire pour les autres étages. Cela provient de la contribution du sol. En effet, le sol possède le même revêtement que les façades noires, son facteur de réflexion lumineux est donc très faible. Ce fait ne se remarque pas pour les autres revêtements. Le revêtement crépi avec fenêtres donne des valeurs légèrement moins homogènes que le crépi seul. Toutefois, ce revêtement n'implique réellement des pertes de gain que pour les ciels sans nuages, les autres types de ciels donnant des résultats similaires. Pour ce rapport d'aspect, le revêtement reste important car il permet d'obtenir des éclairages relatifs deux fois plus élevés que pour le revêtement noir, dans la majorité des combinaisons de paramètres.

Suite à cette analyse, plusieurs faits peuvent être remarqués. Ne pas prendre en compte les fenêtres ne semble pas être une approximation trop pénalisante, sauf évidemment pour les ciels sans nuages. Les éclairages relatifs les plus élevés sont obtenus aux étages 5 et 6 du canyon, avec le rapport d'aspect $H/W=1$. Cela est vrai pour tous les revêtements, sauf le blanc, pour lequel le rapport d'aspect $H/W=2$ permet d'obtenir des valeurs équivalentes. Le rapport d'aspect $H/W=1$ permet d'obtenir un bon compromis entre la lumière provenant directement du ciel et la contribution de la façade opposée. Une rue plus étroite conduit à des éclairages relatifs plus homogènes, le choix de l'étage y est donc moins problématique. Rappelons que cette analyse rend compte du gain apporté par différents revêtements. Pour $H/W=0,5$, le gain peut être moins élevé, l'éclairage relatif l'est en revanche beaucoup plus comme cela a été montré sur les boîtes à moustaches.

Afin d'évaluer la variation de l'éclairage relatif en fonction de l'étage, le même type de représentation graphique a été mis en place. La Figure IV-38 représente, pour chaque configuration, le rapport entre la valeur pour les étages 1 à 5 et la valeur pour

l'étage 6. Le dernier étage a été utilisé comme référence, car c'est celui qui a la plus grande visibilité du ciel, et est le moins influencé par le revêtement de la façade opposée.

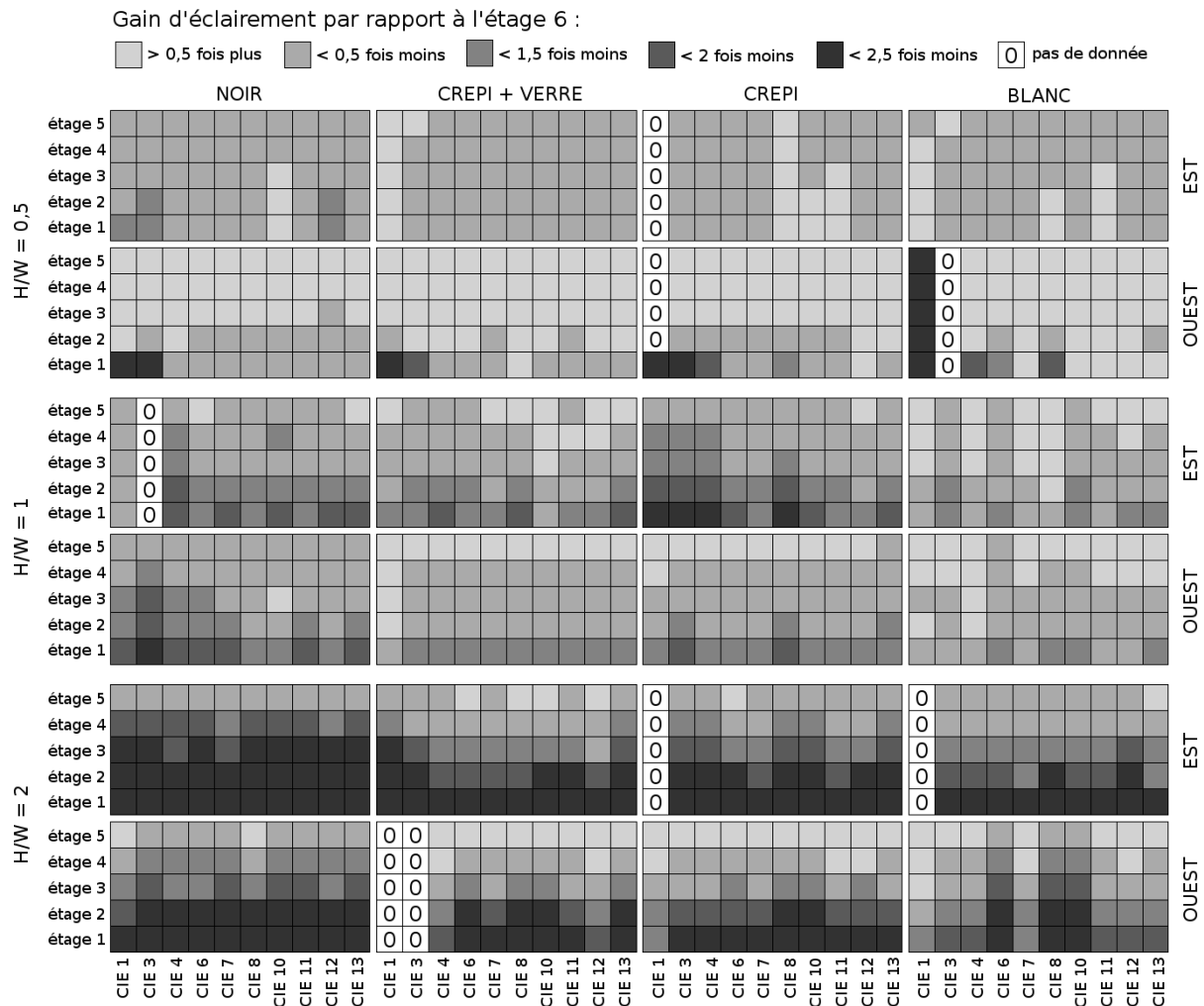


Figure IV-38 : Influence de la hauteur de l'étage en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations sans soleil

La nuance de gris la plus claire correspond à un facteur positif, c'est-à-dire que l'étage considéré permet pour, la configuration considérée, d'obtenir un éclairément relatif supérieur à celui de l'étage 6. Tout comme pour l'étude de l'influence du revêtement, les valeurs pour le rapport d'aspect $H/W=0,5$ sont assez différentes entre les façades Est et Ouest. De la même manière, pour les autres rapports d'aspect, les deux façades présentent des données assez similaires.

Il est difficile d'observer une tendance particulière avec $H/W=0,5$. En effet, de nombreuses cases possèdent le même gris, ce qui signifie que la hauteur de l'étage a une faible influence sur l'éclairément relatif. De ce fait, aucun revêtement n'est mis en évidence, car l'influence des façades n'est pas suffisante pour pouvoir être remarquée à cette échelle. Notons tout de même que l'étage le plus bas a tendance à produire des valeurs plus faibles, ce qui est le fait de l'influence du revêtement du sol qui est le même que pour les façades noires. Pour $H/W=1$, une tendance se dégage : plus l'étage se trouve près du sol,

plus l'accès à la lumière est réduit. Cette conclusion est triviale, mais le dispositif expérimental permet de chiffrer cette tendance pour différents types de ciel et revêtements. Ainsi, l'éclairement relatif est jusqu'à 2 fois plus faible au niveau des étages 1 et 2, ce quel que soit le revêtement. Il est intéressant de noter que le revêtement noir n'implique pas une diminution plus importante que les autres, comme le blanc par exemple, alors que facteur de réflexion lumineux est pourtant bien plus faible. Nous pouvons observer que l'étage 5 permet d'obtenir un éclairement relatif supérieur à l'étage 6, cela confirme qu'à ce niveau, le compromis entre la contribution de la façade opposée et du ciel est le meilleur.

Pour $H/W=2$, la division par deux de l'éclairement relatif peut s'observer dès l'étage 4. L'accès à la lumière naturelle dans un canyon étroit est évidemment plus restreint. Cependant l'influence du revêtement est alors plus importante. Par exemple, le revêtement noir mène aux réductions les plus élevées dès le troisième étage alors que ça n'est le cas que pour le premier, éventuellement le second, pour les autres revêtements. Nous remarquons à cette occasion que le revêtement crépi n'implique pas d'écart important par rapport au revêtement blanc malgré son facteur de réflexion plus faible. De même, la présence des fenêtres ne contribue pas à une diminution plus importante de l'éclairement relatif pour les étages inférieurs. Au contraire, plusieurs combinaisons de paramètres sont favorables à la présence des fenêtres, ce qui a aussi pu être observé pour les rues plus larges, de façon moins évidente.

Analyse en regroupant les types de ciel

Afin de dégager des tendances plus remarquables, l'information du type de ciel a été factorisée sous forme d'une moyenne des valeurs médianes. Cela permet d'obtenir des diagrammes simplifiés, qui rendent compte de tendances pour des conditions climatiques variables et hétérogènes. Par exemple, la Figure IV-39, qui permet d'observer l'influence du type de revêtement pour chacun des étages en fonction du rapport d'aspect. Pour $H/W=2$, le revêtement blanc permet d'obtenir des valeurs de 2 à 3,5 fois supérieures au revêtement noir du premier au sixième étage. Pour les autres rapports d'aspect, l'influence de l'étage sur cet écart est plus faible, entre 2 et 3 pour $H/W=1$ et entre 1,5 et 1,7 pour $H/W=0,5$ soit un écart assez constant. Cela traduit l'augmentation de l'influence du revêtement de la façade opposée avec le rapport d'aspect.

Pour $H/W=2$, l'écart respectif entre les valeurs pour le revêtement crépi et les revêtements blanc et noir, est très faible. Ce résultat est intéressant car le facteur de réflexion du revêtement crépi est de 65% alors qu'il est respectivement de 5% et 87% pour les façades noires et blanches (cf. Tableau III-5), il n'est donc pas situé exactement entre les deux extrêmes. Ce résultat montre que l'éclairement sur les façades ne varie pas linéairement avec le facteur de réflexion. Ce comportement rappelle la contribution indirecte d'une source lumineuse liée aux réflexions multiples dans une sphère intégrante qui varie en fonction du facteur de réflexion ρ suivant le rapport : $\rho/1-\rho$. La démonstration est effectuée dans l'annexe J en utilisant le principe d'une sphère intégrante. Cette théorie a été utilisée par Hopkinson pour calculer la contribution de la composante interne réfléchie sur l'éclairement en un point d'une pièce (Hopkinson, Petherbridge, et Longmore, 1966). En milieu urbain, le même type de raisonnement peut être appliqué concernant les réflexions multiples entre les façades d'un canyon. Ainsi la même tendance peut être observée à un

plus faible niveau. En effet, la lumière n'est pas autant confinée dans un canyon urbain que dans une sphère intégrante. Cela dit, plus le rapport d'aspect est élevé, moins la lumière peut sortir du canyon ce qui implique que plus le canyon est étroit, plus l'influence du facteur de réflexion est grande.

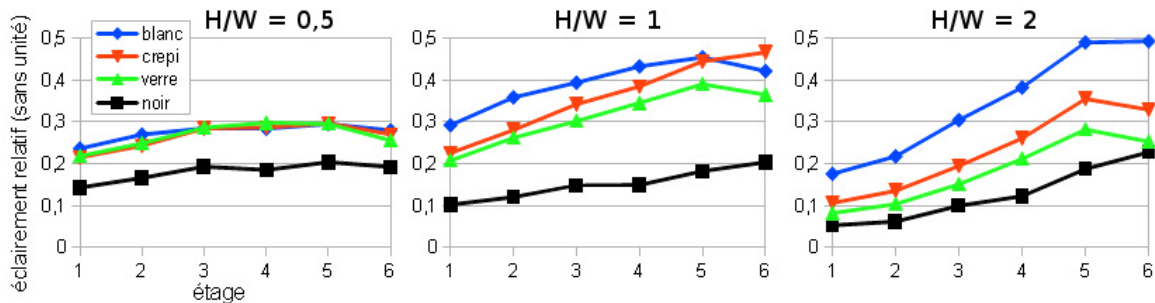


Figure IV-39 : Moyenne des éclairements relatifs pour tous les types de ciel par étage et par type de revêtement pour chaque rapport d'aspect, sans soleil visible

La contribution d'une façade à la lumière dans un canyon est donc d'autant plus susceptible d'être réduite que cette dernière a un facteur de réflexion lumineux élevé. Cela s'applique par exemple à une façade récemment refaite, salie par la pollution occasionnée par la circulation des véhicules dans la rue. En effet, une étude a mis en évidence une relation entre la quantité de véhicule circulant dans une rue et le degré de salissure des façades des bâtiments (Terrat et Joumard, 1990). Une réglementation devrait prendre en compte ce fait pour réduire le délai minimal entre chaque réfection ou nettoyage de façade dans le cas où la luminosité d'une rue est un paramètre important. En France, l'article L132-1 du code de la construction et de l'habitation porte ce délai à 10 ans et stipule que les façades des immeubles doivent être "constamment tenues en bon état de propreté", cet état étant à l'appréciation des employés municipaux. Pour plus de pertinence, la valeur du facteur de réflexion lumineux d'une façade pourrait être réglementée, cela permettrait d'établir un critère rigoureux permettant de caractériser l'état de la façade et le besoin de la rénover.

Sur la Figure IV-39, la position de la courbe représentant les valeurs pour le revêtement avec des fenêtres (en vert) par rapport à la courbe pour le crépi uniquement (en rouge) varie en fonction du rapport d'aspect. Ce résultat permet de voir l'influence de la présence de fenêtres. En moyenne, l'écart est nul pour H/W=0,5, il est de 12% pour H/W=1 et de 22% pour H/W=2. La variation de l'écart est donc plutôt linéaire, mais elle est susceptible de varier en fonction du taux de vitrage (WWR). Rappelons que pour le canyon étudié, le WWR du revêtement avec fenêtres est de 30% (cf. section III.2.1.3).

Les valeurs pour l'étage 6 sont intéressantes car c'est là que l'obstruction créée par la façade opposée est la moins importante, et donc là où le plus de ciel est visible. Par exemple, en prenant en compte une répartition uniforme des luminances, en l'absence d'obstruction, la façade recevrait un éclairement E :

$$E = \pi \frac{L}{2} (1 + \rho_{sol}) \quad (IV-5)$$

Avec L la luminance en un point du ciel et ρ_{sol} le facteur de réflexion lumineux du sol. Pour obtenir l'éclairement relatif, il faut diviser cet éclairement E par l'éclairement reçu à l'horizontal, soit πL . Par exemple, l'éclairement relatif vaut 0,6 avec un $\rho_{sol}=0,2$. Ce raisonnement n'est valable que pour les situations pour lesquelles le soleil n'est pas visible non plus pour la sonde qui mesure EVG. Cette valeur maximale n'est jamais atteinte, cependant, le revêtement blanc avec le rapport d'aspect le plus élevé permet de l'approcher au plus près. Le revêtement noir donne un éclairement relatif de 0,2 à l'étage 6, quel que soit le rapport d'aspect, ce qui montre bien la contribution quasi nulle de la façade opposée. La Figure IV-40 utilise les mêmes données que la Figure IV-39 mais permet d'observer l'influence du rapport d'aspect pour les conditions sans soleil visible.

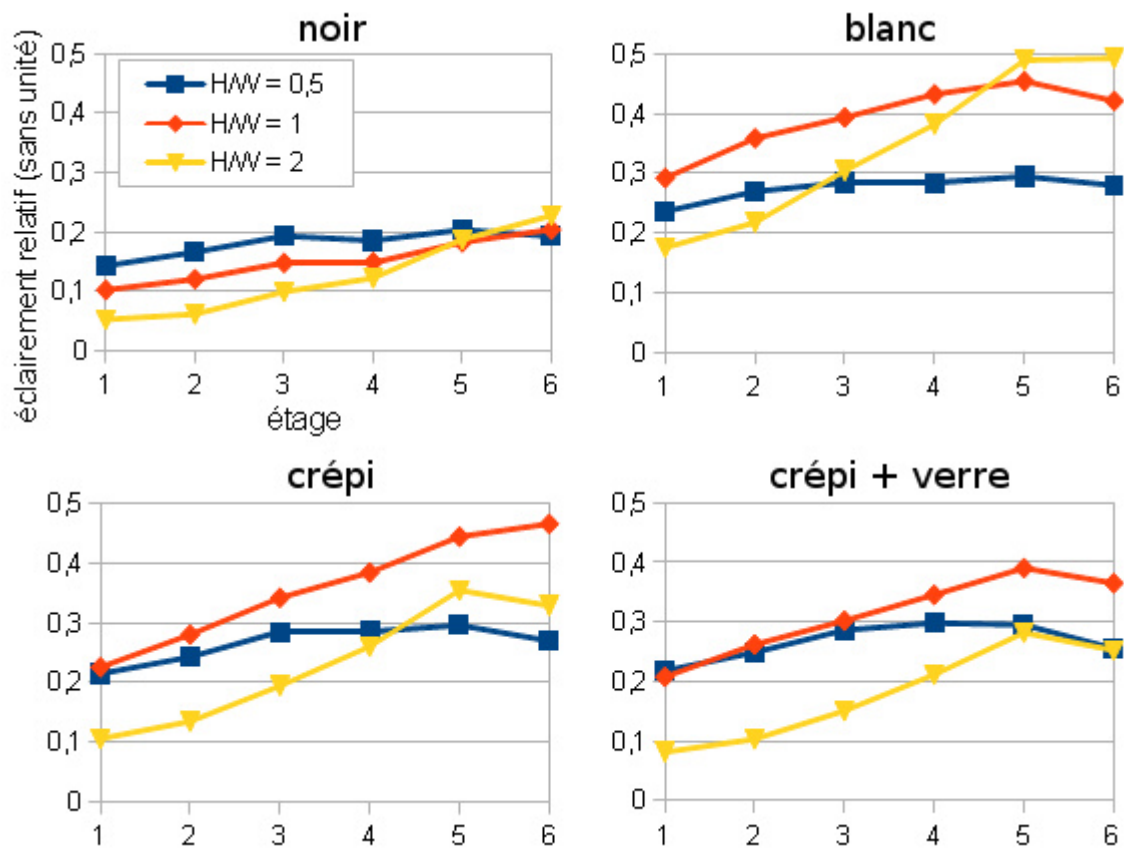


Figure IV-40 : Moyenne des éclairagements relatifs pour tous les types de ciel par étage et par rapport d'aspect pour chaque revêtement, sans soleil visible

L'allure des courbes révèle des faits intéressants. En effet, au niveau des étages inférieurs avec le revêtement noir, plus le canyon est étroit, plus l'éclairement relatif moyen est faible. Cela traduit la perte de lumière induite par des façades avec un facteur de réflexion lumineux très faible. En revanche, cette tendance s'inverse au niveau du sixième étage. Cela implique que la proximité des façades permet d'obtenir un éclairement lumineux plus élevé en haut du canyon et donc une contribution faible mais existante de la façade noire. Pour le revêtement blanc, ce fait se remarque plus fortement. D'une part, l'écart entre les valeurs pour chaque rapport d'aspect est bien plus important en fonction de l'étage. D'autre part, les valeurs pour $H/W=2$ deviennent supérieures à celles des autres rapports d'aspect pour des étages situés plus haut : étage 4 pour $H/W=0,5$ et étage 5 pour $H/W=1$. Cette observation

suggère qu'il existe une fonction permettant de trouver le facteur de réflexion conduisant à l'éclairement relatif le plus élevé à un étage donné. Cette fonction peut être déterminée en étudiant les valeurs des éclairagements relatifs pour différents facteurs de réflexion lumineux situés entre 0 et 1.

Pour les revêtements à base de crépi, la forme des courbes est plus proche de celles pour le revêtement blanc. En revanche le rapport d'aspect $H/W=1$ permet d'obtenir les éclairagements relatifs les plus élevés à tous les étages, contrairement au revêtement blanc. Nous remarquons que la présence de parties vitrées implique une diminution de l'éclairement relatif, notamment pour les étages supérieurs avec $H/W=1$ et $H/W=2$, mais pas pour les étages inférieurs. Cela indique qu'une augmentation du taux de vitrage aux étages inférieurs peut être envisagée pour permettre de laisser entrer plus de lumière, ce sans réduire l'accès global du canyon à la lumière naturelle.

Conclusion pour les situations sans soleil visible

Les valeurs d'éclairement relatif atteignent les niveaux les plus bas au niveau des étages inférieurs, ce qui est logique. Cependant nous avons vu dans la section I.3.2 que pour un canyon étroit, la pollution avait tendance à s'accumuler au niveau des étages inférieurs, entraînant une diminution du facteur de réflexion lumineux. Un soin particulier devrait être pris au niveau du revêtement de ces étages afin de conserver un niveau d'éclairement satisfaisant à l'intérieur du canyon. Ces étages sont facilement accessibles, l'entretien en est donc facilité.

La sensibilité au facteur de réflexion de la façade opposée pour un ciel couvert (CIE type 1) a été observée et quantifiée sur un cas équivalent (Mardaljevic, 2004b). Mardaljevic a constaté la même tendance : l'influence du facteur de réflexion sur le facteur de lumière du jour vertical est plus élevée pour les étages inférieurs. De plus, il montre que cette influence décroît linéairement en se déplaçant vers le haut de la façade pour devenir quasiment nulle tout en haut.

D'une manière générale, en l'absence de soleil visible, le revêtement des façades joue un rôle important. Cette importance est d'autant plus élevée que l'étage considéré est situé près du sol et que le canyon est étroit. L'accès à la lumière étant plus restreint aux étages inférieurs, la pénétration de la lumière dans les pièces pourrait être améliorée en augmentant les dimensions des ouvertures. Ces résultats sont aussi à mettre en relation avec les types de ciels. Cette représentation pourtant simplifiée d'une rue représente déjà un système fortement variable alors que l'environnement est assez bien contrôlé et que peu de paramètres ont été étudiés. Dans une rue réelle, la hauteur des bâtiments est variable ainsi que le taux de vitrage des façades et le revêtement d'un bâtiment à l'autre. Ce cas simple permet donc déjà de tracer les limites des simplifications et encourage l'utilisation de logiciels de simulation permettant d'utiliser des géométries réelles avec des propriétés de revêtement fidèles à la réalité. Nous allons maintenant poursuivre la même analyse pour les situations avec soleil direct.

IV.1.4.2. Analyse des situations avec soleil direct

La Figure IV-41 montre le pourcentage de mesures qui ont été effectuées alors que le soleil était visible. Les résultats sont présentés pour chaque rapport d'aspect et pour chaque étage. Les critères utilisés pour déterminer la visibilité du soleil ont été décrits dans la section IV.1.2.1. L'influence de l'ensoleillement se remarque nettement en observant l'allure des courbes. En effet, l'accès au soleil est défini selon un critère purement géométrique et un seuil de 12 klux sur l'éclairement lumineux direct normal. En considérant uniquement le critère géométrique, plus la rue est étroite, plus l'accès au soleil devrait être réduit quel que soit l'étage considéré.

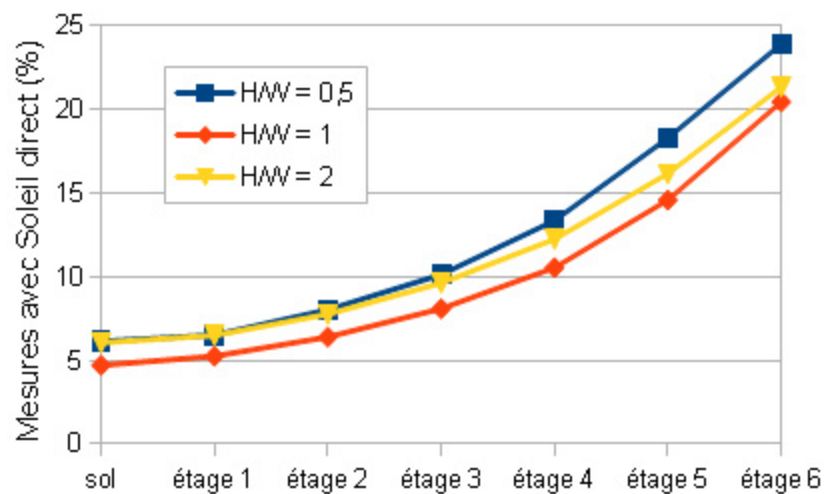


Figure IV-41 : Pourcentage de mesures en présence de rayonnement solaire direct

En revanche nous constatons ici que, pour le sol comme pour les trois premiers étages, le nombre de situations est quasiment identique pour les rapports d'aspect $H/W=0,5$ et $H/W=2$, alors que la largeur de la rue varie de l'un à l'autre d'un facteur 4. Ce résultat pourrait paraître étonnant, d'autant plus que les mesures pour le rapport d'aspect $H/W=2$ ont été effectuées principalement au printemps et en hiver alors que celles pour $H/W=0,5$ ont été prises majoritairement pendant l'été (cf. Figure IV-14, page 243). Toutefois, l'analyse de la distribution des types de ciel montre que, pour $H/W=0,5$, il y a eu un pourcentage plus élevé de situations avec des ciels couverts (types 1 à 5) et un pourcentage moins élevé de situations avec des ciels sans nuages (types 10 à 15). L'explication est donc liée à des conditions climatiques différentes.

En présence de soleil visible, la valeur de l'éclairement relatif peut varier fortement comparée à sa valeur pour des situations sans soleil. En effet, pour ces situations, l'angle d'incidence du soleil joue un grand rôle sur la valeur des éclaircissements. Lorsque l'angle d'incidence du soleil est faible pour une sonde verticale de la façade, il est élevé pour la sonde horizontale de la station IDMP. L'éclairement relatif est alors élevé. La situation inverse peut se produire lorsque le soleil est vu par la sonde verticale avec un angle d'incidence élevé. Dans ces conditions, l'éclairement relatif n'est pas nécessairement le meilleur indicateur pour rendre compte de l'accès à la lumière dans un canyon urbain.

Toutefois, l'utilisation de ce dernier permet de comparer les valeurs obtenues avec les situations sans soleil visible.

La Figure IV-42 et la Figure IV-43 représentent les valeurs d'éclairement relatif mesurées sur la maquette pour le rapport d'aspect $H/W=0,5$. Comme mentionné précédemment, la façade Ouest reçoit du rayonnement solaire direct le matin, la façade Est l'après-midi. Notons qu'il existe des situations avec soleil pour lesquels un type de ciel 1 a été détecté, nous avons vu dans la section IV.1.3.2 que cela était dû au choix du critère climatique permettant de déterminer l'ensoleillement (12 klux). Ces situations sont présentées dans les graphiques mais ne sont pas prises en compte dans l'analyse car elles sont ni nombreuses, ni pertinentes. Contrairement aux valeurs sans soleil visible pour lesquelles des tendances pouvaient être aisément visualisées, il n'est pas possible de déterminer un revêtement permettant d'obtenir systématiquement des valeurs d'éclairement relatif plus élevées ou plus basses, pour tous les types de ciel.

Pour les types de ciel les plus dégagés, les éclairagements relatifs sont généralement les plus élevés et les valeurs maximales sont plus grandes. Pour ces situations, lorsque le soleil est visible selon le critère géométrique, il est le moins susceptible d'être masqué par des nuages et donc de produire un éclairage faible. Pour le type 10, les éclairagements relatifs sont généralement supérieurs à ceux pour les types 11 à 13. Cela peut être expliqué par rapport à la description de ces types de ciel (cf. Tableau II-1 page 111). En effet le type 10 correspond à un ciel partiellement nuageux, ce qui n'est pas le cas des types 11 et 12, ainsi le gain observé peut être dû à la contribution du rayonnement diffus dû à la présence de ces nuages. Le type 13 possède une atmosphère fortement polluée ce qui n'est pas le cas des types 11 et 12, cela implique aussi une augmentation de la diffusion et ainsi une augmentation de l'éclairement lumineux mesurable.

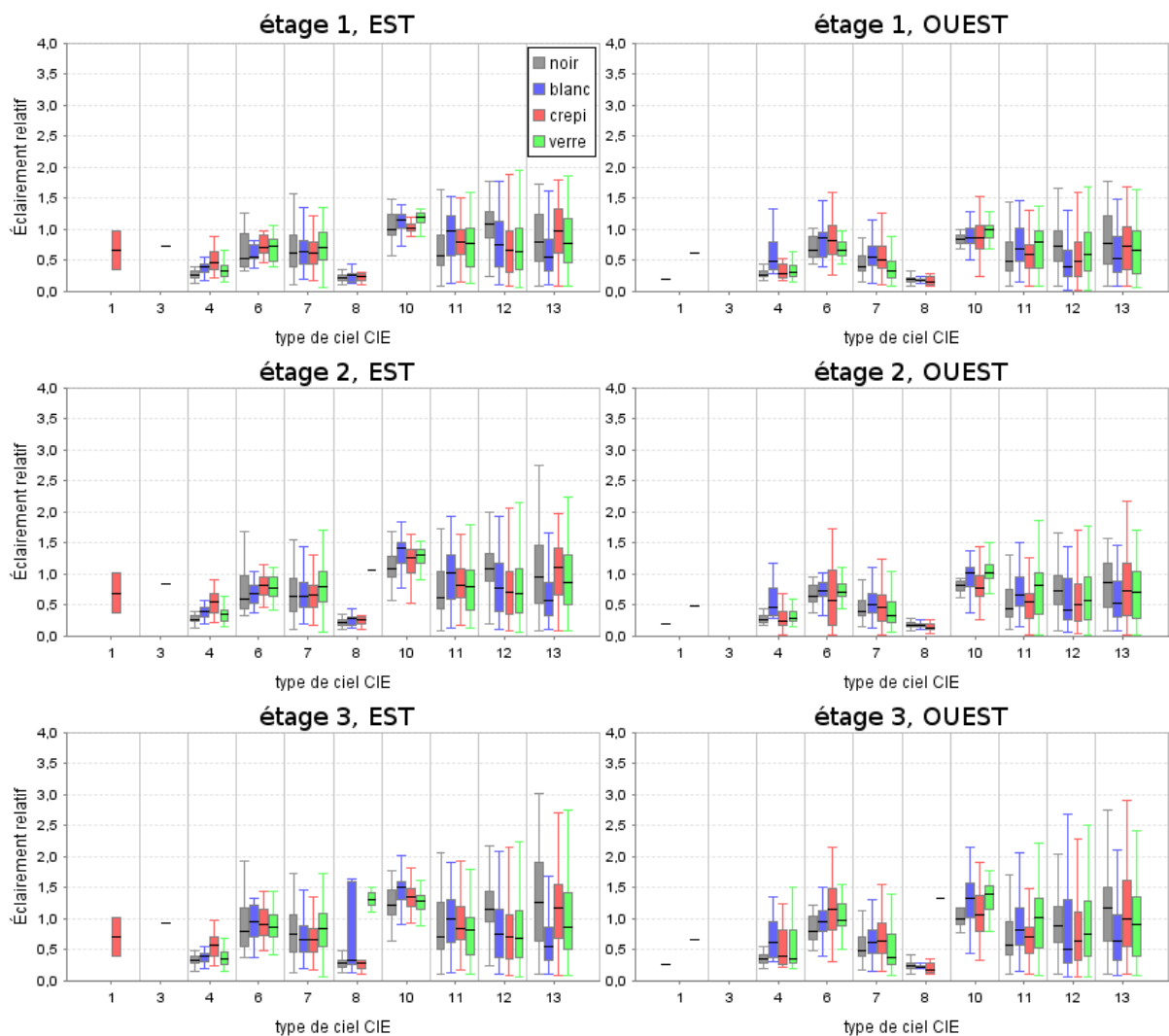


Figure IV-42 : Éclairage relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec $H/W=0,5$ pour les situations avec soleil visible

Le revêtement blanc donne des éclairages relatifs plus faibles que tous les autres revêtements pour les ciels sans nuages. Même si le rapport d'aspect $H/W=0,5$ minimise l'influence du revêtement par rapport aux canyons plus étroits, cela est étonnant. La raison est liée aux conditions météo. En effet, tous les revêtements pour $H/W=0,5$ ont été installés sur la maquette durant l'été 2012. En revanche, les ciels sans nuages avec le revêtement blanc ont été détectés seulement EST avec un soleil haut dans le ciel. Cela n'est pas le cas pour les autres revêtements, qui présentent des situations avec des positions de soleil plus variées. Avec une hauteur angulaire importante, l'angle d'incidence avec les sondes situées en façade est élevé, ce qui réduit la valeur de l'éclairage relatif. Les valeurs plus basses pour le revêtement blanc s'expliquent donc par le fait que les ciels dégagés se sont produits pour des positions de soleil particulières.

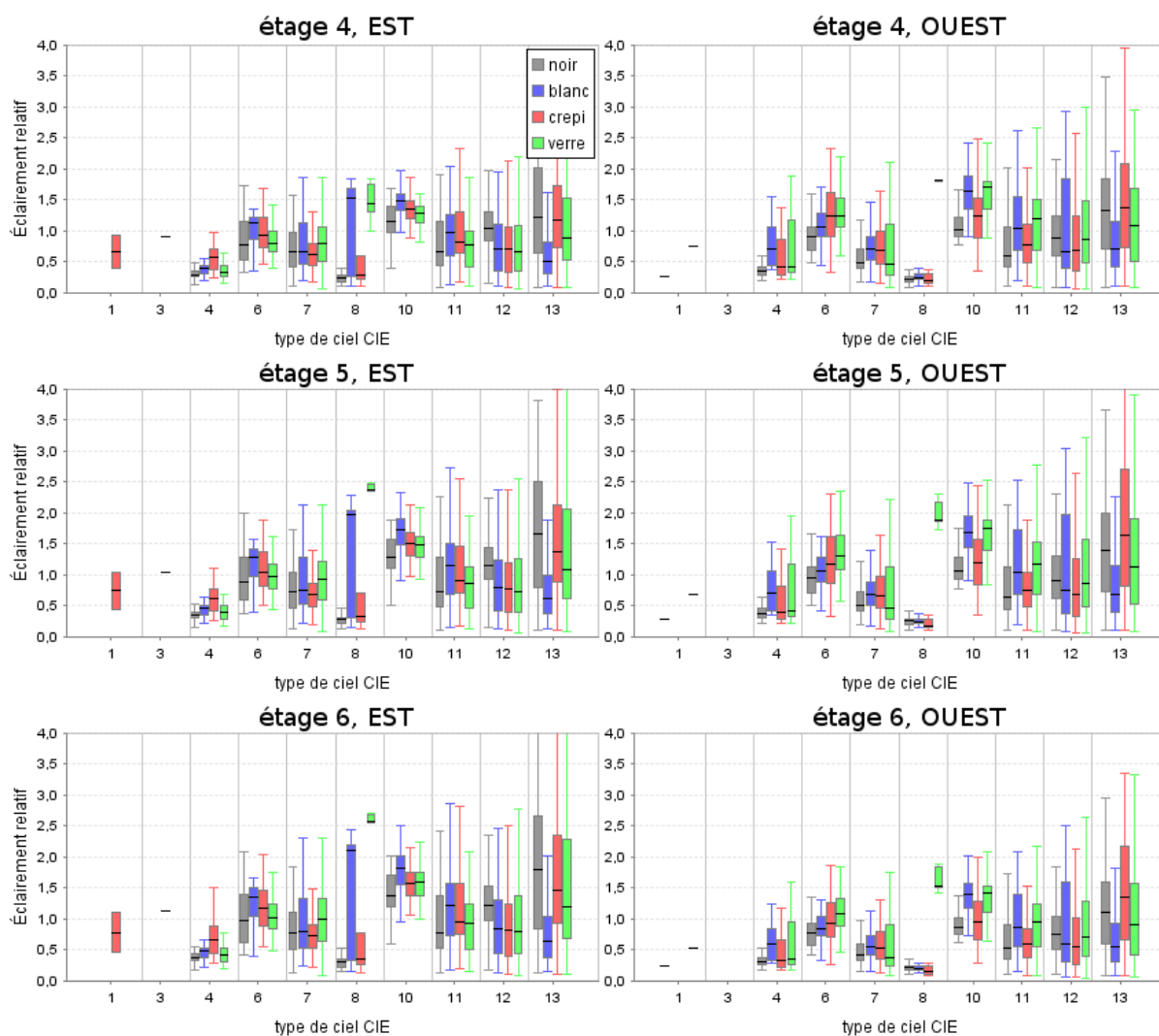


Figure IV-43 : Éclaircissement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec $H/W=0,5$ pour les situations avec soleil visible

Il est intéressant de noter que les situations avec des types CIE 6 permettent d'atteindre des valeurs d'éclaircissement relatif généralement supérieures aux situations avec des types de ciel CIE 7. La différence entre ces deux types se trouve au niveau de la luminance dans la zone circumsolaire du ciel, plus grande pour le type 7. Des tendances similaires sont observables sur les façades Est et Ouest, cependant la façade Ouest permet d'observer la plupart du temps des valeurs supérieures pour le revêtement crépi avec fenêtres 4 pour les ciels sans nuages, alors que pour la façade Est, le revêtement crépi donne des valeurs équivalentes. Cette différence de comportement peut être imputée à l'environnement proche, c'est-à-dire des contributions ou obstructions par des bâtiments ou de la végétation pour des hauteurs faibles de soleil. En l'occurrence, la façade Ouest se trouve face à l'Est, or un bâtiment avec un toit plat légèrement incliné vers le sud se trouve au nord-est de la maquette. Ce toit, visible sur la Figure III-47 (page 202), peut contribuer à l'éclaircissement mesuré sur la façade Ouest.

La Figure IV-44 et la Figure IV-45 représentent les valeurs d'éclaircissement relatif mesurées sur la maquette, pour le rapport d'aspect $H/W=1$, respectivement pour les façades

Est et Ouest. Ces graphiques présentent une dispersion moins importante que pour $H/W=0,5$ ce qui permet d'observer des tendances plus marquées.

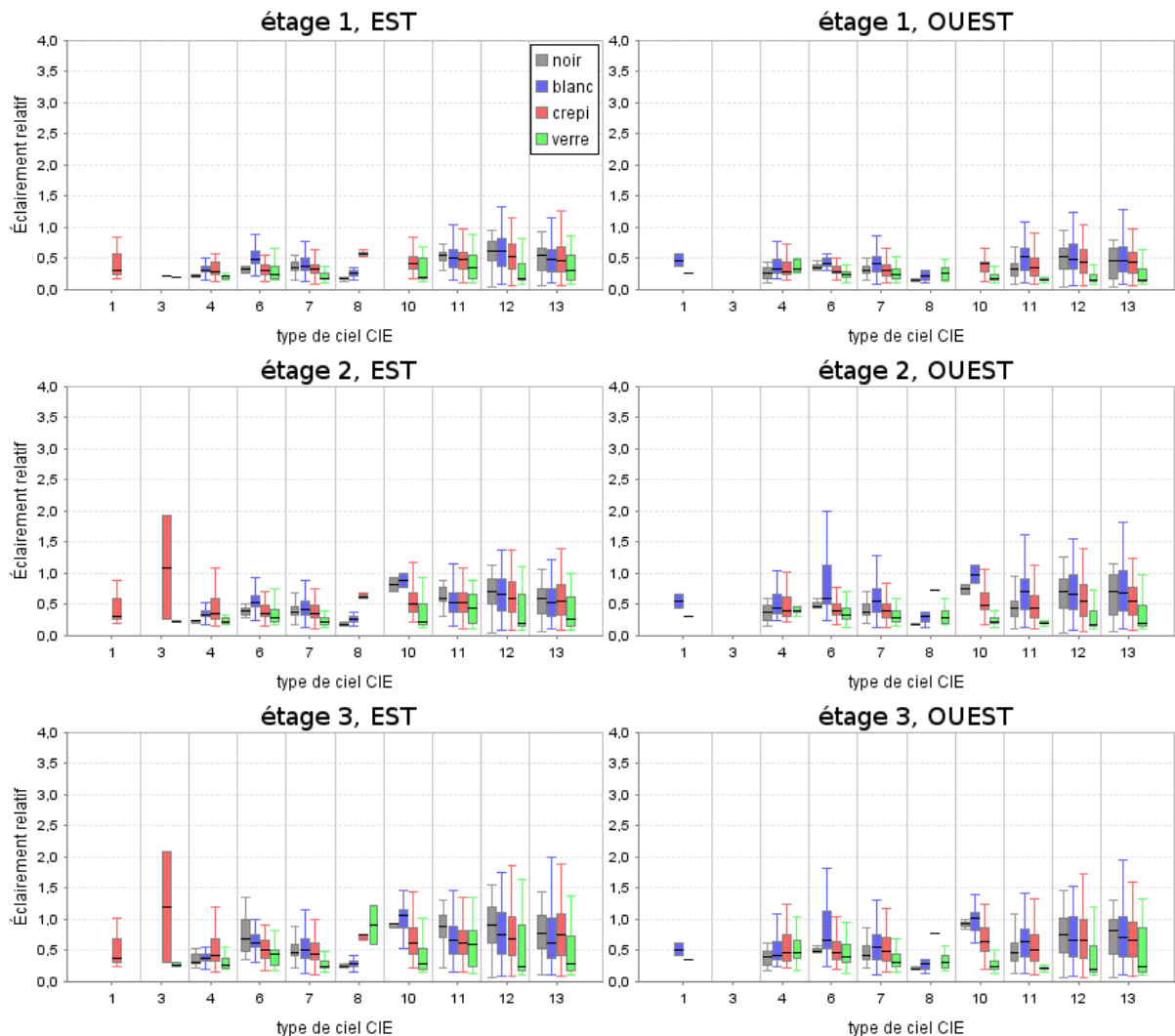


Figure IV-44 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec $H/W=1$ pour les situations avec soleil visible

Par exemple, tous les revêtements présentent des valeurs proches, à l'exception de celui avec les parties vitrées, qui donne des valeurs inférieures. En l'absence de soleil direct, ce revêtement donnait des valeurs plutôt équivalentes à celles du crépi, indiquant une faible influence de la présence de fenêtres ; maintenant que le soleil est visible, la présence des fenêtres réduit l'éclairement sur les façades du canyon. Lorsque le soleil est visible par une sonde, cela suppose aussi qu'il est présent au sein du canyon. On peut donc supposer que le soleil atteint également d'autres points du canyon. Les surfaces vitrées agissent comme des capteurs solaires, en piégeant le rayonnement solaire direct qui est le plus gros contributeur à l'éclairement global. Cela conduit à un éclairement relatif plus faible.

Il est intéressant de remarquer qu'il est courant de trouver les volets des habitations fermés lorsque le soleil éclaire directement les fenêtres afin de réduire le gain thermique et les éblouissements à l'intérieur des pièces. Nous pourrions alors retrouver les mêmes

valeurs que celles mesurées avec le revêtement crépi sans fenêtres. Cela pourrait représenter un biais lors de mesures sur site.

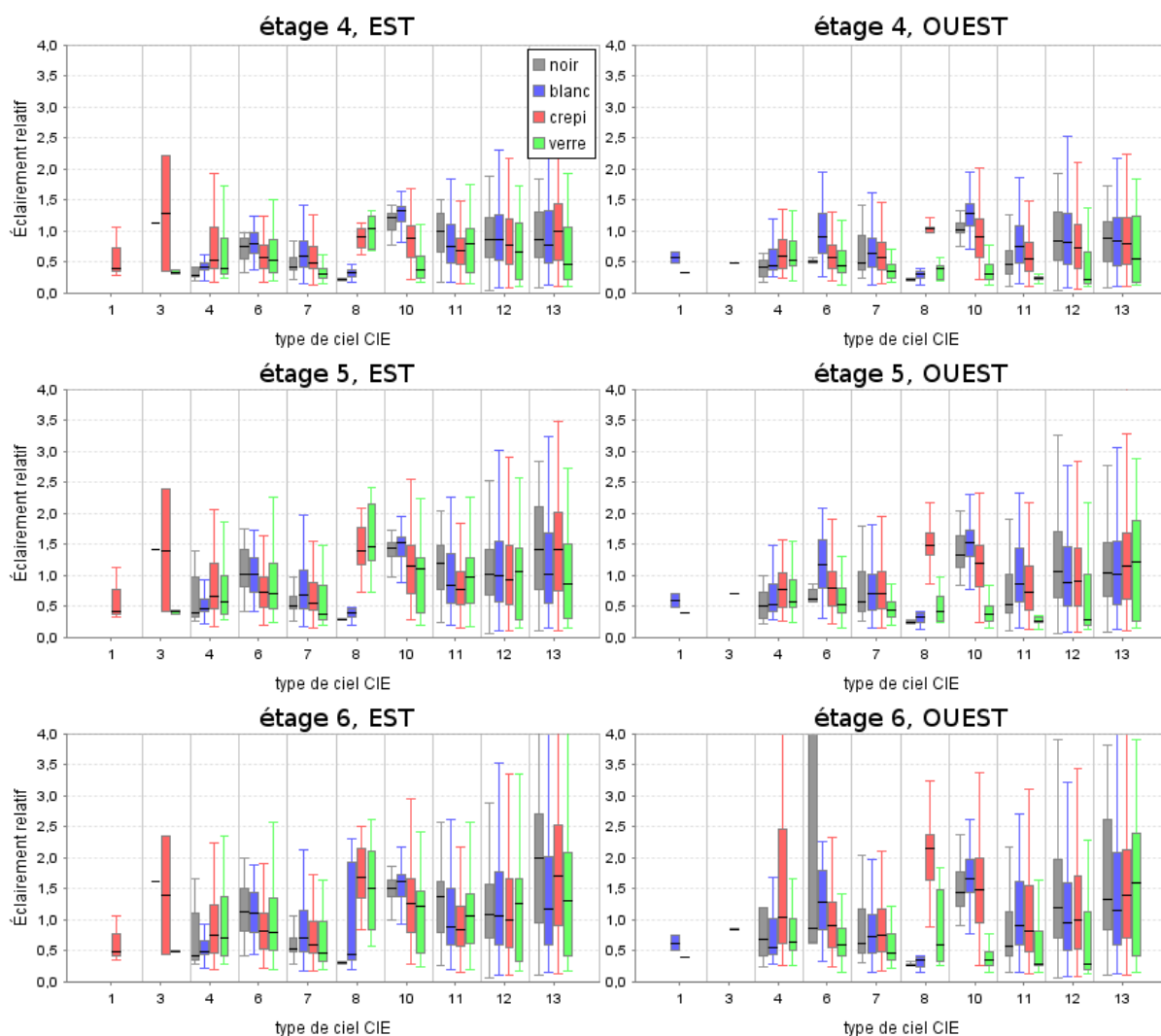


Figure IV-45 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec $H/W=1$ pour les situations avec soleil visible

Pour les étages supérieurs, le revêtement blanc donne des valeurs plus élevées pour les ciels nuageux. Tout comme pour le rapport d'aspect précédent, les tendances observables sont plus marquées pour la façade Ouest. Cela confirme qu'il existe dans l'environnement de la maquette des éléments perturbant la symétrie des mesures. Cependant, nous pouvons observer sur les deux façades qu'il existe une différence de comportement entre les ciels sans nuages et les ciels partiellement nuageux. Dans le premier cas, l'écart entre les revêtements est peu marqué alors qu'il se creuse dans le second cas. Cette conclusion est intéressante car elle montre que l'influence du revêtement varie en fonction du type de ciel, et donc du climat. Cela implique que le revêtement des façades pourrait être adapté au climat local d'une ville afin d'optimiser son apport de lumière dans les canyons urbains.

La Figure IV-46 et Figure IV-47 représentent les valeurs d'éclairement relatif mesurées sur la maquette pour le rapport d'aspect $H/W=2$. Cette fois, l'accès au soleil est

fortement réduit par la géométrie du canyon. Ainsi les situations avec soleil direct sont non seulement plus rares (cf. Figure IV-24) mais elles interviennent aussi pour des angles d'incidence sur les sondes très élevés, angles d'autant plus petits que l'étage considéré est bas.

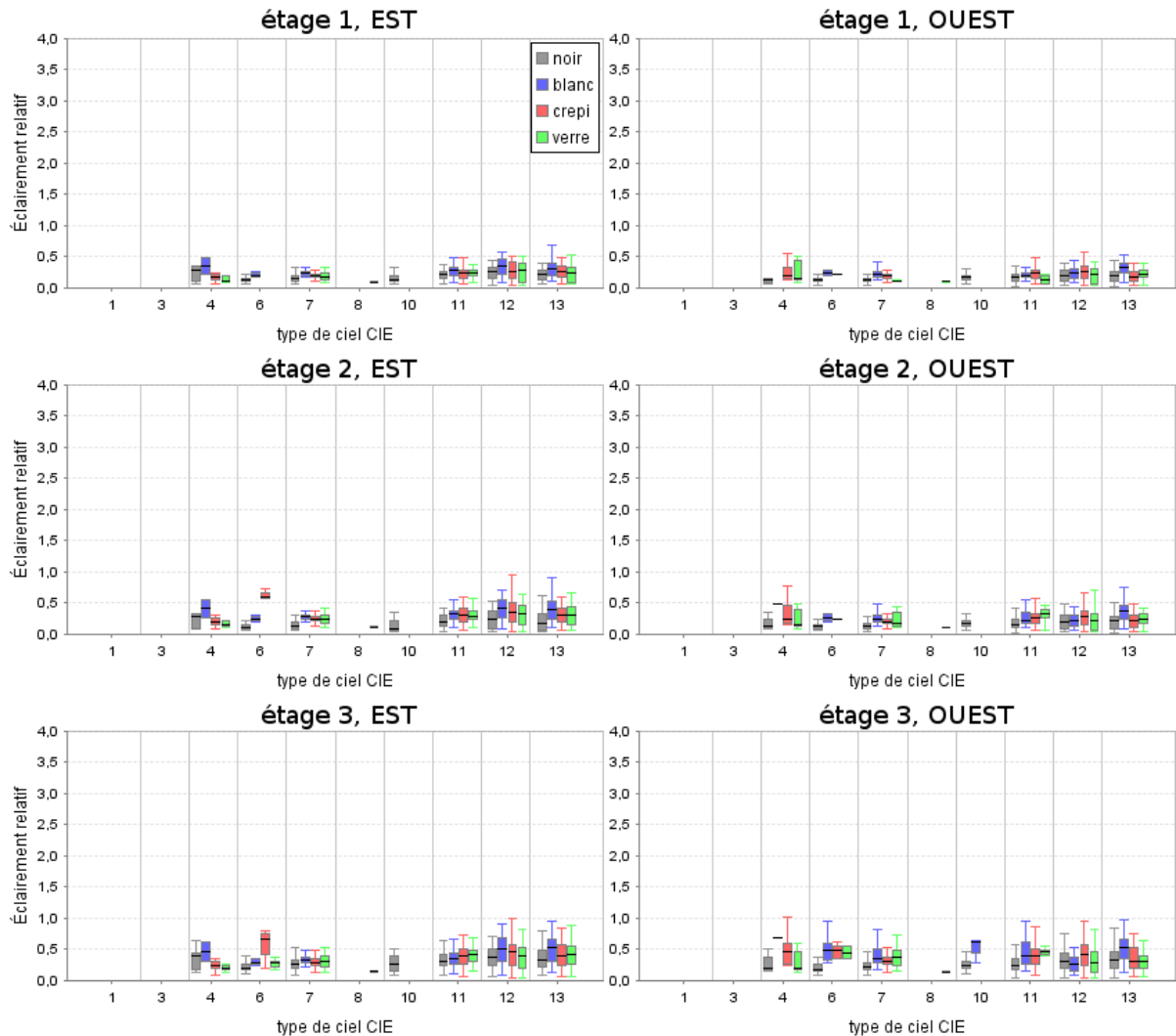


Figure IV-46 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec $H/W=2$ pour les situations avec soleil visible

Le risque d'obtenir des valeurs erronées du fait d'une mauvaise correction en cosinus des sondes est donc plus important. De plus, lorsque le soleil est directement visible, son azimut se trouve proche de 180° , c'est-à-dire plein sud. Ainsi le soleil éclaire directement le sol mais très faiblement les façades. De ce fait, la contribution des façades est moindre ce qui explique les faibles valeurs d'éclairement relatif que l'on peut observer notamment pour les étages inférieurs qui, de surcroît, possèdent une faible visibilité du ciel.

L'écart entre les éclairagements relatifs varie fortement en fonction de l'étage. Ainsi, pour ce rapport d'aspect, au quatrième étage par exemple, les valeurs ont le même ordre de grandeur que les situations sans soleil avec le rapport d'aspect $H/W=1$. Cela montre bien le lien entre le climat et la géométrie d'un canyon. Cette dernière doit être adaptée aux

conditions climatiques moyennes du lieu où se trouve une ville. Cette conclusion montre que des règles d'urbanismes ayant vocation à être appliquées à une échelle nationale peuvent mener à un climat lumineux inadapté si elles ne prennent pas en compte le climat local.

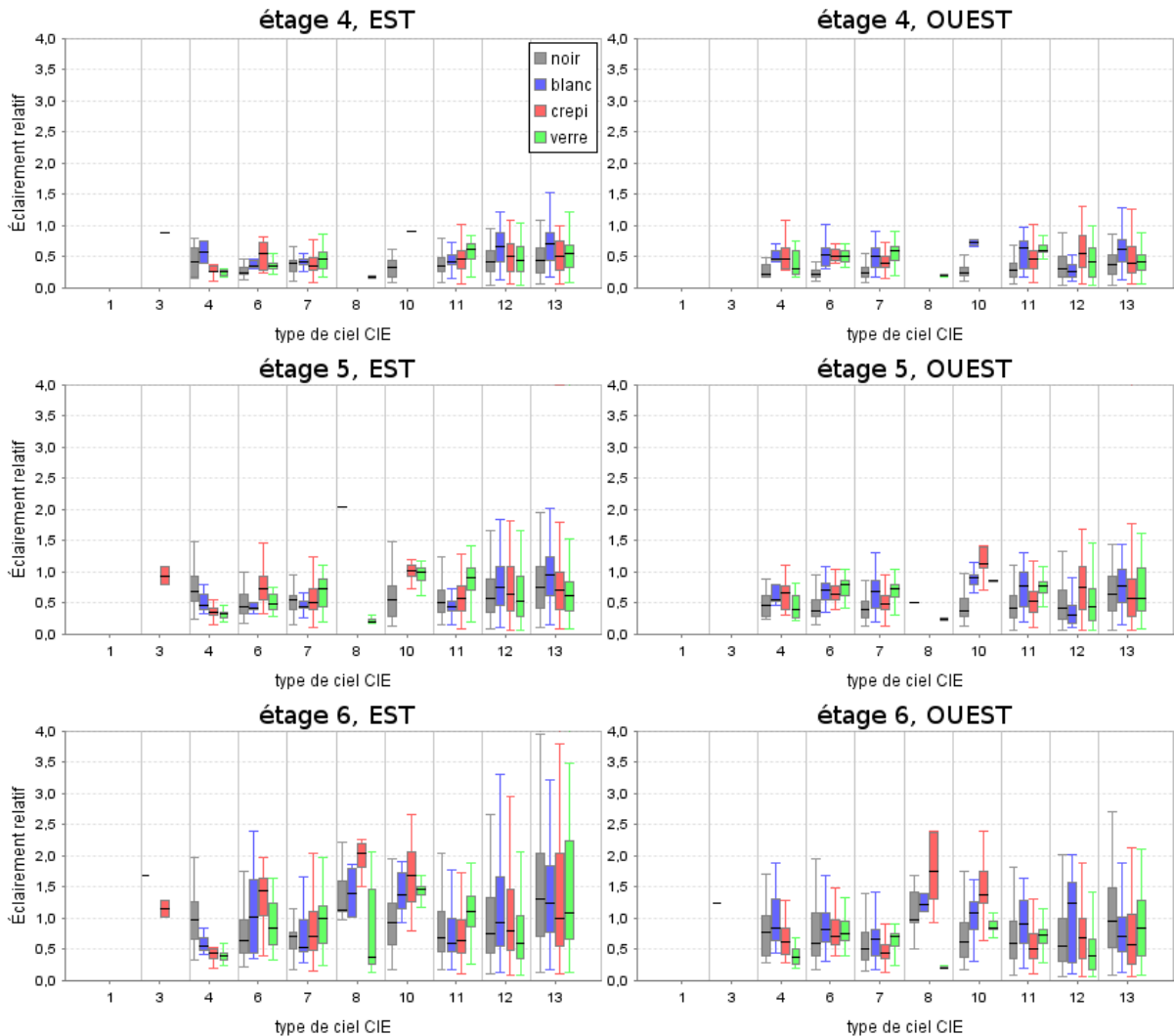


Figure IV-47 : Éclairage relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec $H/W=2$ pour les situations avec soleil visible

Tout comme pour les situations sans soleil, la Figure IV-48 permet d'avoir une vue d'ensemble de la contribution des différents revêtements en comparaison à celle du revêtement noir. Toutes les combinaisons de paramètres : type de ciel, étage et rapport d'aspect, sont prises en compte.

Gain d'éclairément par rapport à un revêtement noir :

plus de 3
 de 2,5 à 3
 de 2 à 2,5
 de 1,5 à 2
 de 1 à 1,5
 moins de 1
 0 pas de donnée

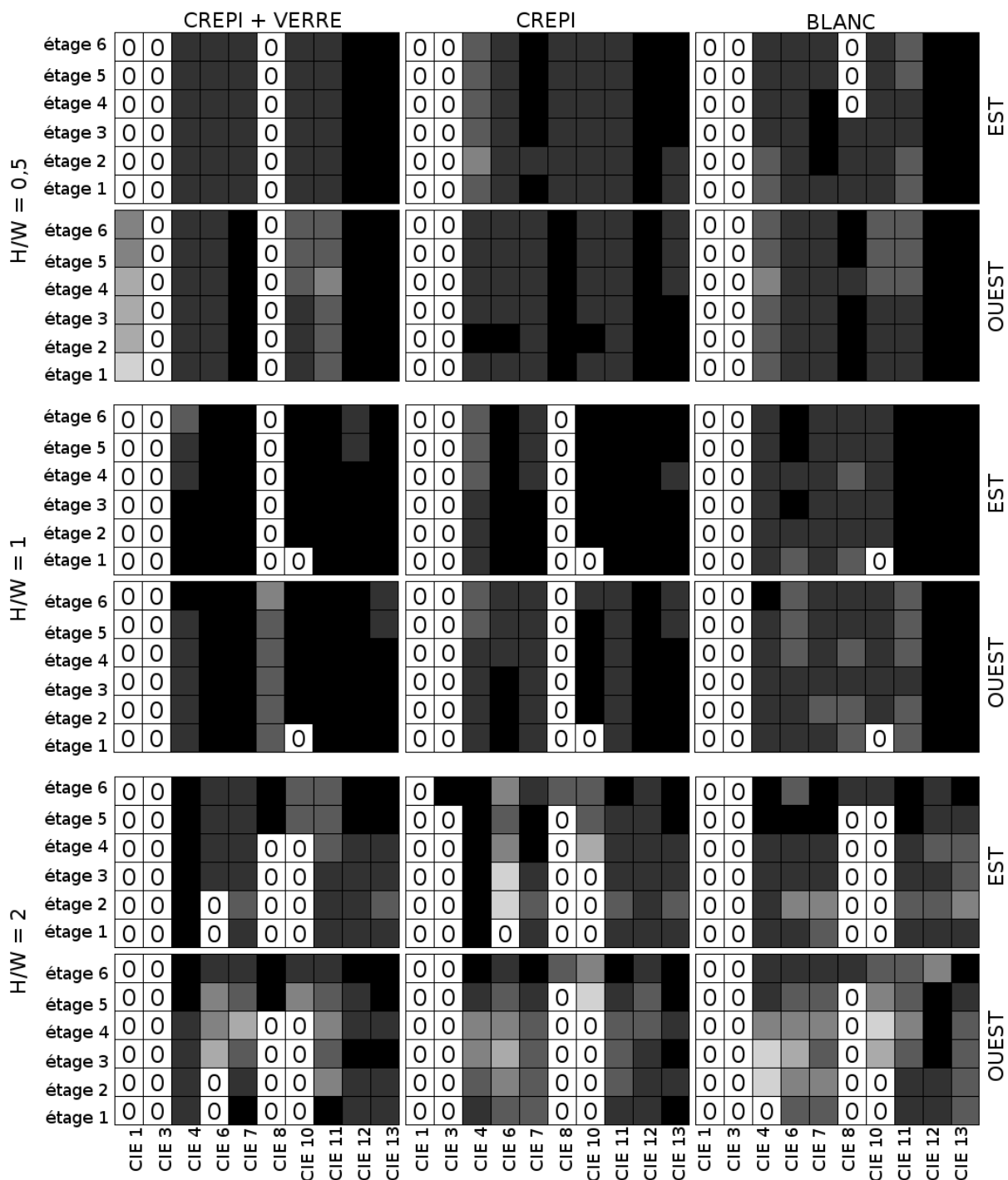


Figure IV-48 : Influence du revêtement des façades en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations avec soleil

L'absence d'un grand nombre de données rend l'analyse incomplète, notamment pour les types CIE 1, 3, 8 et 10. Pour les données disponibles, nous remarquons une grande quantité de cases noires, signe d'un éclairément relatif plus faible qu'avec le revêtement noir, ce majoritairement pour les ciels sans nuages. Ces résultats ne signifient cependant pas que le

revêtement noir permet d'obtenir des éclairagements relatifs plus élevés. Ils s'expliquent par le fait que les mesures ont été effectuées à différentes périodes de l'année donc pour des positions différentes du soleil. Contrairement aux autres façades, les façades noires ont été utilisées en hiver, le soleil étant plus bas, l'éclairage horizontal était plus petit, l'éclairage relatif calculé pour des sondes verticales est donc plus grand. Cela démontre la limite de l'utilisation de l'éclairage relatif en présence de soleil atteignant les sondes.

Nous pouvons tout de même tirer des conclusions de la Figure IV-48, sur l'influence du rapport d'aspect. L'hétérogénéité des nuances de gris pour un même revêtement au sein d'une façade semble augmenter avec le rapport d'aspect. De même, les gris étant plus clairs pour H/W=2, l'influence du revêtement est plus important même s'il n'est pas possible d'extraire de tendance en fonction du type de ciel ou de l'étage à partir de ce diagramme.

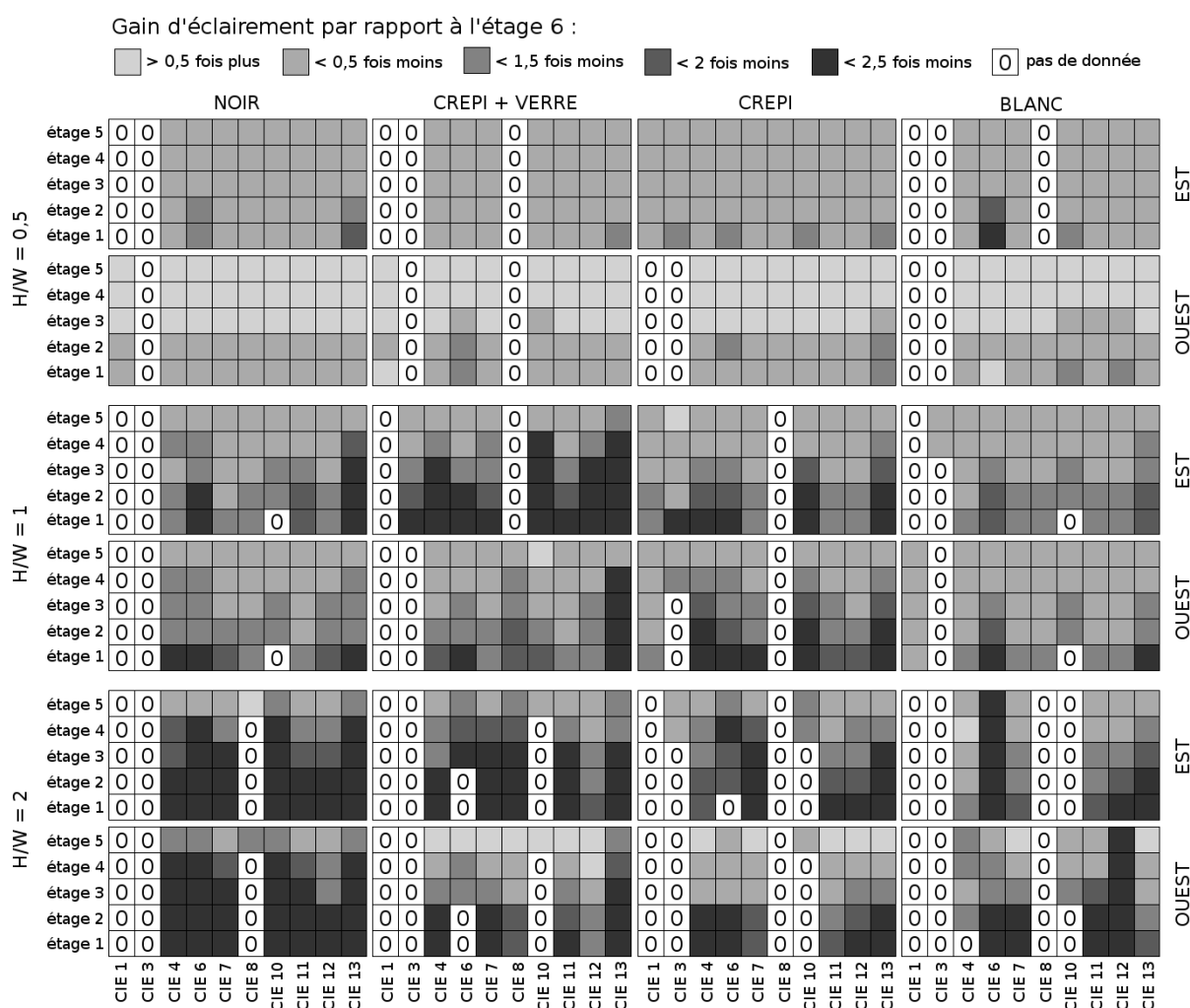


Figure IV-49 : Influence de la hauteur de l'étage en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations avec soleil

La Figure IV-49 permet enfin d'évaluer visuellement l'influence de la hauteur de l'étage pour tous les types de revêtement, relativement aux éclairagements relatifs obtenus à l'étage 6. Contrairement aux situations sans soleil visible, la rareté du gris le plus clairs traduit qu'il

n'y a pas d'étage pour lequel des valeurs supérieures au sixième étage ont été obtenues. Pour $H/W=0,5$, à l'instar de la Figure IV-48, les nuances de gris ne varient quasiment pas. L'éclairement relatif est donc majoritairement entre 0,5 et 1,5 fois moins élevé quel que soit l'étage. Nous pouvons remarquer cependant une différence entre les étages 1 et 2 pour la façade Ouest. En effet, nous avons mentionné précédemment la possibilité d'une perturbation de l'environnement pouvant mener à des valeurs plus élevées pour la façade Ouest : un bâtiment avec un toit plat légèrement incliné et orienté vers la maquette. Cela est clairement mis en évidence par la Figure IV-49. Cette observation peut être faite pour $H/W=1$ et $H/W=2$.

L'écart entre les différents étages est plus marqué pour $H/W=1$. En effet, nous pouvons observer, du premier au troisième étage, des éclaircissements jusqu'à 2,5 fois plus faibles qu'à l'étage 6. Pour $H/W=2$, une telle réduction se constate jusqu'à l'étage 4. Cet écart entre les étages est plus important que pour les situations sans soleil visible, à un étage près. Cela montre que l'ensoleillement a une influence peu marquée sur l'accès à la lumière d'un étage par rapport aux autres. Cela n'empêche pas que les niveaux d'éclairement absolus restent plus élevés en présence de soleil direct. Le type de ciel a une influence plus importante que pour les situations sans soleil. En effet, en comparant la Figure IV-49 et la Figure IV-38, nous constatons une réduction plus importante de l'accès à la lumière à partir des étages 3 ou 4 en présence de soleil pour les ciels sans nuages, alors que la même réduction (facteur 2,5) ne se constate qu'à partir de l'étage 1 ou de l'étage 2 pour les ciels nuageux. Cela s'observe mieux avec $H/W=1$. Pour les situations sans soleil, cette réduction se produit aux étages 1 et 2, quel que soit le type de ciel.

Conclusion pour les situations avec soleil visible

Lorsque le soleil atteint les sondes, il est moins évident d'observer des tendances remarquables. D'une manière générale, ces situations sont moins critiques : le soleil éclaire les façades, les niveaux d'éclaircissements lumineux absolus sont alors plus élevés. Pour les étages supérieurs, il n'est pas rare d'obtenir dans ces conditions des éclaircissements verticaux 1,5 à 2 fois supérieurs à l'éclairement horizontal. Ces conditions peuvent nécessiter l'utilisation de stores ou de volets pour se protéger de la gêne occasionnée. La présence de soleil ne modifie pas fortement les écarts entre les étages ou entre les revêtements, elle révèle toutefois une diminution notable de l'éclairement relatif pour le revêtement crépi avec les parties vitrées. Les fenêtres absorbent une partie de la lumière ou la réfléchissent de façon spéculaire en fonction de l'angle d'incidence du soleil. Le fait de ne pas prendre en compte ce paramètre, dans un logiciel de simulation par exemple, peut donc mener à des écarts importants avec la réalité.

IV.1.4.3. Importance de la prise en compte du type de ciel

La plupart des données présentées dans cette partie ont été étudiées en fonction du type de ciel, cette section montre l'intérêt de considérer ce paramètre dans l'étude de l'éclairement lumineux dans un canyon urbain. La Figure IV-50 montre les valeurs d'éclairement relatif pour chaque étage, obtenues à partir des données mesurées sur la maquette, avec le revêtement crépi, pour toutes les situations avec et sans soleil direct.

Le rapport d'aspect le plus grand n'implique pas systématiquement l'éclairage relatif le plus faible à tous les étages. Cela s'observe en comparant les courbes $H/W=0,5$ et $H/W=1$. Jusqu'au troisième étage, la rue la plus étroite possède bien des éclairagements en façade plus faibles. Néanmoins, les valeurs pour l'étage 4 sont quasiment identiques et les deux derniers étages montrent une inversion de la tendance. La rue la plus étroite des deux présente des niveaux d'éclairage relatif supérieurs. L'analyse décrite dans les sections précédentes montre que cela est dû à l'influence du revêtement de la façade opposée, qui augmente avec la proximité de celles-ci.

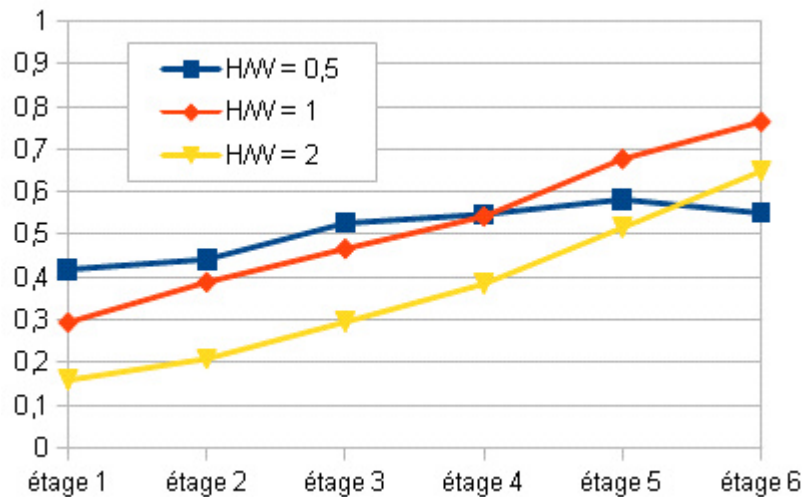


Figure IV-50 : Éclairage relatif moyen pour le revêtement crépi, tous types de ciel confondus

La Figure IV-51 montre les mêmes résultats avec le détail par type de ciel. Sur les 10 types de ciel représentés, le même phénomène peut se remarquer : les valeurs pour $H/W=0,5$ peuvent être supérieures à celles pour $H/W=1$. Notons d'une part que cela peut ne pas se produire, et d'autre part que cela se produit éventuellement à des étages différents. Par exemple, pour les ciels CIE 1, 3, 11 et 13, le canyon le plus étroit donne toujours les éclairagements relatifs les plus faibles. L'inversion peut se produire dès le deuxième étage comme pour les types 4 et 12, ou au niveau des derniers étages, comme pour les types 10, 11 et 13.

Nous constatons donc que l'écart entre les étages d'un rapport d'aspect à l'autre, varie en fonction du type de ciel. Les tendances observées dans la Figure IV-50 dépendent des conditions climatiques couvertes par nos mesures. Elles ne peuvent pas être généralisées. Cependant, produire de telles informations pour le climat d'une ville permettrait aux urbanistes de trouver la largeur de rue optimale.

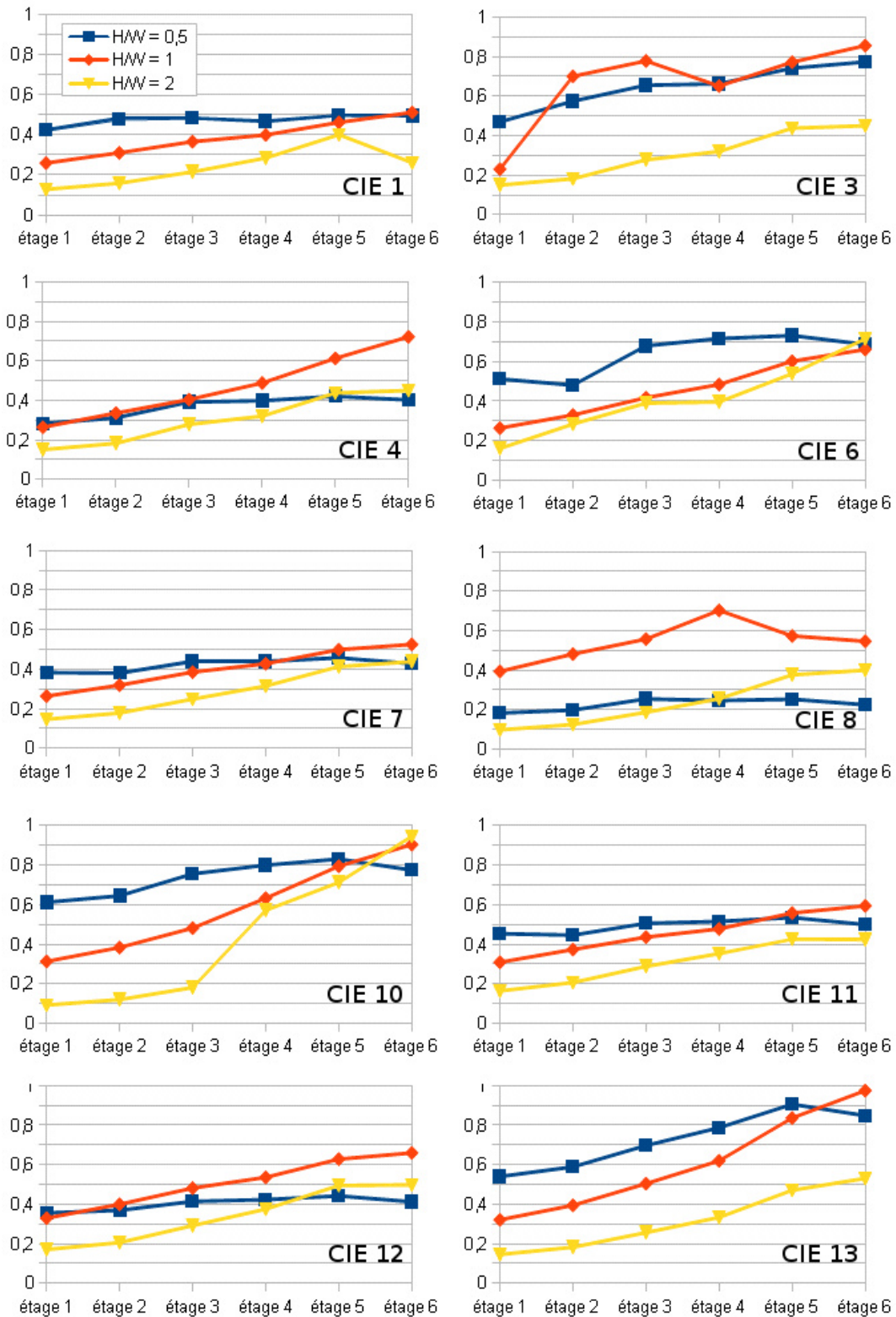


Figure IV-51 : Éclairages relatifs moyens pour chaque rapport d'aspect par type de ciel, pour le revêtement crépi, avec et sans soleil visible

IV.2. Test des logiciels de simulation

Ce chapitre présente la validation des logiciels de simulation Citysim, Daysim et Heliodon, à partir de la BDD d'éclairements lumineux mesurés sur la maquette. La configuration des logiciels est décrite dans la section II.5.2. Des simulations ont été effectuées avec chaque logiciel, pour les 3 rapports d'aspect H/W (2, 1 et 0,5) et les 4 revêtements de la maquette (noir, blanc, crépi et crépi avec fenêtres) présents dans la BDD.

De la Figure IV-52 à 56 se trouvent des nuages de points permettant d'évaluer la capacité des logiciels à produire des éclairements lumineux proches de ceux mesurés sur la maquette. Pour chaque diagramme, les éclairements mesurés sur la maquette se trouvent en abscisse, les valeurs simulées par chaque logiciel se trouvent en ordonnée. Chaque figure présente la comparaison mesures/simulations pour un type de façade, pour des conditions avec et sans soleil visible, pour les trois logiciels. Il a été choisi d'utiliser un pas horaire pour les simulations, car Citysim ne permet pas, dans la version utilisée, d'effectuer des simulations avec un pas de temps plus fin. Les échelles des deux axes étant identiques, une corrélation idéale entre les mesures et les simulations est représentée par la diagonale $y = x$.

Le coefficient de corrélation de Pearson r_p a été utilisé pour qualifier la qualité de la corrélation. Il s'agit du rapport de la covariance entre deux variables par le produit de leurs écarts types. La valeur de r_p se situe entre -1 et 1, plus sa valeur est proche de ces extrêmes, plus la corrélation linéaire est forte. S'il n'y a pas de corrélation linéaire entre les deux variables, alors $r_p=0$. La corrélation peut être négative si la valeur d'une des deux variables augmente lorsque l'autre diminue, dans notre cas, des corrélations positives sont attendues car les éclairements simulés doivent varier dans le même sens que les éclairements mesurés. Chaque point correspond à une corrélation entre la mesure d'une sonde sur la maquette et la valeur calculée par un logiciel pour la même sonde. Il y a ainsi 13 corrélations pour chacune des mesures de la BDD. Les nuages de points représentent les résultats obtenus toutes sondes confondues, la Figure IV-52 présente ces résultats pour le revêtement noir.

IV.2.1. Avec le revêtement noir

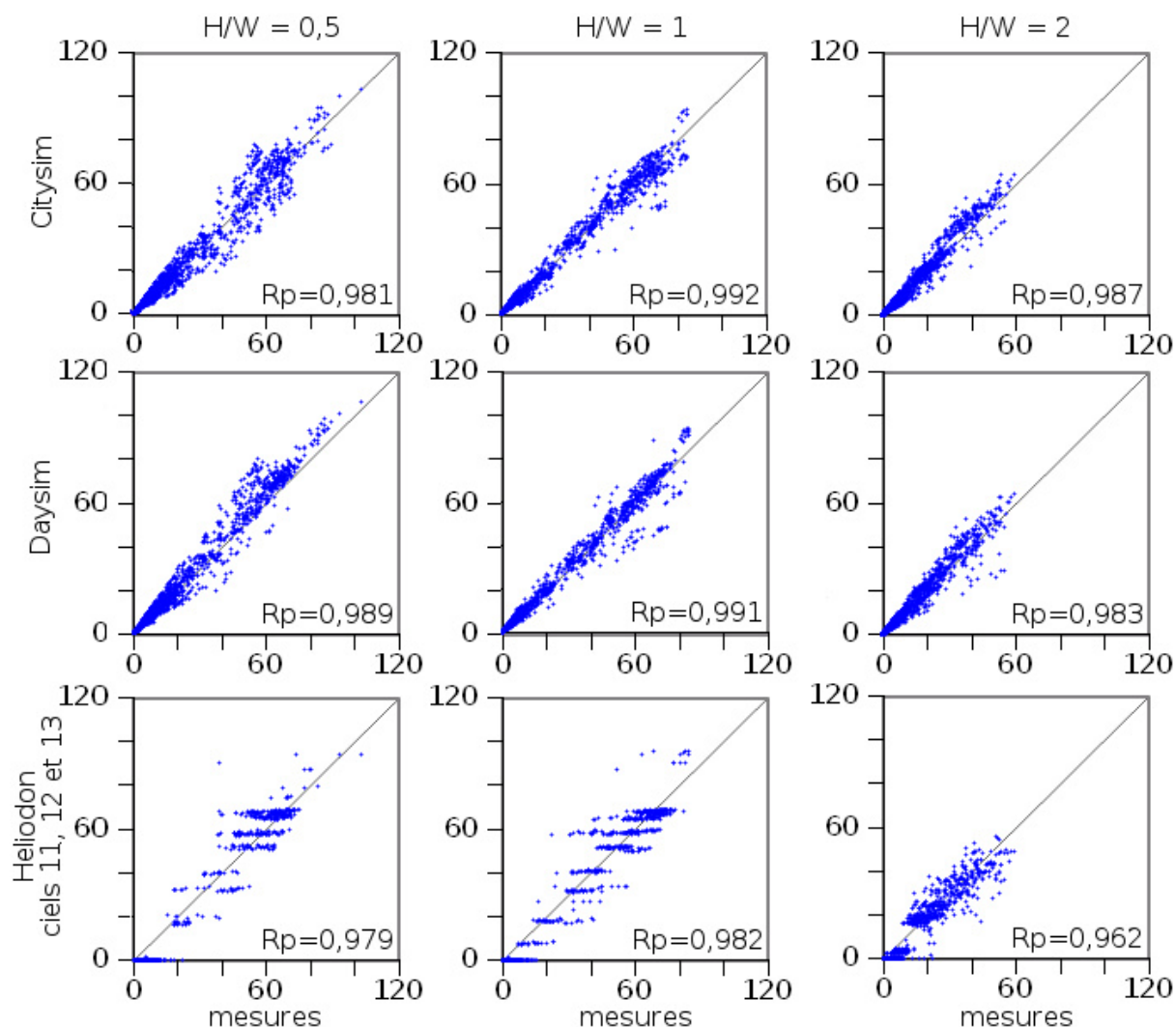


Figure IV-52 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement noir (en klux)

L'allure des nuages de points pour les logiciels Citysim et Daysim est toujours semblable. En effet, l'ensemble des points est regroupé autour de la droite d'équation $y = x$. Ce n'est pas le cas pour le logiciel Heliodon pour lequel il est possible de distinguer deux faits remarquables.

Premièrement, les valeurs sont majoritairement situées dans la même zone du graphique correspondant à l'aire située au-dessus de la droite $y = x$. Cela signifie qu'Heliodon a tendance à surestimer les éclairagements mesurés. Ce fait s'explique simplement par le fait que ce logiciel ne considère pas de données climatiques réelles. Il utilise un modèle de ciel clair qui varie en fonction du jour de l'année (cf. annexe M). Or, en réalité, le ciel est statistiquement couvert ou nuageux la moitié du temps (cf. Figure III-70 page Figure III-70). Ainsi l'éclairage mesuré est plus faible que ce qu'estime le logiciel lorsque le ciel est nuageux. Lors de conditions de ciel sans nuages, Heliodon a au contraire tendance à sous-estimer l'éclairage lumineux du fait de l'absence de prise en

compte de la composante diffuse. Cela se remarque sur les figures par un grand nombre de points situés juste en dessous de la droite $y = x$. Afin de pouvoir évaluer la capacité d'Heliodon à calculer des valeurs d'éclairements proches de celles mesurées selon son fonctionnement, il est nécessaire d'appliquer un filtre sur les conditions de ciel à prendre en considération. Dans ce but, uniquement les situations avec des types de ciel CIE 11, 12 et 13 ont été prises en compte pour Heliodon, car elles correspondent à des conditions de ciel sans nuages.

Le deuxième fait remarquable concerne la forme des nuages de points : des lignes horizontales apparaissent pour dix des douze configurations. En effet, sauf pour les cas $H/W=2$ avec le revêtement noir (cf. Figure IV-52) et $H/W=1$ avec le revêtement crépi (cf. Figure IV-55), les points sont majoritairement alignés le long de lignes horizontales. Cela est dû au fait qu'Heliodon ne prend pas en compte le rayonnement diffus et que les simulations sont effectuées avec un pas de temps horaire. Sans la prise en compte du rayonnement diffus, les éclairements calculés dépendent uniquement du rayonnement solaire direct. Cela signifie que lorsque le soleil n'est pas visible par une sonde virtuelle, cette sonde reçoit un éclairement nul. Ce n'est pas le cas avec Citysim ou Daysim, qui produisent un éclairement diffus résultant de la contribution du ciel visible depuis la sonde et des réflexions multiples sur les parois du canyon. Les nuages de points sont donc fortement dépendants de la durée pendant laquelle une configuration de maquette a été installée. Comme le montre la Figure IV-53, pour le rapport d'aspect $H/W=2$, il y a un plus grand nombre de positions de soleil disponibles avec le revêtement noir (52 jours de mesures) qu'avec le revêtement blanc (14 jours de mesure).

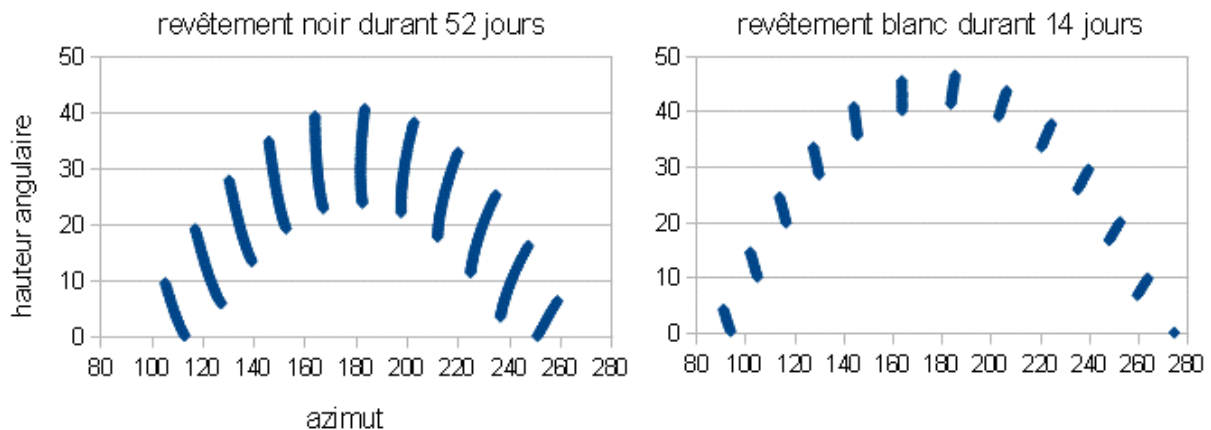


Figure IV-53 : Positions du soleil disponibles dans la BDD, pour $H/W=2$, avec les revêtements noir et blanc

Dans le cas du revêtement noir (Figure IV-52), les logiciels Citysim et Daysim donnent des coefficients de corrélation r_p situés entre 0,98 et 0,99 quel que soit le rapport d'aspect. Il existe donc une corrélation forte entre les mesures et les valeurs simulées par chacun de ces logiciels. Le rapport d'aspect n'a donc pas d'influence majeure sur la qualité de la corrélation pour le revêtement noir. Nous remarquons toutefois que pour chacun des logiciels, les coefficients de corrélation sont maximaux pour $H/W=1$. $H/W=2$ donne la valeur la plus faible. Ce résultat est intéressant car il permet de déterminer les paramètres qui réduisent la précision des logiciels.

Lorsque le canyon est le plus large, une plus grande zone du ciel est visible, la diminution de la corrélation correspond alors à une difficulté des modèles de ciel à rendre compte de la luminosité réelle du ciel. Le modèle de Perez utilisé par Citysim et Daysim permet d'obtenir une distribution homogène des luminances du ciel. En réalité, cette distribution est plutôt hétérogène, surtout dans le cas d'une couverture nuageuse discontinue, cela a une influence sur l'éclairement lumineux mesuré par chacune des sondes. Le modèle de Perez utilise les éclairagements énergétiques direct normal et diffus horizontal, des paramètres qui ne contiennent aucun détail sur l'hétérogénéité de la couverture nuageuse.

Lorsque le canyon est plus étroit, la corrélation est minimale pour les trois logiciels. Cette configuration met en évidence la capacité des logiciels à modéliser les réflexions multiples entre les façades. La visibilité du ciel étant restreinte, le rapprochement des façades implique une plus grande influence de leur revêtement sur l'éclairement lumineux du canyon. Toutefois, avec le revêtement noir qui a un facteur de réflexion lumineux de 5%, la contribution des réflexions entre les façades est quasiment nulle. Ce revêtement ne met donc pas à l'épreuve la capacité des logiciels à modéliser les inter-réflexions. Heliodon donne des corrélations plus faibles mais qui restent supérieures à 0,96. Pour les ciels sans nuages, les hypothèses effectuées par Heliodon ne mènent donc pas à des écarts importants.

IV.2.2. Avec le revêtement blanc

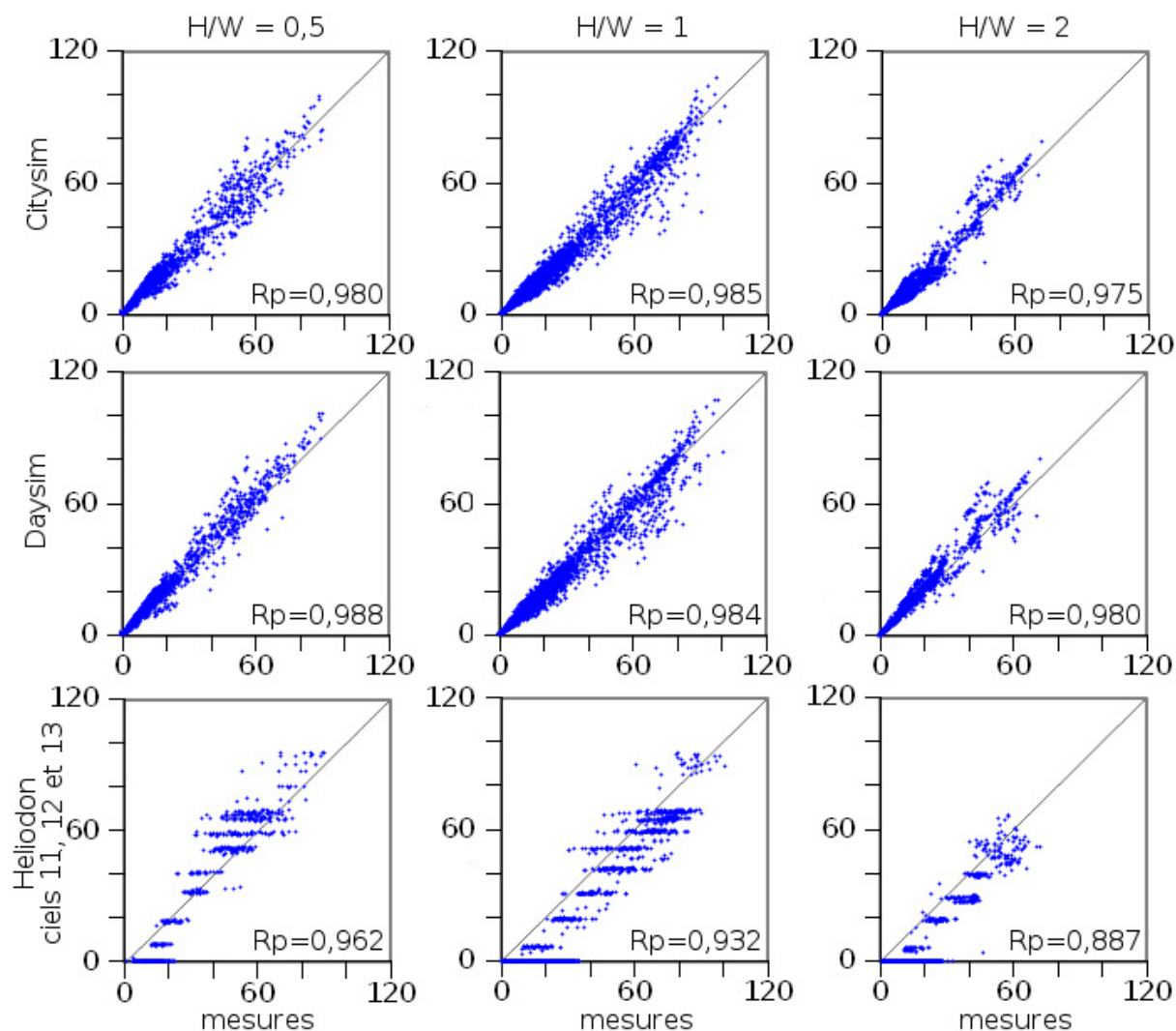


Figure IV-54 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement blanc (en klux)

Pour le revêtement blanc, on constate pour Citysim et Daysim une dispersion des points légèrement plus importante qui se traduit par des coefficients de corrélation légèrement plus faibles qu'avec le revêtement noir. Le revêtement blanc implique davantage de réflexions multiples entre les façades, ainsi cela montre que les algorithmes permettant de calculer cette contribution indirecte sont moins performants dans ces conditions. Daysim donne le coefficient de corrélation le plus élevé pour le rapport d'aspect $H/W=0,5$, c'est d'ailleurs le cas pour tous les revêtements. Pour $H/W=1$, Citysim donne une corrélation toujours légèrement supérieure à Daysim.

Pour tous les revêtements sauf le noir, le coefficient de corrélation d'Heliodon diminue lorsque le rapport d'aspect augmente, ce qui est dû au fait qu'il ne prend pas en compte les réflexions multiples. C'est aussi pour cette raison, que l'écart entre les coefficients de corrélation obtenus pour les revêtements noir et blanc est plus important pour Heliodon que pour les autres logiciels.

IV.2.3. Avec le revêtement crépi

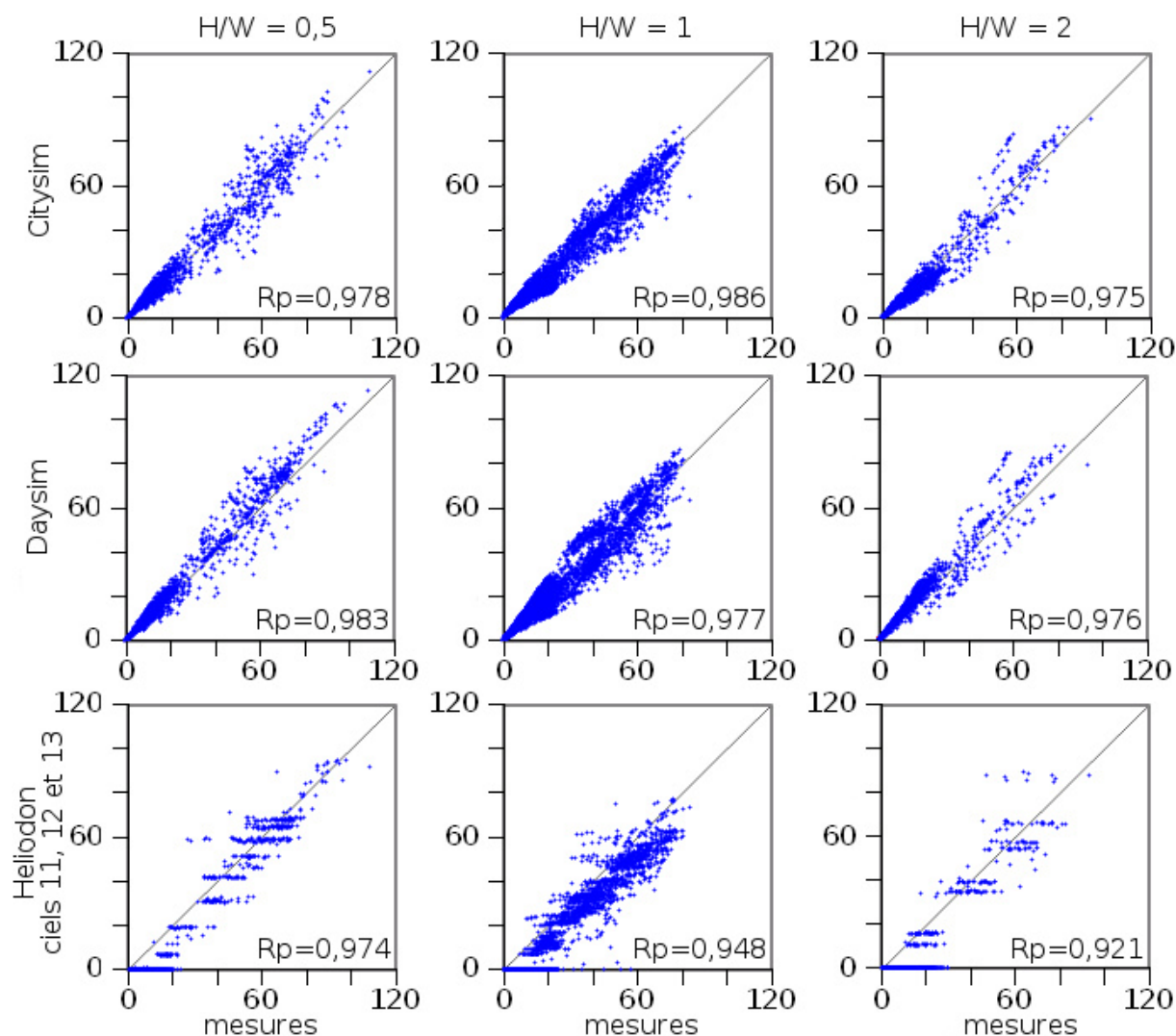


Figure IV-55 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement crépi (en klux)

Le revêtement crépi est celui qui bénéficie du plus grand nombre de valeurs mesurées pour H/W=1, ce qui explique que les nuages de points soient plus denses pour ce rapport d'aspect. Les coefficients de corrélation de Citysim et Daysim restent très bon avec des valeurs comprises entre 0,97 et 0,99. Cependant, les corrélations sont moins bonnes qu'avec le revêtement blanc. Le revêtement crépi possède une texture qui le différencie des façades blanches dont la surface est plane. Malgré un facteur de réflexion lumineux plus faible, 65% pour le crépi contre 87% pour le blanc, la valeur du coefficient de corrélation ne se trouve pas entre celle des revêtements noir et blanc, mais en dessous. Cela peut s'expliquer par le fait que les logiciels ne permettent pas de prendre en compte la texture du crépi qui a pourtant une influence sur la diffusion de la lumière par le matériau. Dans Daysim, il est possible de définir un paramètre de rugosité, mais la modification de sa valeur n'a aucune influence sur l'éclairement lumineux simulé. Ce paramètre est utilisé dans RADIANCE, pour créer des scènes plus réalistes, mais n'est visiblement pas pris en compte dans Daysim.

Le coefficient de corrélation pour Heliodon reste élevé, mais la valeur simulée peut être assez éloignée de la valeur mesurée pour une situation donnée. Le coefficient de corrélation ne rend pas compte de la forme particulière du nuage de points avec ses bandes horizontales.

IV.2.4. Avec le revêtement crépi vitré

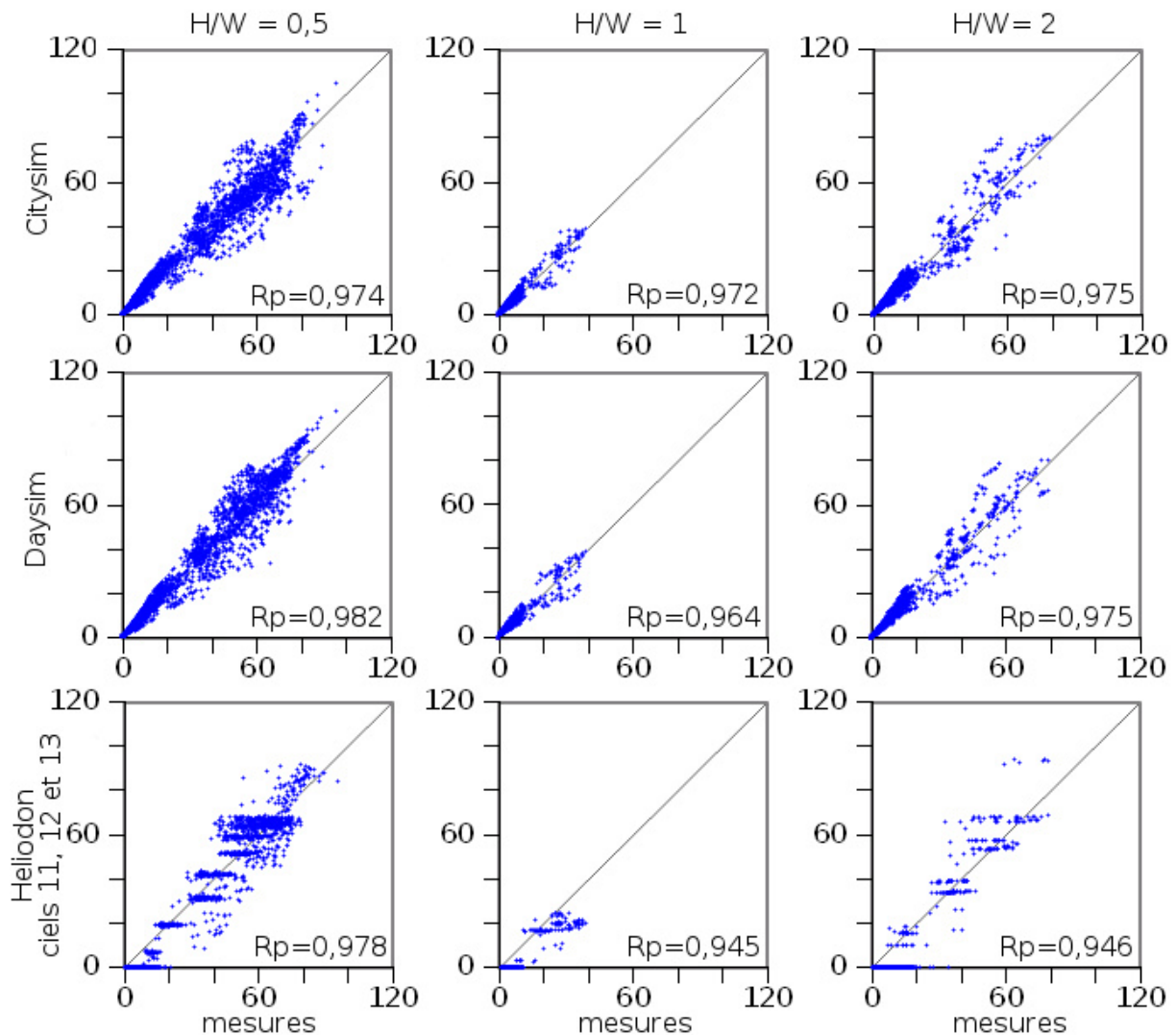


Figure IV-56 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement crépi+verre (en klux)

Le revêtement crépi avec parties vitrées est à l'origine des coefficients de corrélation les plus faibles des quatre revêtements utilisés. Pour H/W=1, les données ont été collectées durant le mois de décembre 2011 et le mois de janvier 2012, ce qui implique des niveaux d'éclairage faibles et donc une plus grande difficulté à tirer des conclusions sur la qualité de la corrélation. Néanmoins, pour les autres rapports d'aspect, Citysim et Daysim continuent de donner des coefficients supérieurs à 0,96 mais plus faibles que pour les autres

revêtements. Cette diminution était attendue du fait que ce revêtement est plus complexe en raison de la présence des parties vitrées. D'ailleurs, ces dernières n'ont pas pu être modélisées convenablement dans le logiciel Citysim car, dans la version utilisée, il n'est pas possible de définir une surface composée de plusieurs matériaux différents. De plus, Citysim permet de définir uniquement des surfaces diffusantes. En revanche, Daysim permet de représenter le revêtement plus fidèlement à la réalité : des zones vitrées avec réflexion spéculaire et des zones avec réflexion diffuse pour la partie crépi. Pourtant il n'y a pas de différence significative entre ces deux logiciels pour ce type de revêtement ce qui montre *a priori* que la prise en compte des surfaces vitrées n'est pas déterminante pour l'obtention d'éclairiments lumineux proches de la réalité pour ce type de revêtement. Cette conclusion est valable pour un taux de vitrage de 30%. En augmentant le taux de surface vitrée, l'écart entre Citysim et Daysim pourrait se creuser en faveur de Daysim.

La Figure IV-57 montre le détail des coefficients de corrélation par type de ciel. Citysim et Daysim donnent de meilleurs résultats pour les types ciel peu ou pas nuageux (type CIE > 8). Pour ces deux logiciels, nous pouvons observer des minima pour les types CIE 3 avec le revêtement vitré, et CIE 6 avec les autres revêtements, ce pour des rapports d'aspect de 0,5 et 1. La corrélation par rapport aux mesures sur la maquette est moins bonne, mais cela ne permet pas de creuser d'écart entre les deux logiciels qui donnent des résultats similaires. Cela provient du fait que les deux logiciels utilisent le même modèle de ciel, le modèle "tout temps" de Perez, décrit dans la section II.3.3.1.

Pour Heliodon, seules des données pour les types 11, 12 et 13 ont été retenues afin d'évaluer les éclairiments produits par le logiciel selon ses capacités. Les valeurs minimales sont obtenues pour le type 11, les valeurs maximales sont obtenues pour le type 12. Le type CIE 11 est encore légèrement "laiteux" (cf. Tableau II-1, page 111) alors que le type 12 correspond au ciel clair standard de la CIE. Il est donc normal qu'Heliodon produise des corrélations plus fortes pour ce type de ciel qui se rapproche le plus du type de situation qu'il modélise (cf. section II.5.2.3).

Le fait que les logiciels soient moins performants pour les conditions de ciels couverts est problématique pour la considération de l'accès à la lumière naturelle en milieu urbain. En effet, plus le ciel est sombre, plus cet accès est critique. L'amélioration de la précision des logiciels de simulation pour ce type de ciel est donc préférable pour bénéficier d'outils permettant de concevoir ou rénover les façades de bâtiments en optimisant le bilan lumineux à l'intérieur du canyon.

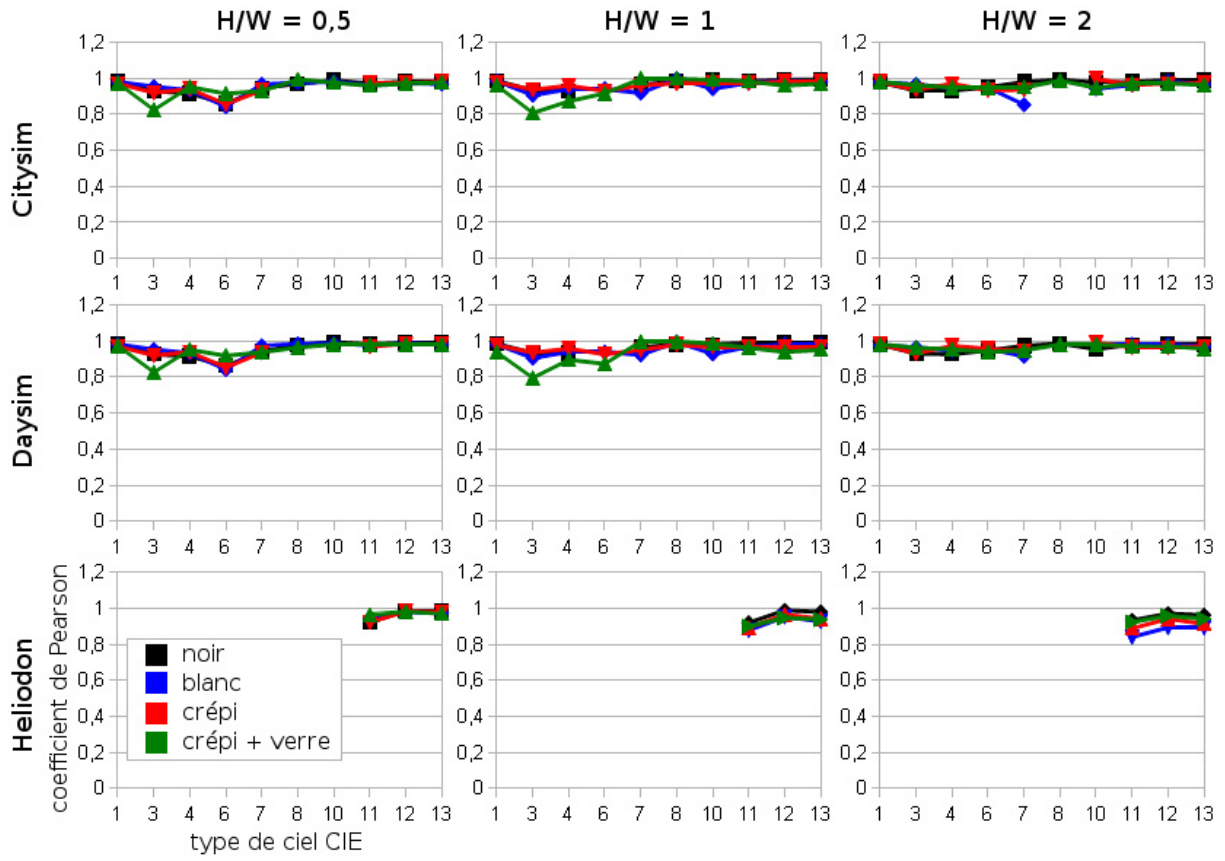


Figure IV-57 : Coefficients de corrélation par type de ciel par logiciel pour toutes les combinaisons de rapports d'aspect et de revêtements

IV.3. Analyse des mesures sur le terrain

Nous avons montré dans le chapitre précédent la corrélation entre des simulations et des mesures sur un modèle réduit de canyon urbain. La maquette représente une version simplifiée d'un canyon urbain réel. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des mesures d'éclairement lumineux qui ont été effectuées au sein de véritables canyons urbains de la ville de Lyon, en utilisant le protocole décrit dans le chapitre III.1. Deux méthodes ont été utilisées pour obtenir ces éclairagements. La première sert de référence pour l'autre, il s'agit de mesures classiques à l'aide de 4 sondes photométriques disposées le long de la façade, à différentes hauteurs. La deuxième méthode produit une carte d'éclairagements sur la façade à partir d'une carte de luminances de la façade. L'avantage est de disposer alors de la répartition spatiale des éclairagements sur la façade. Les éclairagements obtenus à partir de ces deux méthodes sont comparés. De même, des comparaisons entre les valeurs des sondes et les valeurs calculées par le logiciel Daysim, sont présentées. Pour notre étude, le logiciel Citysim n'a pas été retenu : les raisons pratiques ont été décrites dans la section III.1.8. La démarche générale vise à mettre en évidence ce qu'implique l'utilisation d'un modèle réduit ou d'une simulation par rapport à des mesures réelles.

IV.3.1. Éclairagements mesurés avec les sondes photométriques

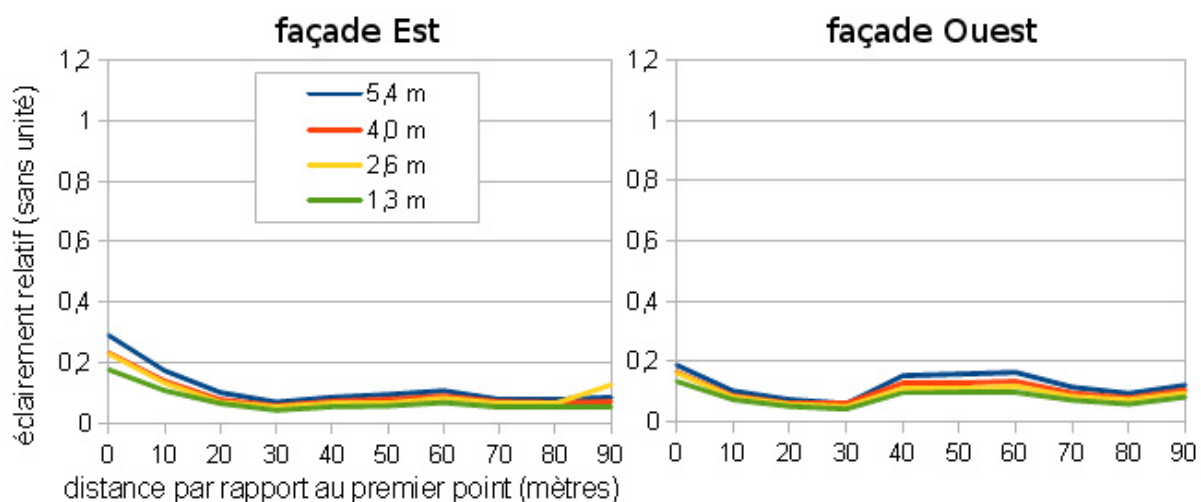
Des rues de Lyon représentatives d'un canyon urbain ont été sélectionnées et décrites dans le chapitre III.1. L'éclairement lumineux a été mesuré à l'aide d'un ensemble de quatre sondes photométriques installées à différentes hauteurs d'un mât. L'éclairement au niveau des façades des bâtiments a été mesuré tous les dix mètres en plaçant ce mât juste devant la façade. L'éclairement a été systématiquement mesuré sur les deux façades du canyon.

Pour chaque rue, les données sont présentées façade par façade. Comme dans le chapitre IV.1, les éclairagements lumineux mesurés sont présentés relativement à l'éclairement lumineux global horizontal mesuré sans obstruction. Comme il était impossible de mesurer directement cette valeur sur site, nous avons utilisé les mesures de la station IDMP de Vaulx-en-Velin. Elle se trouve à moins de 7 km de la rue la plus éloignée. La distance de chaque mesure par rapport à la première mesure dans la rue (mesure de référence), se trouve en abscisse des graphiques de cette section. Cela permet d'analyser l'influence d'une façade sur l'autre car les graphiques des éclairagements mesurés sur les deux rangées façades opposées de chaque rue sont présentés l'un à côté de l'autre.

IV.3.1.1. Rue des Charmettes

Cette rue est orientée nord/sud avec un rapport d'aspect de 1,2 (cf. section III.1.1 page 148). Les mesures effectuées dans la rue des Charmettes ont été divisées en deux groupes : nord et sud. C'est une rue très longue dans laquelle les bâtiments situés au sud présentent des revêtements et des hauteurs homogènes, ce n'est pas le cas pour les bâtiments situés au nord. Ces deux groupes nous permettront de voir l'influence de l'homogénéité des paramètres sur la quantité d'éclairement ainsi que sur la qualité des simulations.

La Figure IV-58 montre les éclairagements relatifs pour la partie située au sud. L'ordre de grandeur des valeurs est équivalent pour les deux côtés. Les mesures ayant été effectuées durant une matinée, la façade située à l'ouest se trouvait face au soleil, ce dernier étant néanmoins caché par les bâtiments d'en face durant toutes ces mesures. Ainsi on constate que les niveaux d'éclairagement pour cette façade sont légèrement supérieurs à ceux du côté opposé. Cela est dû au fait que le ciel est plus lumineux autour du soleil, ce phénomène est d'autant plus remarquable avec un trouble atmosphérique élevé. Les éclairagements relatifs mesurés sur la maquette pour un canyon avec un rapport d'aspect égal à 1 sont compris entre 0,04 et 0,17 pour le premier étage avec le revêtement noir en l'absence de soleil, ce qui correspond au rapport d'aspect le plus proche de la rue des Charmettes (H/W=1,2). Cet étage correspond à une hauteur réelle de 1,8 m (cf. Tableau III-6 page 207). Les valeurs mesurées sur site se trouvent entre 0,04 et 0,19 pour le côté Ouest et jusqu'à 0,3 pour le côté Est. Cependant, on remarque que les premières mesures donnent des valeurs supérieures au reste, cela s'explique par le fait qu'elles correspondent au début de la rue, à proximité d'une intersection avec une vue dégagée du fait de la présence d'un petit parc. L'accès à la lumière naturelle provenant du ciel est donc plus important ce qui n'est pas le cas dans le reste de la rue qui représente bien un canyon urbain.



*Figure IV-58 : Éclairagements relatifs pour la partie sud de la rue des Charmettes.
Façades Est dos au soleil et façades Ouest face au soleil*

En tenant compte uniquement des valeurs au-delà de la troisième mesure, on constate que les valeurs mesurées se trouvent dans le même intervalle que celles de la maquette avec le revêtement noir. Or, les facteurs de réflexion mesurés se trouvent entre 30% et 80% avec une moyenne à 60% qui est une valeur largement plus élevée que la valeur de 5% du revêtement noir. Il existe donc une différence, indépendante du rapport d'aspect et du facteur de réflexion moyen, entre la rue et la maquette qui implique une quantité d'éclairagement relatif plus faible. Étant donné que l'écart est systématique, cela peut être difficilement mis en relation avec un écart ponctuel entre l'éclairage horizontal mesuré sur la station et l'éclairage horizontal réel au niveau de la rue. Cela signifie que les sondes ont mesuré une quantité d'éclairage trop faible. Les valeurs mesurées sur la maquette sont considérées comme fiables puisqu'il s'agit d'un environnement contrôlé,

contrairement aux différentes rues. De plus elles correspondent bien aux valeurs modélisées par les logiciels. Les sondes ayant été étalonnées, cela semble indiquer que les facteurs de réflexion lumineux mesurés sur site ne sont pas représentatifs du reste des façades. Dans le cas présent, l'utilisation d'une valeur unique mesurée au rez-de-chaussée (cf. section III.1.5) surestime la quantité de lumière réellement réfléchiée par l'ensemble de la façade.

Les éclairagements relatifs des façades Est et Ouest de la partie sud de la rue permettent de constater l'influence de la façade au soleil par rapport à la façade d'en face. En effet, il y a une correspondance entre les variations du niveau d'éclairagement d'un côté à l'autre. En prenant les mesures à 30 m comme point de départ, l'éclairagement relatif est équivalent pour toutes les sondes. La façade Ouest recevant plus de lumière, l'éclairagement de sa surface augmente jusqu'à 60 m et diminue jusqu'à 80 m. L'éclairagement mesuré sur la façade d'en face suit la tendance mais avec un niveau inférieur. En regardant les photos, on peut voir que la façade Ouest est à moitié ensoleillée à partir de la mesure à 30 m comme le montre la Figure IV-59.

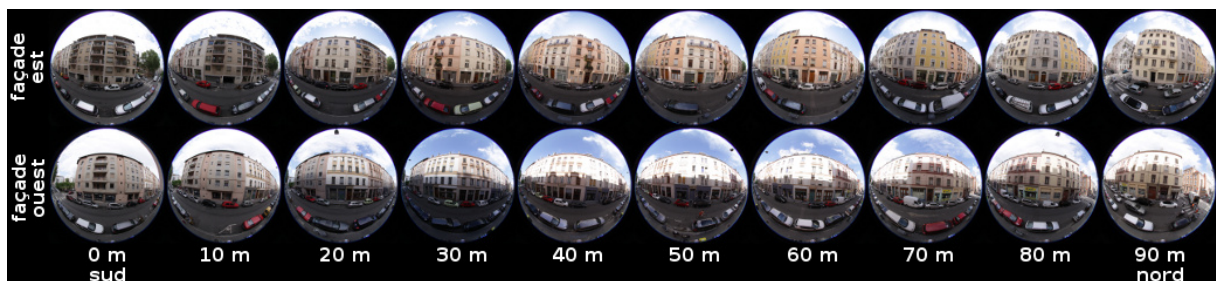


Figure IV-59 : Photos fisheye des façades de la partie sud de la rue des Charmettes

Ces photos ayant été prises avec le même indice de luminance (cf. équation (III-1) page 145), les variations de luminosité sont comparables d'une photo à l'autre, de plus ces variations peuvent être considérées comme représentatives de la réalité. La Figure IV-60 montre les images fisheye prises dans la partie nord de la rue des Charmettes.

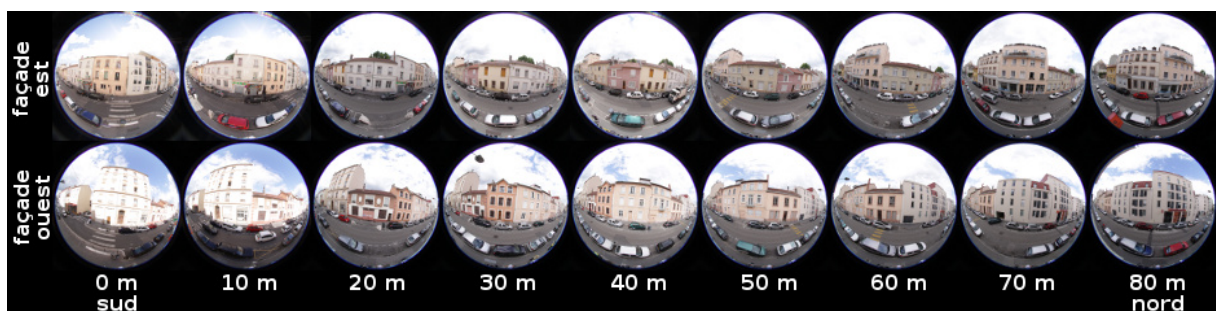


Figure IV-60 : Photos fisheye des façades de la partie nord de la rue des Charmettes

La Figure IV-61 montre les éclairagements relatifs pour la partie nord de la rue des Charmettes. Les mesures ayant été effectuées plus tard dans la matinée, le soleil était visible depuis la façade Ouest, ce qui explique l'écart important entre les deux façades. L'irrégularité de hauteur des bâtiments implique de fortes variations d'une mesure à l'autre.

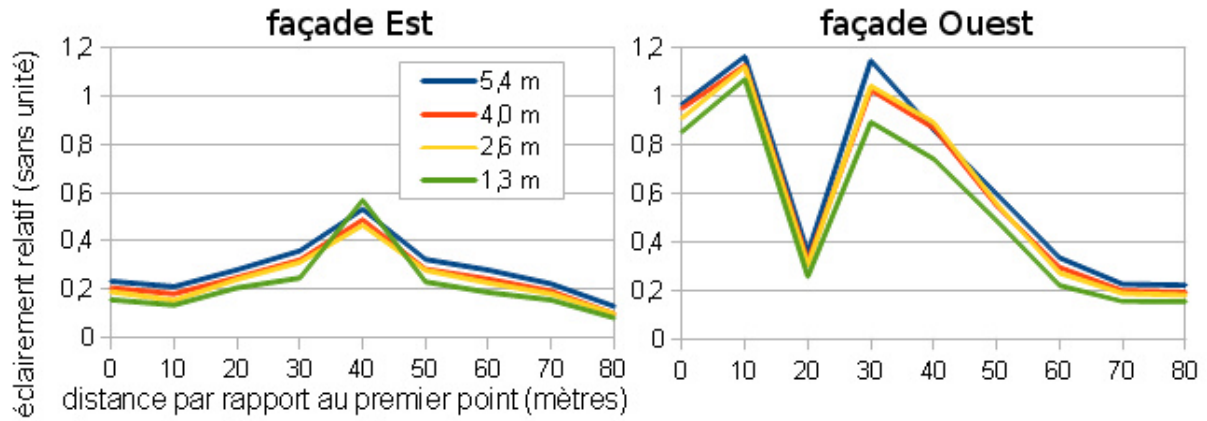


Figure IV-61 : Éclairements relatifs pour la partie nord de la rue des Charmettes.
Façades Est dos au soleil et façades Ouest face au soleil

Les deux parties de la rue présentent le même ordre dans les sondes, en effet, plus elle est haute, plus la valeur d'éclairement mesurée est élevée. Il peut arriver que cet ordre ne soit pas respecté comme pour la mesure à 40 m de la partie nord ou la sonde la plus en bas donne la valeur maximale, cela peut être dû à un reflet d'une vitre de la façade d'en face ou la contribution d'un véhicule. Dans ce cas, une consultation de la photographie correspondante révèle qu'une voiture blanche se trouve juste devant la position du mât pour cette série de mesures. Les valeurs de la partie nord avec soleil (façade Ouest) sont du même ordre que la moyenne pour tout type de ciel, pour le rapport d'aspect H/W=1 sur la maquette au niveau du 6^{ème} étage. Le fait d'avoir des bâtiments moins hauts sur la façade d'en face revient à obtenir des valeurs d'éclairement proches de celles d'étages supérieurs.

IV.3.1.2. Rue Fénelon

Cette rue est orientée est/ouest, ainsi la façade située au nord fait face au soleil. Les mesures ont été effectuées aux environs du midi solaire, la façade sud est donc totalement dans l'ombre puisque le soleil est derrière, alors que la façade nord est intégralement ensoleillée. Ces observations sont visibles sur la Figure IV-62.

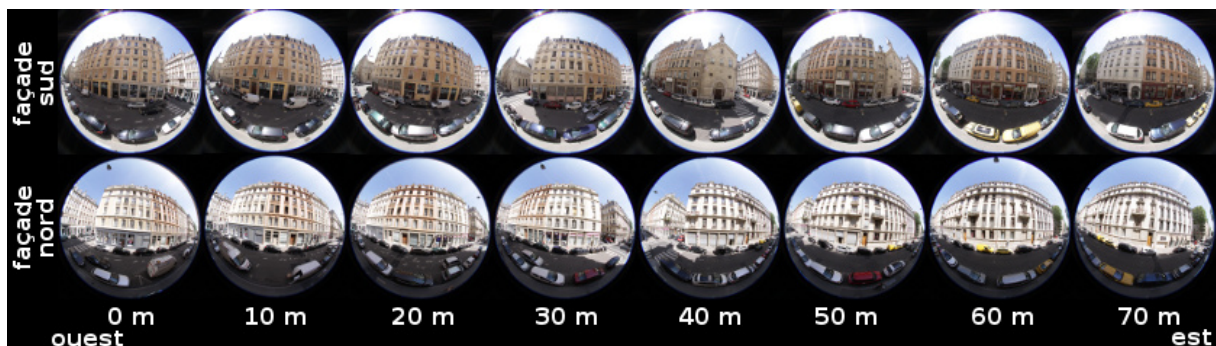
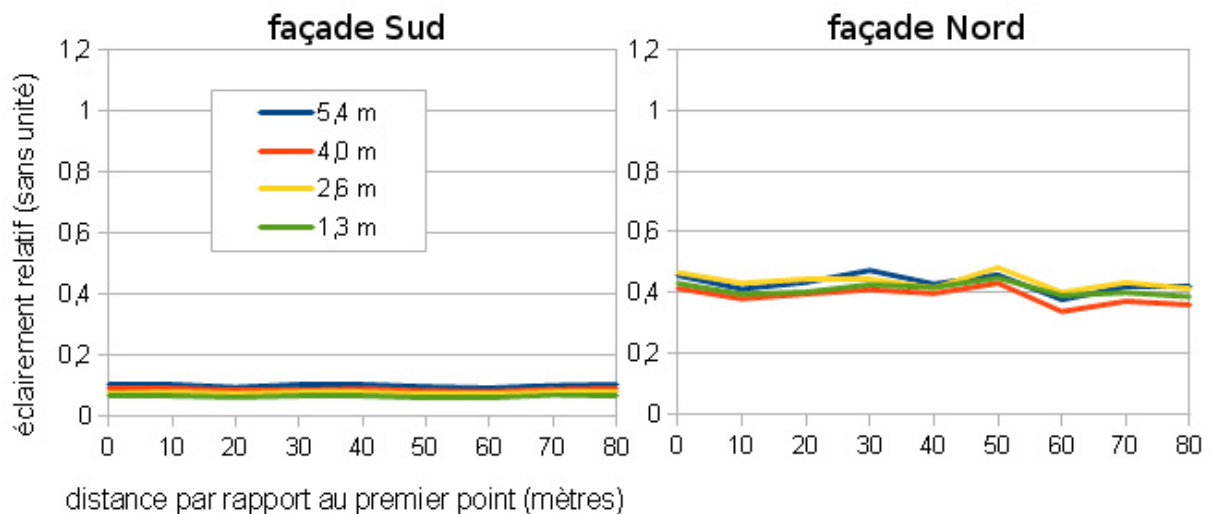


Figure IV-62 : Photos fisheye des façades de la rue Fénelon

La Figure IV-63 montre les éclairements relatifs mesurés dans cette rue. Cette fois l'écart entre les deux côtés est conséquent. Il n'est pas possible de faire de lien avec les mesures

sur la maquette, cependant ces résultats permettent d'obtenir d'autres informations intéressantes. En effet, les éclairagements relatifs mesurés à l'ombre sont relativement constants. L'ordre des sondes est toujours le même, la quantité d'éclairagement croît avec la hauteur de la sonde. En revanche, pour la partie ensoleillée, les valeurs varient plus et l'ordre n'est pas conservé. L'étude des photographies ne révèle pas la présence de nuages et la hauteur des bâtiments est quasiment identique pour toutes les façades, les variations ne sont donc pas occasionnées par des obstructions au soleil. Cependant, on peut observer une différence au niveau de la couleur des véhicules stationnés le long des trottoirs. En effet, lorsque les valeurs de la façade nord sont les plus faibles, les voitures visibles sont de couleurs foncées (majoritairement noires) alors que pour les valeurs les plus élevées, des voitures aux couleurs claires (majoritairement blanches) sont stationnées devant les sondes. Cela explique aussi le changement de l'ordre des sondes. En effet, les sondes à 1,3 m et 2,6 m qui sont les plus près du sol prennent des valeurs supérieures à la sonde à 4 m voire à la sonde à 5,4 m. Cela peut provenir de la réflexion du rayonnement solaire sur le toit des voitures garées dans la rue. Ces dernières étant situées à environ deux mètres des sondes, leur contribution est plus importante pour les sondes qui sont situées en bas.



*Figure IV-63 : Éclairagements relatifs pour la rue Fénelon.
Façades sud dos au soleil et façades nord face au soleil*

IV.3.1.3. Rue Molière

À l'instar de la rue des Charmettes, la rue Molière est orientée nord/sud. Cette rue présente un rapport d'aspect de 1,4 avec des bâtiments de 20 m au lieu de $H/W=1,2$ avec des bâtiments de 15 m pour la rue des Charmettes. Les mesures ont aussi été effectuées durant la matinée, de ce fait, la moitié de la façade côté Ouest était partiellement ensoleillée au début des mesures. Durant le temps nécessaire pour effectuer les relevés le long de la rue, la surface ensoleillée des façades a augmenté progressivement jusqu'à devenir totale. Les photos fisheye sont présentées tous les deux points de mesure, pour conserver une bonne visibilité, dans la Figure IV-64.

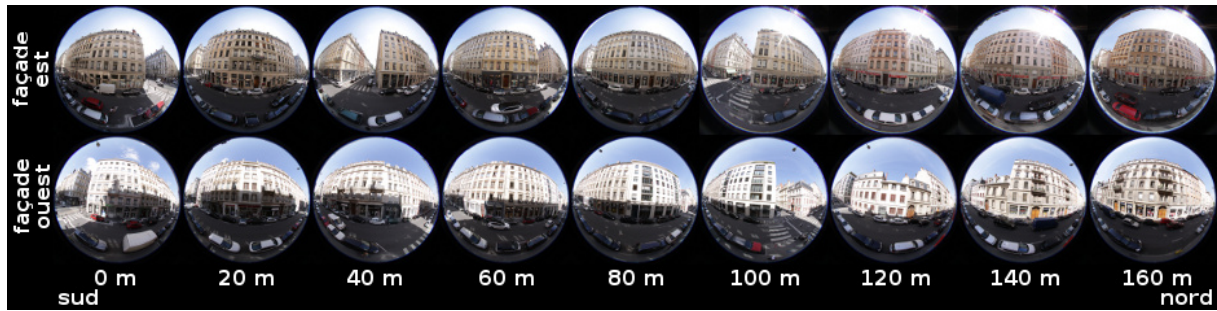


Figure IV-64 : Photos fisheye des façades de la rue Molière

Dans la Figure IV-65, les valeurs d'éclairéement relatif de la partie à l'ombre sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans la rue des Charmettes. Elles sont quasiment constantes car, du fait de sa longueur, cette rue est assez bien représentative d'un canyon urbain idéal.

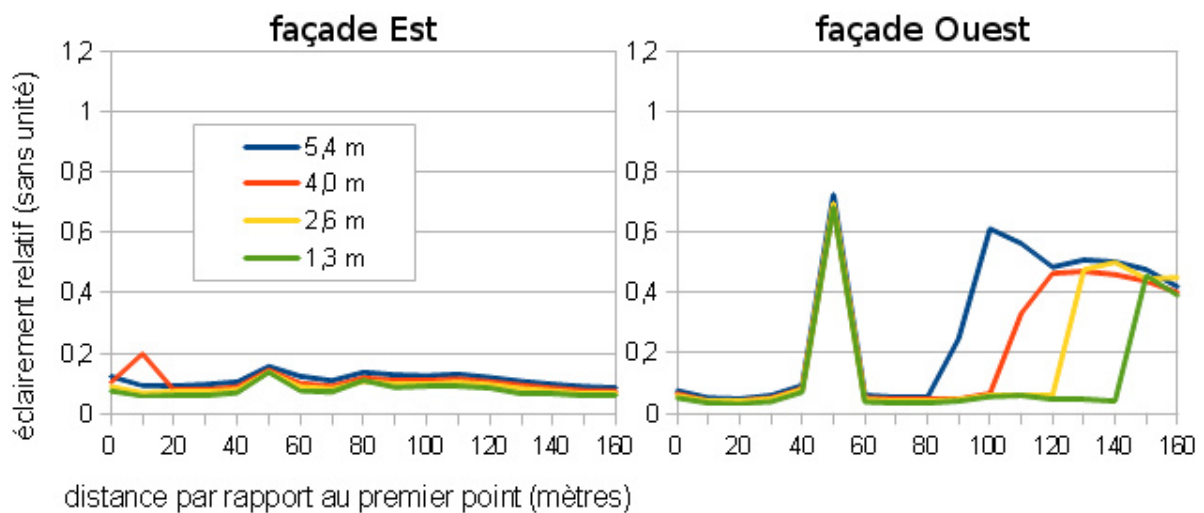


Figure IV-65 : Éclairéements relatifs pour la rue Molière.
Façades Est dos au soleil et façades Ouest face au soleil

L'ordre des sondes est conservé tant qu'elles ne sont pas directement éclairées par le soleil. Il est intéressant de constater un pic au niveau de la mesure à 50 mètres sur la façade Est. Cela est dû à la présence d'une intersection en "T" avec la rue Fénelon qui lui est perpendiculaire comme le montre la Figure IV-66. Lors de cette mesure, toutes les sondes étaient ensoleillées. La contribution de la façade se remarque sur le côté opposé avec un pic, moins marqué, à la même distance de 50 mètres. Si l'éclairéement relatif de la façade ensoleillée est respectivement 8,6 et 14,4 fois plus grand que les autres mesures de cette façade, l'influence sur le côté opposé est relativement faible. En effet, pour la façade à l'ombre, l'éclairéement est seulement 1,7 et 1,5 fois plus grand que les autres mesures. Cette tendance est aussi remarquable à partir des mesures à 160 mètres alors que toutes les sondes sont ensoleillées. L'éclairéement relatif sur le côté à l'ombre reste alors quasiment inchangé par rapport aux mesures précédentes pour lesquelles la façade d'en face n'était que partiellement ou pas ensoleillée pour les premières.



Figure IV-66 : Photo correspondant à la série de mesures de la façade Ouest à 50 m

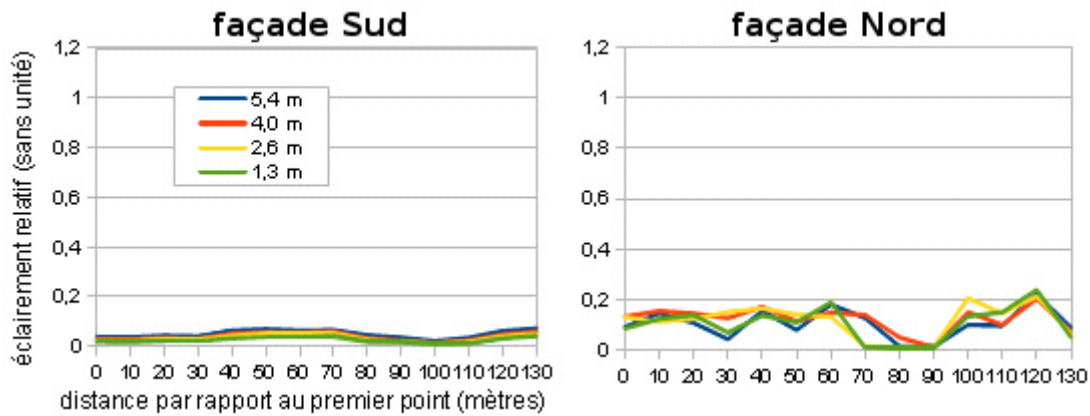
La contribution de la façade ensoleillée est donc plus faible que pour la rue des Charmettes. Cela ne peut pas être dû à un effet d'échelle car le comportement de la lumière reste le même. Cela peut être dû au rapport d'aspect qui est légèrement supérieur, ce qui implique une rue plus étroite. La façade étant plus proche, sa contribution est certes légèrement plus importante, mais cela implique aussi une plus grande hauteur angulaire minimale du soleil, pour laquelle la façade Ouest est totalement éclairée. Cela implique que l'angle d'incidence du soleil est supérieur et donc que la lumière réfléchiée vers l'autre façade est moins importante. Ce raisonnement est valable dans le cas où l'hypothèse des matériaux parfaitement diffusant n'est pas considérée, ce qui correspond à la réalité. Enfin, le facteur de réflexion lumineux moyen mesuré dans la rue des Charmettes est de 58% alors qu'il est de 44% dans la rue Molière présentement analysée. La combinaison de ces deux paramètres peut expliquer la différence avec les mesures effectuées dans la partie sud de la rue des Charmettes.

Un éclairage relatif plus important a été mesuré sur la façade Est à 10 mètres. La sonde située à 4 m donne une valeur deux fois plus élevée que celle des autres sondes. Cela est certainement dû à un reflet provenant soit d'un véhicule garé dans la rue, soit d'une fenêtre sur la façade d'en face. Cette valeur ne doit pas être exclue car elle représente une caractéristique qui n'est pas fugace. En effet, comme il est expliqué dans la section III.1.3 (page 153), l'appareil collectant les valeurs des sondes a été configuré pour enregistrer une valeur moyenne sur 15 secondes avec un pas d'échantillonnage d'une seconde. Cette valeur représente donc un phénomène suffisamment persistant pour être mesuré par la sonde. D'ailleurs, ce phénomène est présent pour la mesure à 90 m de la façade Est de la rue des Charmettes sur la Figure IV-58.

Nous observons enfin que les sondes produisent subitement des valeurs plus importantes pour la façade Ouest, à partir de 80 m. La distance varie en fonction de la sonde. Cela est dû au temps mis pour effectuer les relevés, soit 2,5 minutes en moyenne (cf. section III.1.3), temps pendant lequel la hauteur angulaire du soleil augmentait progressivement, éclairant petit à petit les façades des bâtiments en allant de sonde en sonde. Une fois les sondes ensoleillées, la valeur mesurée atteint un maximum puis diminue du fait de l'angle d'incidence du soleil qui augmente, réduisant ainsi la quantité reçue par le capteur et ce malgré la correction en cosinus de ces derniers.

IV.3.1.4. Rue Leynaud

La rue Leynaud est orientée est/ouest tout comme la rue Fénelon, il existe donc une façade nord qui est susceptible d'être ensoleillée contrairement à la façade sud qui ne l'est jamais. La Figure IV-67 montre les éclairagements relatifs mesurés dans cette rue.



*Figure IV-67 : Éclairagements relatifs pour la rue Leynaud.
Façades sud dos au soleil et façades nord face au soleil*

Une fois de plus, l'écart est important entre le côté ensoleillé et le côté à l'ombre, cependant il est plus faible que pour la rue Fénelon qui était de 0,34 en moyenne alors qu'il est de 0,07 en moyenne pour la rue Leynaud. Cette rue possède un rapport d'aspect de 3,5 ce qui est assez élevé. Les photos fisheye de la Figure IV-68 permettent de s'en rendre compte : les façades occupent presque toute la surface des images.

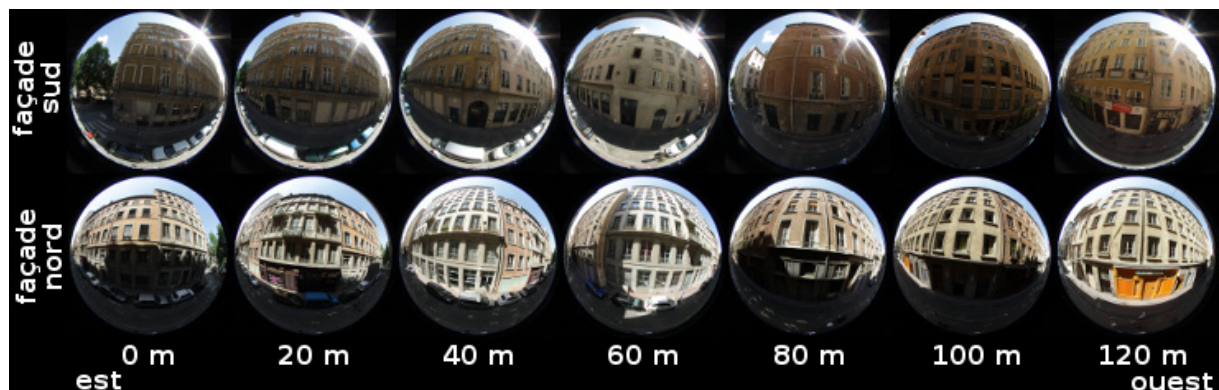


Figure IV-68 : Photos fisheye des façades de la rue Leynaud

Cela implique que, pour avoir la façade ensoleillée, le soleil doit être très haut dans le ciel et donc une fois de plus avec un angle d'incidence par rapport aux façades assez élevé et donc une quantité d'éclairage plus faible pour une même unité de surface. Cela dit, le facteur de réflexion moyen mesuré dans cette rue est de 34,4%. Cette valeur est faible et peut s'expliquer par la tendance des rues très étroites à se salir (cf. section I.3.2), sans être plus fréquemment entretenues pour autant.

Sur la façade nord, les mesures prises à 70 m à 90 m montrent une diminution importante de l'éclairement mesuré, cela est dû au bâtiment opposé à cette section de la façade qui est plus haut que tous les autres. On peut voir, sur Figure IV-68, l'ombre que ce bâtiment projette sur les images prises à 80 m et 100 m, alors que ça n'est pas le cas pour les mesures précédentes et suivantes. Cela a une influence légère sur l'éclairement relatif de la façade sud. Cette influence se voit entre 80 m et 110 m sur la Figure IV-67, un décalage dans les positions du mât a en effet été observé lors de l'analyse des photos fisheye (cf. section IV.3.3.4). Les cartes de luminances de cette rue ne seront donc pas étudiées. Les éclairagements lumineux mesurés par les sondes, et utilisés dans cette section, sont susceptibles d'être faussés.

L'ordre des sondes constaté dans les rues précédentes se retrouve pour la façade sud, mais ce n'est pas le cas pour la façade nord. Pour celle-ci, l'ordre varie d'une série de mesures à l'autre sans pouvoir déterminer de tendance. Plusieurs facteurs peuvent expliquer les variations des éclairagements relatifs sur la façade le long de la rue : des réflexions sur les carrosseries des véhicules garés à certains endroits, des élargissements ou des rétrécissements, des balcons proéminant créant des ombres très localisées.

Les résultats obtenus dans cette rue confirment le fait que l'influence du facteur de réflexion sur l'éclairement du canyon est d'autant moins grande que ce facteur est faible, comme cela a été montré sur la maquette (cf. section IV.1.4). De même, l'influence de la façade ensoleillée est d'autant moins grande que la rue est étroite. Cela a aussi été observé à partir des mesures effectuées sur la maquette pour la configuration $H/W=2$.

IV.3.1.5. Rue Royale

Cette rue s'apparente à un canyon urbain très étroit avec un rapport d'aspect de 3 et une grande homogénéité dans les hauteurs de bâtiments. Les mesures ont été effectuées assez tôt dans la matinée, ainsi la façade Ouest (face au soleil) n'a été que très peu ensoleillée comme le montre la Figure IV-69.

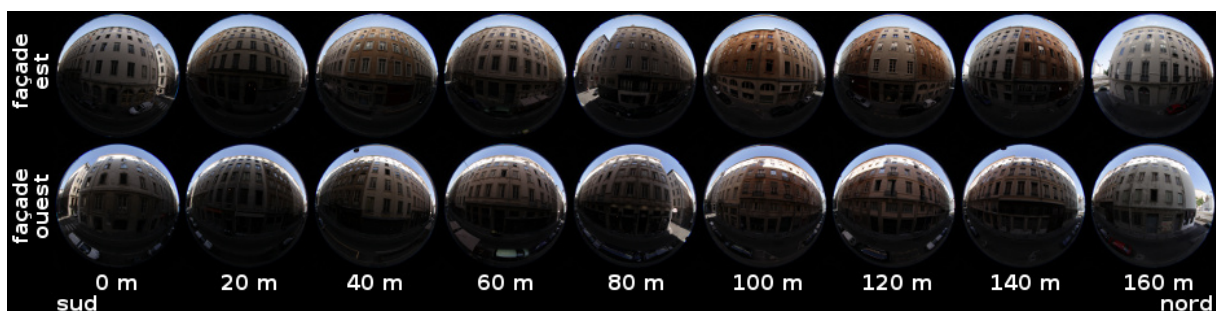


Figure IV-69 : Photos fisheye des façades de la rue Royale

Les éclairagements relatifs mesurés dans cette rue sont présentés sur la Figure IV-70. L'échelle utilisée en ordonnées est la même que pour rues précédentes.

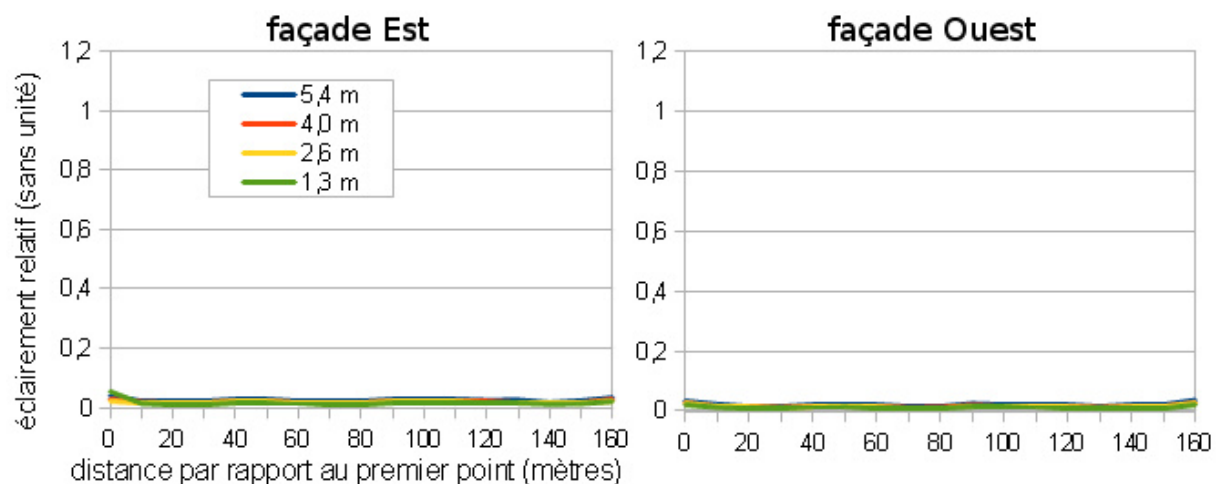


Figure IV-70 : Éclaircements relatifs pour la rue Royale.
Façades Est dos au soleil et façades nord face au soleil

Les valeurs sont tellement faibles qu'avec cette échelle, il n'est pas possible de distinguer les variations des valeurs. La Figure IV-71 représente donc les mêmes données mais avec une échelle plus adaptée.

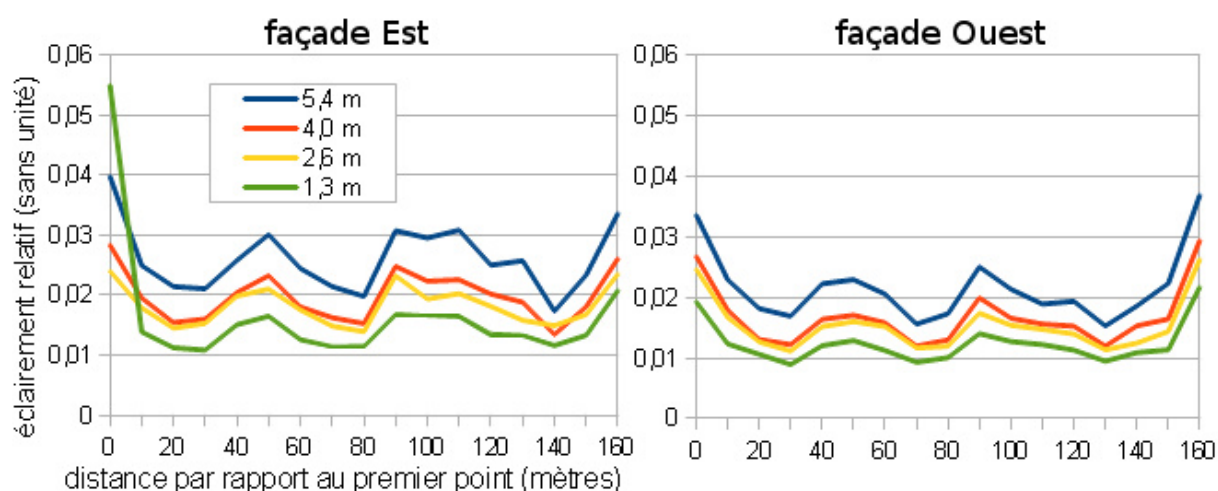


Figure IV-71 : Idem que la Figure IV-70 mais avec une échelle plus adaptée

Le premier fait remarquable est que les valeurs sur les deux façades ont le même ordre de grandeur et que l'allure des courbes est très semblable. Cela est dû au fait que durant les mesures, le soleil direct n'a quasiment jamais atteint la façade Ouest exposée au soleil du matin. L'ordre des sondes est une fois de plus respecté. Nous avons vu que la contribution du sol ou la présence de véhicules pouvait modifier cet ordre. Mais dans une rue aussi étroite ($H/W=3$), le sol ou les voitures garées reçoivent peu d'éclairage, ils ne peuvent pas contribuer à augmenter par réflexion les éclaircements sur les façades. Les éclaircements relatifs sont compris entre 0,01 et 0,05, des valeurs globalement plus faibles que celles obtenues pour le premier niveau de la maquette $H/W=2$ avec les façades noires, entre 0,03 et 0,08. Les éclaircements mesurés dans cette rue sont donc moins élevés alors que le facteur de réflexion moyen des façades est de 60%. Néanmoins, le rapport d'aspect de cette rue

(H/W=3) est plus élevé que le maximum utilisé sur la maquette (H/W=2). La réduction des éclairements relatifs observée ici, particulièrement au fond du canyon, est bien cohérente avec l'augmentation du rapport d'aspect du canyon

IV.3.1.6. Corrélation avec les mesures sur la maquette

Nous proposons dans cette section de déterminer si les éclairements relatifs mesurés dans les rues et sur la maquette, peuvent être corrélés. Dans ce but, nous avons calculé l'écart entre les éclairements relatifs mesurés dans les rues et les éclairements relatifs mesurés sur la maquette.

Pour chaque série de mesures effectuée dans la rue, la configuration de la maquette donnant l'écart le plus faible entre les éclairements relatifs a été retenue. Pour les mesures sur site, nous avons utilisé le point de mesure le plus haut, situé à 5 m. Concernant la maquette, les mesures de la deuxième sonde en partant du sol ont été utilisées afin d'effectuer les comparaisons pour des hauteurs correspondantes. Le tableau de la Figure IV-72 présente la fréquence à laquelle chaque configuration de la maquette conduit à l'éclairage relatif le plus proche de celui mesuré dans la rue. Dans ce tableau, nous avons distingué le côté ensoleillé et le côté à l'ombre de chaque rue. Pour que la comparaison soit valable, la sonde de la maquette doit en effet se trouver sur la bonne façade (Est ou Ouest). Les comparaisons sont effectuées pour les mêmes types de ciel CIE que ceux calculés pour chaque série de mesures sur site. De plus, le soleil se trouve dans la même zone du ciel : dans un intervalle de $\pm 5^\circ$ en azimut et en hauteur angulaire. Enfin, seules les comparaisons pour les rues orientées nord/sud sont présentées, car il s'agit de l'unique orientation qui a été utilisée sur la maquette.

| rapport d'aspect revêtement | | configuration de la maquette | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|------------------------------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|
| | | H/W = 0,5 | | | | H/W = 1 | | | | H/W = 2 | | | |
| | | N | B | C | CV | N | B | C | CV | N | B | C | CV |
| Charmettes sud H/W = 1,2 | ombre | 10% | | - | 10% | 10% | - | 10% | - | - | - | 20% | 40% |
| | soleil | - | 10% | 10% | 10% | - | - | 10% | 20% | 20% | 10% | - | 10% |
| Charmettes nord H/W = 1,2 | ombre | 22% | - | - | 11% | - | - | 11% | 44% | - | - | - | 11% |
| | soleil | - | - | 11% | 11% | - | 11% | 22% | 22% | - | 22% | - | - |
| Molière H/W = 1,4 | ombre | 12% | - | 12% | 12% | 6% | 6% | 24% | 6% | - | - | 6% | 18% |
| | soleil | - | - | - | - | 24% | 12% | 41% | 6% | 12% | - | - | 6% |
| Royale H/W = 3 | ombre | - | - | - | - | 6% | - | - | - | 94% | - | - | - |
| | soleil | - | - | 6% | 6% | 6% | - | - | - | 82% | - | - | - |

Figure IV-72 : Fréquences à laquelle chaque configuration de la maquette est la plus représentative des mesures sur site

La partie nord de la rue des Charmettes permet d'obtenir le résultat le plus satisfaisant, notamment à l'ombre : la maquette H/W=1 avec le revêtement crépi+verre produit l'écart le plus faible. Cette configuration est effectivement la plus proche de celle de la rue concernant le rapport d'aspect et le revêtement des façades. La plupart des types de ciel déterminés lors des mesures effectuées dans cette rue concernent des ciels couverts : les deux tiers sont des types CIE 1 et 4. Ce n'est pas le cas pour les autres rues, dont les résultats sont moins bons, et dont la quasi-totalité des ciels représentés sont sans nuages

(types CIE 11 à 13). Cela indique qu'effectuer des mesures sous des conditions de ciels couverts pourrait produire une meilleure corrélation. Nous avons vu dans la première partie de cette thèse que les ciels couverts étaient préférés pour les simulations car ils sont plus simples à modéliser. Les mesures sur le terrain semblent indiquer qu'ils sont aussi préférables pour conduire des comparaisons entre différentes configurations.

Dans le cas de la rue Royale, les éclairements relatifs mesurés dans les rues sont sous-estimés par rapport à ceux de la maquette. Cette conclusion provient du fait que la quasi-totalité des situations correspondantes sur la maquette ont un revêtement noir avec $H/W=2$. Toutefois, cela peut provenir du fait que le rapport d'aspect de cette rue est supérieur à 2 et que les niveaux d'éclairément relatif sont plus faibles. La BDD de la maquette ne disposant pas de rapport d'aspect supérieur à 2, les valeurs les plus faibles correspondent donc à la situation avec l'accès à la lumière naturelle le plus restreint.

L'hétérogénéité des revêtements au sein des rues ainsi que la variation des conditions de ciel rendent difficiles les comparaisons entre les éclairements relatifs mesurés sur site et sur la maquette. Malgré le contrôle sur le type de ciel, le côté de la façade considéré et les positions du soleil, les corrélations ne sont acceptables que pour une rue peu étroite et pour des ciels couverts : partie nord de la rue des Charmettes. Il est donc difficile d'obtenir une bonne cohérence entre des mesures dans les rues et sur la maquette. Ainsi, il semble d'autant moins aisé d'obtenir de bonnes corrélations entre des valeurs modélisées et des valeurs mesurées, ce qui sera observé dans les sections suivantes.

IV.3.2. Cartes des luminances des façades

Les cartes de luminances ont été générées à partir de plusieurs photographies comme cela a été décrit dans la section III.1.3. Par rapport aux mesures ponctuelles d'éclairément utilisées jusqu'ici, les cartes de luminances ont l'avantage de mettre en évidence la distribution spatiale de la luminosité de la façade.

La Figure IV-73 présente des cartes de luminances produites à partir de photographies prises dans quatre des rues précédemment étudiées. L'échelle de couleurs est la même que celle de la Figure III-26 (page 176). L'image A (en haut à gauche) a été générée à partir de photos prises dans la rue des Charmettes avec un rapport d'aspect de 1,2 et des bâtiments d'une hauteur moyenne de 16 mètres. On peut voir que le ciel est davantage visible que sur les autres images, sa luminance ayant dépassé la gamme mesurable grâce à la série d'images prises par l'appareil, il correspond à la zone de l'image dont les pixels sont blancs. Les luminances de certaines carrosseries de voitures garées dans la rue, se trouvent aussi dans la gamme qui a conduit à saturer le système. Cela montre bien que l'influence de ces dernières peut être non négligeable sur les éclairements de la façade. Relativement à l'échelle de couleurs, on remarque que les valeurs de luminance sont élevées et que la contribution du sol rivalise avec celle de la façade d'en face. Cela n'est pas le cas sur l'image B (en haut à droite) qui au contraire montre un sol beaucoup moins lumineux que la façade. Cela est la conséquence d'un rapport d'aspect élevé ($H/W=3$) réduisant la pénétration de la lumière dans le canyon. Cette image est intéressante car elle permet d'observer l'inégale répartition des luminances sur la façade. En effet, cette rue est orientée

nord/sud et les photos ont été prises durant la matinée, le soleil éclaire ainsi une partie de la façade d'en face qui se trouve du côté ouest. On peut ainsi constater une bande blanche qui délimite la projection des toits et cheminées des bâtiments de la façade opposée. Il est clairement visible que l'écart entre les niveaux d'éclairage de la façade, d'un étage à l'autre est important, et que la disponibilité de la lumière naturelle dans les appartements sera donc bien différente.

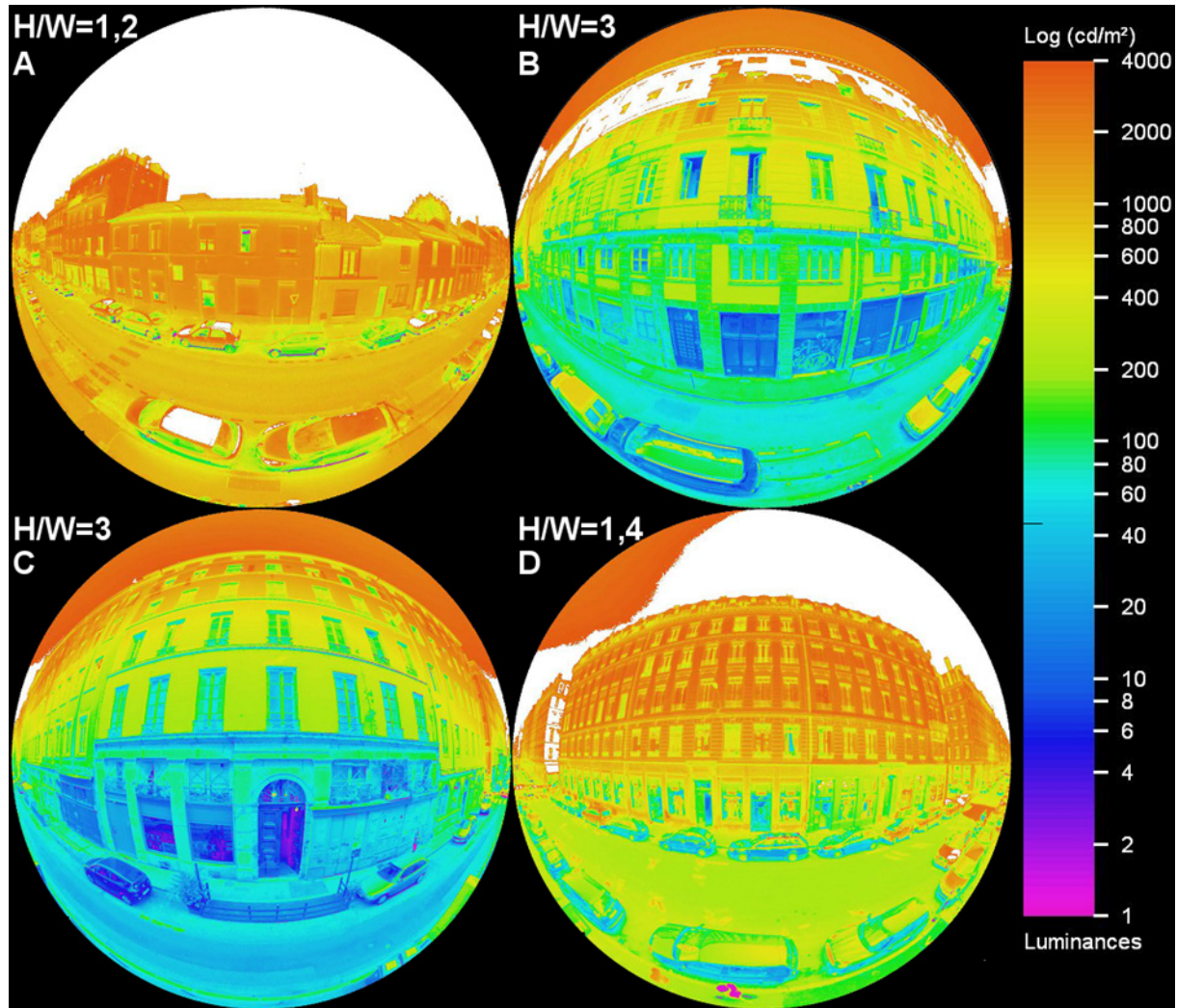


Figure IV-73 : Différentes cartes de luminances : rue des Charmettes (A), rue Royale (B et C) et rue Molière (D)

L'image C (en bas à gauche) montre bien que les fenêtres réfléchissent moins la lumière que le reste de la façade. En effet, lorsqu'il n'y a pas de rideaux (la plupart du temps les rideaux sont blancs) la lumière s'engouffre dans la pièce entraînant une luminance mesurée plus faible que sur le reste de la façade. Cela est particulièrement visible sur la fenêtre située au centre de l'image B, laquelle est à moitié ouverte. L'image C permet aussi d'apprécier la gradation des luminances sur la hauteur de la façade. Les valeurs les plus faibles sont ainsi constatées auprès du sol et les valeurs maximales en haut du bâtiment. Celui-ci se trouvant dos au soleil, on ne remarque pas la projection des toits des bâtiments d'en face. Enfin, l'image D (en bas à droite) a été prise dans une rue avec un rapport d'aspect de 1,4 et des

bâtiments haut d'environ 20 mètres. Cette rue étant plus large, la contribution du sol peut à nouveau représenter une source lumineuse non négligeable pour les bas étages. Cette image met en évidence la différence entre le rez-de-chaussée et le reste du bâtiment en ce qui concerne le comportement par rapport à la lumière. Ce niveau est généralement occupé par des commerces proposant leurs biens à travers de larges vitrines. Le revêtement de ce niveau s'apparente à de grandes fenêtres absorbant la lumière. L'espace entre les vitrines est la plupart du temps occupé par les parties restantes des murs porteurs dans un matériau brut de couleur grise rarement recouvert d'enduit.

IV.3.3. Calcul des éclairements à partir des cartes de luminances

Les cartes de luminances peuvent être utilisées pour obtenir la répartition des éclairements à la surface des façades. Elles pourraient donc permettre de valider les résultats obtenus à partir des logiciels de simulation qui pour certains, calculent l'éclairément en tout point d'une géométrie. Les éclairements mesurés dans chacune des rues peuvent être utilisés pour valider le passage de la carte de luminances à la carte des éclairements.

Dans cette section, les éclairements relatifs obtenus à partir des cartes de luminances sont comparés aux éclairements relatifs mesurés par les sondes photométriques LI-COR. Les éclairements sont calculés à partir des cartes de luminances en utilisant la loi de Lambert, ce qui suppose que la façade a un comportement de réflexion parfaitement diffuse (cf. section III.1.7.3). Tout d'abord, des exemples sont présentés : deux cas pour lesquels la corrélation entre les deux méthodes de mesure est forte, deux cas pour lesquels elle est faible. Les conditions pour lesquelles les cartes de luminances permettent de donner des valeurs exploitables seront ensuite définies. Les coefficients de corrélation pour l'ensemble des cas qui remplissent ces conditions seront alors présentés.

Sur les cartes de luminances présentées dans cette section, les deux traits noirs horizontaux et le trait vertical sont le résultat du prétraitement décrit dans la section III.1.7. L'intersection entre les deux traits horizontaux et le trait vertical représentent le centre de l'image et le bas de la façade. Ces limites permettent de calculer la position des pixels sur l'image correspondant à la position des sondes LI-COR dans la réalité. Les sondes sont représentées par des points noirs sur les cartes de luminances et par des croix rouges sur les photos des façades.

IV.3.3.1. Exemples de bonnes corrélations avec les sondes

Les cas suivants ont été choisis parmi ceux qui donnent des valeurs proches entre les deux méthodes de mesure pour toutes les rues confondues. Le premier exemple concerne la série de quatre mesures d'éclairément effectuées dans la partie sud de la rue des Charmettes, à 40 mètres de la série de référence. Les éclairements lumineux mesurés par les sondes LI-COR et ceux dérivés de la carte de luminances sont donnés dans le Tableau IV-2. Rappelons que pour obtenir les éclairements lumineux à partir des luminances, nous utilisons la méthode décrite dans la section III.1.7.3, qui nécessite de connaître le facteur de réflexion lumineux, lequel est de 29% pour ce premier exemple. Rappelons aussi que les luminances produites

par PHOTOLUX sont multipliées par 0,94 suite à l'étalonnage de l'appareil photo utilisé, et que les éclairagements sont calculés à partir des luminances d'après la méthode présentée dans la section III.1.7.1.

| hauteur de la sonde | luminances (photo) | éclairagements (photo) | éclairagements (LI-COR) | écart relatif |
|---------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 5,4 m | 603 cd/m ² | 6149 lux | 5560 lux | +11 % |
| 4,0 m | 603 cd/m ² | 6149 lux | 4715 lux | +30 % |
| 2,6 m | 451 cd/m ² | 4599 lux | 4310 lux | +7 % |
| 1,3 m | 313 cd/m ² | 3192 lux | 3515 lux | -9 % |

Tableau IV-2 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-74

La carte de luminances correspondante est présentée sur la Figure IV-74 : la partie de la façade sur laquelle se trouvent les sondes se situe entre une porte et une grande fenêtre. Le facteur de réflexion lumineux qui a pu être mesuré pour cette façade et qui a été utilisé pour la conversion des luminances en éclairagement, correspond bien au matériau photographié. De plus, les valeurs obtenues correspondent bien à une partie de la façade qui est représentative du reste, ce type de cas s'inscrit donc totalement dans la démarche de notre étude visant à utiliser la carte de luminances pour obtenir les valeurs d'éclairagement relatif sur toute la façade.

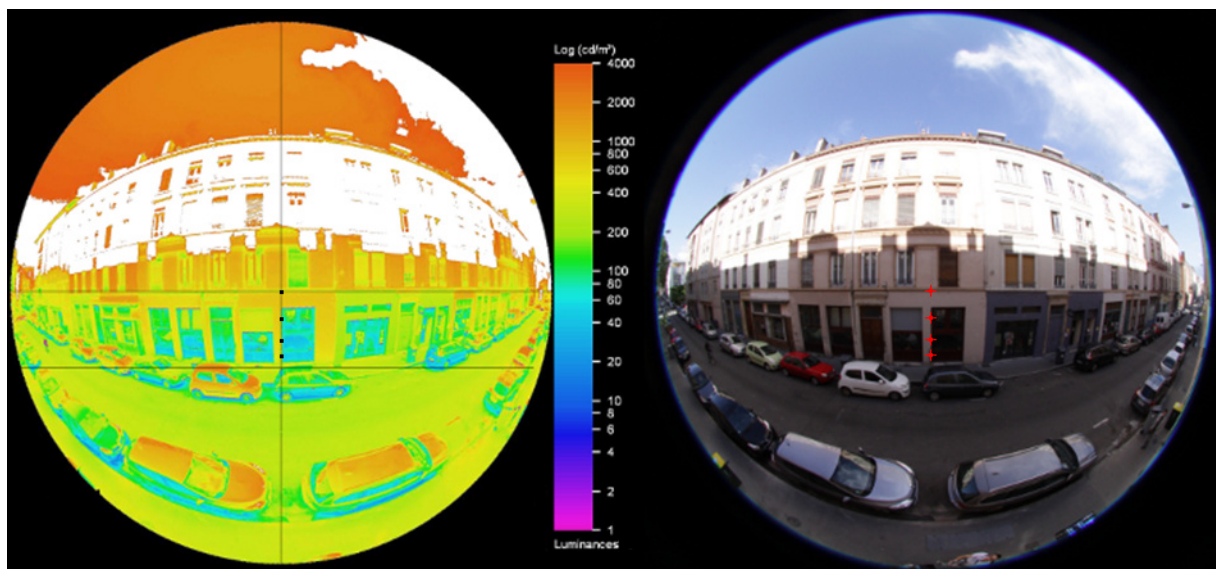


Figure IV-74 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 40 m dans la partie sud de la rue des Charmettes

L'étude des éclairagements lumineux obtenus à partir des cartes de luminances montre un écart d'environ $\pm 10\%$ par rapport à ceux mesurés par les sondes LI-COR, sauf pour la sonde située à 4 mètres. Cela provient de la rotation de l'image fisheye. Nous pouvons voir que l'axe vertical tracé en noir sur la photo de gauche n'est pas parfaitement aligné avec le bord de la porte située à droite de la position des sondes. De ce fait, la position théorique de la sonde est légèrement décalée par rapport à la réalité et se trouve devant la porte sur l'image. À quelques pixels près, la luminance varie fortement, ce qui explique un écart élevé qui n'aurait pas été constaté autrement. Cela montre à quel point la marge d'erreur sur le terrain

est faible, d'où la nécessité de disposer d'un mât à la fois léger, rigide et réglable. Même avec un post-traitement des images, des erreurs peuvent être constatées.

Un autre exemple donnant des écarts peu élevés entre les deux méthodes est présenté sur la Figure IV-75. Il s'agit de la série de mesures située à 50 m de la série de référence dans la partie nord de la rue des Charmettes.

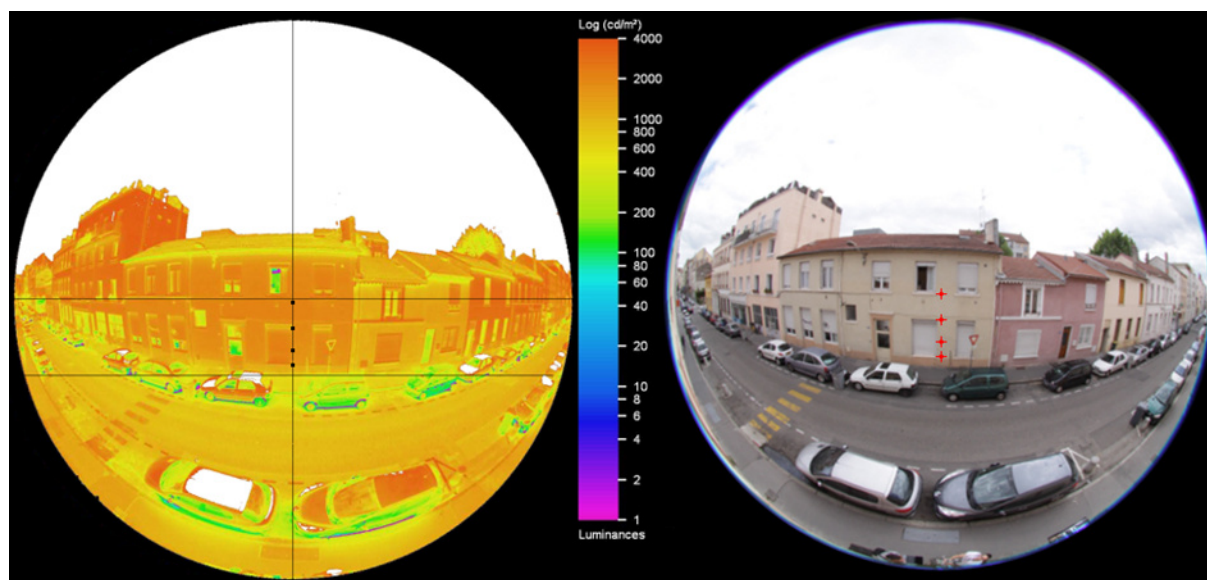


Figure IV-75 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 50 m dans la partie nord de la rue des Charmettes

Les éclairagements lumineux obtenus sont donnés dans le Tableau IV-3. Les pixels correspondant aux positions des sondes se trouvent tous les quatre sur une partie de la façade qui correspond au même revêtement que le reste de la façade, comme pour le cas précédent. De même, le facteur de réflexion lumineux qui a été mesuré correspond bien au matériau sur la photo, sa valeur est de 53%.

| hauteur de la sonde | luminances (photo) | éclairagements (photo) | éclairagements (LI-COR) | écart relatif |
|---------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 5,4 m | 1932 cd/m ² | 10758 lux | 10735 lux | +0.2 % |
| 4,0 m | 1932 cd/m ² | 10758 lux | 9395 lux | +15 % |
| 2,6 m | 1671 cd/m ² | 9305 lux | 9240 lux | +0.7 % |
| 1,3 m | 1671 cd/m ² | 9305 lux | 7675 lux | +21 % |

Tableau IV-3 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-75

À 5,4 m et 2,6 m, l'écart relatif entre les éclairagements lumineux dérivés de la carte de luminances et ceux des sondes, est inférieur à 1%. Pour les deux autres sondes cet écart est de 15% et 21%. Cette différence s'explique en regardant la carte de luminances. En effet, les pixels représentant ces sondes sont plus foncés, car la ligne verticale sur laquelle sont alignées les sondes se trouve à cheval entre un volet fermé et le mur. Une fois de plus, à quelques pixels près, l'écart d'éclairagement est important.

Même dans des conditions assez idéales, il est difficile d'obtenir, à partir des cartes de luminances, des éclairagements lumineux proches de ceux mesurés avec les sondes. Cela ne provient pas de l'hypothèse de représenter les enduit des façades comme des matériaux dont la diffusion suit la loi de Lambert, car il est possible d'obtenir, dans des conditions favorables, des éclairagements lumineux proches de la réalité. La difficulté est de disposer, pour chaque point de mesure, du facteur de réflexion lumineux de la façade à l'endroit même où se situent les sondes. Nous allons montrer, dans la section suivante, des situations pour lesquelles ce type de problème produit des écarts beaucoup plus importants.

IV.3.3.2. Exemples de mauvaises corrélations avec les sondes

Les exemples suivants ont été choisis parmi les séries de mesure qui donnent des écarts très élevés entre les valeurs mesurées par les sondes et celles obtenues à partir des cartes de luminances. Le premier cas étudié concerne la série de mesures situées à 70 m de la série de référence, dans la partie sud de la rue des Charmettes. Les valeurs d'éclairagement obtenues à partir des deux méthodes sont données dans le Tableau IV-4.

| hauteur de la sonde | luminances (photo) | éclairagements (photo) | éclairagements (LI-COR) | écart relatif |
|---------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 5,4 m | 1671 cd/m ² | 6619 lux | 8330 lux | -21 % |
| 4,0 m | 252 cd/m ² | 998 lux | 6910 lux | -86 % |
| 2,6 m | 51 cd/m ² | 202 lux | 6065 lux | -97 % |
| 1,3 m | 175 cd/m ² | 693 lux | 5195 lux | -87 % |

Tableau IV-4 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-76

Sauf pour la sonde située à 5 m qui donne un écart de -21%, les éclairagements lumineux dérivés à partir des photos sont fortement sous-estimés. Il n'y a pas de tendance remarquable concernant la valeur des écarts et la position des sondes. La Figure IV-76 permet d'en déterminer les raisons. La carte de luminances montre que les luminances au niveau des positions des sondes peuvent être plus de 100 fois plus faibles que celles du reste de la façade. En effet, on remarque une zone de couleur bleu ciel qui correspond à des luminances de l'ordre de 20 cd/m² alors qu'à partir du premier étage la couleur orange témoigne de valeurs de l'ordre de 2000 cd/m². La photo de droite montre qu'une vitrine se trouve en réalité derrière les sondes, ce qui pose problème. En effet, la vitrine se comporte comme une fenêtre, qui a un comportement particulier comme nous l'avons vu dans la section III.2.1.4. En fonction de l'angle d'incidence de la source lumineuse considérée, la lumière peut être réfléchiée ou absorbée. C'est le deuxième cas qui nous intéresse ici, car la réflexion spéculaire se produit pour des angles d'incidence élevés, ce qui n'est pas le cas dans cette configuration. En revanche, la vitrine absorbe la lumière bien plus que le reste du revêtement de la façade. Cela correspond à un facteur de réflexion lumineux très faible, alors que celui mesuré sur la façade est de 74%. C'est la raison pour laquelle la luminance mesurée est plus faible. Par exemple, pour la sonde située à 4 m, la luminance est de 252 cd/m², ce qui produit un éclairagement lumineux de 998 lux en utilisant l'équation décrite dans la section III.1.7.3. Avec un facteur de réflexion lumineux plus adapté de 1%, par exemple, au lieu de 74%, l'écart relatif passe de -86% à +7% avec un éclairagement lumineux de 7363 lux. Cela montre une fois de plus la nécessité de disposer d'un facteur de réflexion correspondant exactement au revêtement de la façade situé juste derrière les sondes.

L'hypothèse d'une surface diffusant selon la loi de Lambert ne semble même pas être gênante malgré la présence d'une surface vitrée, tant que l'appareil photo ne reçoit pas de reflet provenant de cette surface. Quoiqu'il en soit, les mesures du facteur de réflexion lumineux ont été effectuées à hauteur d'homme, la valeur mesurée correspond au matériau gris clair du rez-de-chaussée alors que le reste de la façade est revêtu d'un enduit jaune dont le facteur de réflexion lumineux est certainement plus faible. De ce fait, les mesures effectuées ne sont pas représentatives de toute la façade. L'utilisation de la valeur mesurée dans des simulations pourra donc mener à une surestimation de l'éclairement lumineux dans le canyon. En disposant d'une carte des facteurs de réflexion lumineux, il serait possible d'obtenir des résultats plus pertinents.

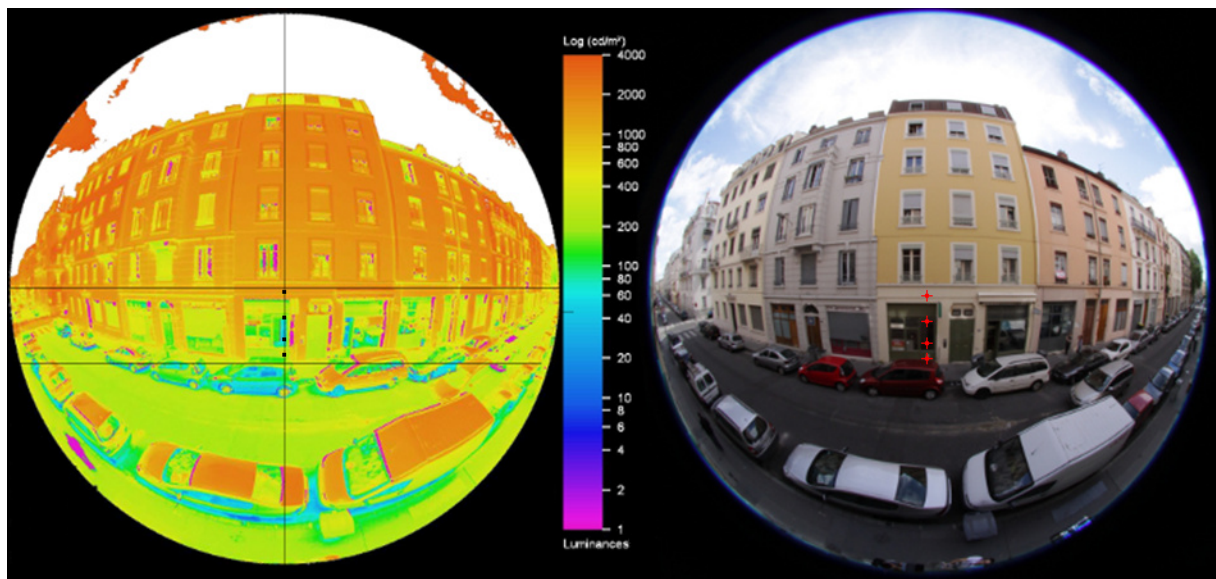


Figure IV-76 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 70 m dans la partie sud de la rue des Charmettes

Un second exemple est présenté, il s'agit de la série de mesures située à 10 m de la série de référence dans la rue Molière. La carte de luminances et l'une des photos utilisées pour la générer sont visibles sur la Figure IV-77, les luminances et éclairements lumineux pour cette série de mesures sont donnés dans le Tableau IV-5.

| hauteur de la sonde | luminances (photo) | éclairements (photo) | éclairements (LI-COR) | écart relatif |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| 5,4 m | 313 cd/m ² | 3091 lux | 6900 lux | -55 % |
| 4,0 m | 485 cd/m ² | 4789 lux | 14555 lux | -67 % |
| 2,6 m | 21 cd/m ² | 207 lux | 5050 lux | -96 % |
| 1,3 m | 252 cd/m ² | 2488 lux | 4175 lux | -40 % |

Tableau IV-5 : Luminances et éclairements lumineux correspondants à la Figure IV-77

Comme pour l'exemple précédent, une vitrine se trouve derrière les sondes. Cela se remarque par la couleur bleu sur la carte de luminances qui indique des luminances très faibles par rapport au reste de la façade. La sonde située à 2,6 m se trouve juste devant cette vitrine, l'éclairement lumineux obtenu est donc très faible (207 lux) par rapport à celui mesuré par la sonde correspondante (5050 lux). La sonde LI-COR située à 4 m donne un

éclairage lumineux très élevé par rapport aux autres sondes et à la valeur obtenue à partir de la carte de luminances. La sonde a vraisemblablement été exposée à un reflet provenant d'une fenêtre de la façade opposée, au moment de la mesure. En effet, nous pouvons voir de nombreuses zones plus lumineuses au niveau de la route sur la photo de droite de la Figure IV-77. De telles zones peuvent être observées sur la façade à des hauteurs susceptibles d'impacter les sondes, notamment juste à gauche de la position de la sonde en question qui produit un éclairage de 14555 lux. Ce reflet est probablement à l'origine de cette valeur élevée, même s'il ne se trouve pas au même endroit. Rappelons que le mât sur lequel se trouvent les sondes n'est pas totalement collé au mur. En étant légèrement éloigné du mur, cela positionne la sonde dans le faisceau de ce reflet.

L'étude d'autres photographies donnant des écarts importants a révélé d'autres problèmes, liés à l'environnement, pouvant perturber les mesures. Ainsi, sur deux séries de mesures des piétons ont été photographiés sur une ou deux des cinq images qui ont été utilisées pour générer les cartes de luminances. Leur passage n'ayant pas été remarqué au moment de la mesure, cette dernière n'a pas été refaite.

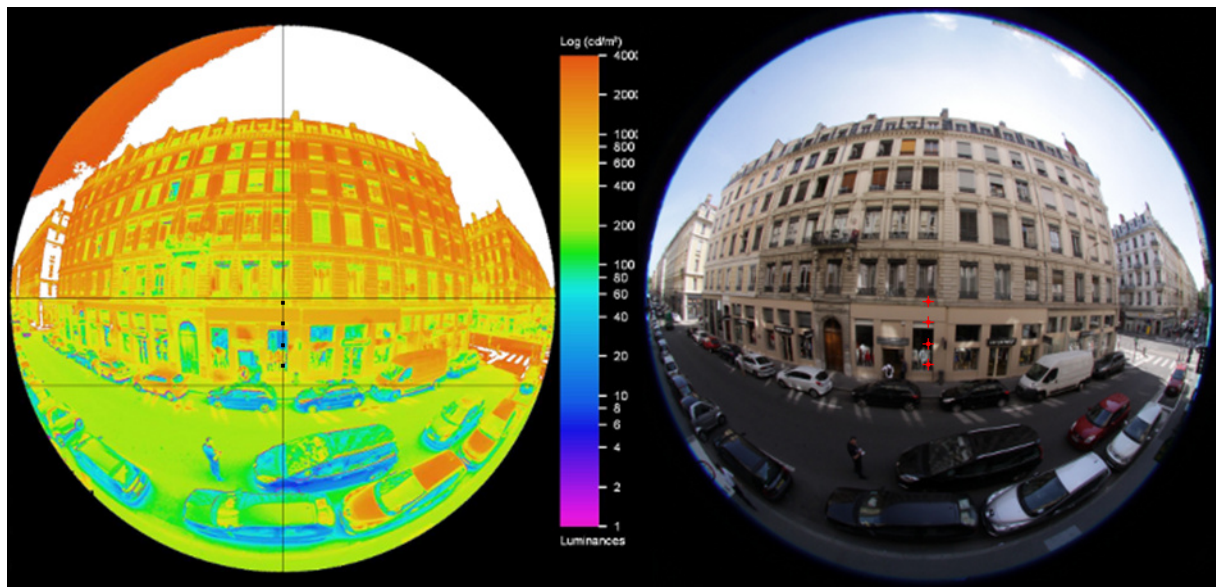


Figure IV-77 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 10 m dans la rue Molière

Nous pouvons remarquer enfin que le revêtement de la façade du bâtiment visible sur la Figure IV-77 est très hétérogène. Ce dernier est différent entre le rez-de-chaussée, le premier étage, les étages 2 à 4 et le dernier étage. Dans ces conditions, l'utilisation d'un facteur de réflexion lumineux pour l'ensemble de la façade représente une hypothèse délicate.

IV.3.3.3. Restrictions à l'utilisation des cartes de luminances

Les exemples précédents ont permis de définir les conditions qui permettent d'obtenir les écarts les plus faibles entre les deux méthodes de mesures : l'une basée sur quelques

éclairagements, l'autre basée sur une carte de luminances transformée en carte d'éclairagements. Il existe deux points majeurs qui doivent être respectés.

Premièrement, les séries de mesures pour lesquels les sondes se trouvaient devant une vitrine ou une fenêtre ne peuvent pas être utilisées. Le comportement de ce type de surface par rapport à la lumière est trop différent du reste de la façade. Cela est difficile à obtenir sachant qu'une grande partie des rez-de-chaussée est occupée par des boutiques avec des vitrines omniprésentes.

Deuxièmement, il ne suffit pas d'avoir un revêtement opaque pour que les écarts soient faibles, en effet, il est important que le facteur de réflexion qui a été mesuré pour cette façade corresponde au matériau se trouvant derrière les sondes au moment de la mesure. Dans le cas contraire, lors de la conversion des luminances vers des éclairagements lumineux, une erreur est commise. Selon l'équation (III-9) (page 179), plus ce facteur est grand, plus l'éclairagement calculé est faible et inversement.

IV.3.3.4. Comparaison des éclairagements relatifs provenant des deux méthodes

Dans chaque rue, les séries de mesures qui respectent les conditions décrites dans la section précédente ont été repérées manuellement. Ce repérage s'est effectué par contrôle visuel des cartes de luminances et des photos. Le Tableau IV-6 donne le pourcentage de séries de mesures conservées pour chacune des rues après élimination de celles qui n'ont pas été retenues. Les données de la rue Leynaud n'ont pas été utilisées car un décalage entre les positions du mât a été détecté durant l'analyse des données : les séries de mesures ne sont pas l'une en face de l'autre. Cela implique l'impossibilité de comparer les éclairagements lumineux mesurés avec les sondes photométriques et ceux dérivés des cartes de luminances.

| Nom de la rue | Taux d'acceptation |
|----------------------|---------------------------|
| Charmettes nord | 28 % |
| Charmettes sud | 20 % |
| Fénelon | 0 % |
| Molière | 21 % |
| Royale | 27 % |

Tableau IV-6 : Pourcentages de séries de mesures remplissant les critères de validation

Ce tableau montre que pour chaque rue, moins d'un tiers des séries de mesures permettent de valider la méthode avec un total de seulement 25 cartes de luminances sur les 153 qui ont été générées. Aucune des séries de mesures de la rue Fénelon n'a été conservée. Rappelons que le problème ne provient pas des cartes de luminances, mais de la disponibilité du bon facteur de réflexion lumineux. Parmi les rues dont les données ont été conservées, il n'y a pas de préférence vis-à-vis du côté ensoleillé ou à l'ombre. L'exclusion de cette grande quantité de séries de mesure montre que la présence de portes, vitrines et fenêtres au rez-de-chaussée est une caractéristique non négligeable d'une rue qui mérite d'être prise en compte dans la modélisation des canyons urbains.

Chaque série de mesure possède quatre points de mesure. Avec 25 séries restantes, cela fait 100 points de mesure disponibles pour vérifier la corrélation entre les éclairagements

mesurés par les sondes et ceux dérivés des cartes de luminances. Pour rendre compte de cette corrélation, les éclairagements relatifs ont été calculés pour chaque série. Cela a été fait en utilisant l'éclairement lumineux global horizontal de la station IDMP et les éclairagements lumineux obtenus avec chacune des deux méthodes. La station IDMP est située à moins de 7 km de la rue la plus éloignée, ce qui ne représente pas une grande distance d'un point de vue climatique. La corrélation entre les éclairagements relatifs obtenus est présentée sur la Figure IV-78. Le coefficient de Pearson correspondant à ce nuage de points est de 0,96, ce qui représente une corrélation linéaire forte, laquelle se constate visuellement par le fait que les points se situent à proximité de la droite d'équation $x = y$.

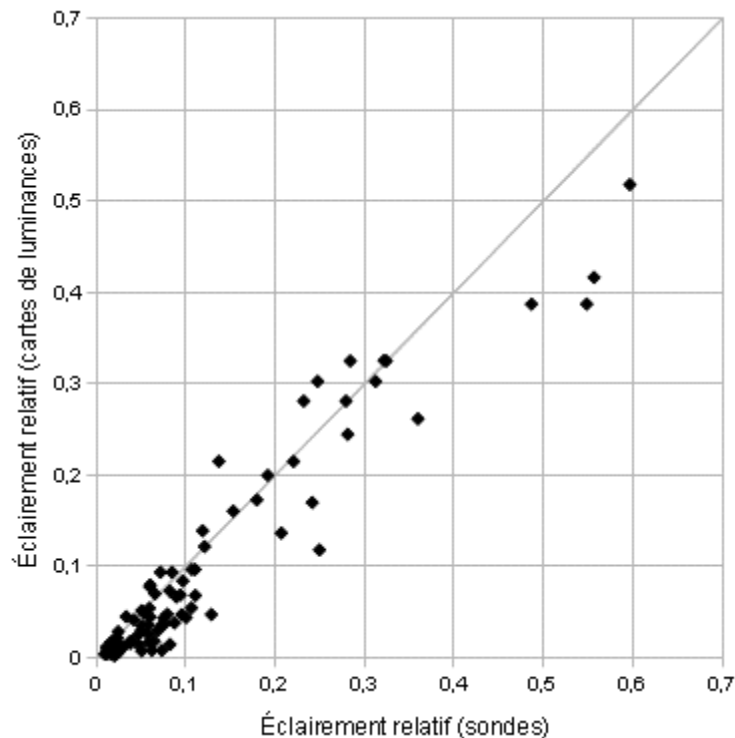


Figure IV-78 : Corrélation entre les éclairagements relatifs mesurés par les sondes photométriques et ceux obtenus à partir des cartes de luminances

IV.3.3.5. Conclusion

L'utilisation de cartes de luminances pour obtenir des valeurs d'éclairement lumineux dans un canyon urbain a été évaluée dans certaines rues de Lyon, en confrontant les valeurs obtenues avec celles provenant de sondes photométriques étalonnées. Cette technique représente un outil très pratique, car elle permet d'obtenir rapidement les valeurs d'éclairement lumineux pour toute la surface des façades de bâtiments dans une rue. Pour produire des résultats proches de la réalité, elle nécessite toutefois de connaître les facteurs de réflexion lumineux en tout point des façades du canyon. Si c'est bien le cas, nous avons démontré dans la section IV.3.3.3, que cette méthode était suffisamment précise.

Il faut donc pouvoir disposer des facteurs de réflexion lumineux sur la totalité des façades. Nous avons vu qu'une valeur unique était rarement représentative d'une façade, que ce soit à cause des différences de revêtement entre le rez-de-chaussée et les étages

supérieurs, ou à cause de la présence de parties vitrées (fenêtres, vitrines). Il semble donc nécessaire de développer une méthode de mesure à distance (depuis la façade opposée) des facteurs de réflexion lumineux d'une façade. Cela semble possible grâce à l'utilisation d'une surface de référence, de facteur de réflexion lumineux connu, suffisamment grande pour être visible sur une carte de luminances. En supposant que la façade située immédiatement à côté de cette surface de référence reçoit le même éclairage, le rapport entre la luminance de la façade et la luminance de la surface de référence correspond au rapport entre le facteur de réflexion de la façade et celui de la surface de référence. Il reste alors à trouver le moyen de positionner autant de surfaces de référence que de types de revêtement sur la façade. Cela peut être fait depuis les appartements pour les niveaux supérieurs.

IV.3.4. Comparaison cartes luminances et maquette pour la sonde au sol

Il est difficile de comparer les éclairages mesurés sur les façades de la maquette avec ceux obtenus à partir des cartes de luminances. Les mesures ont été effectuées seulement au niveau du rez-de-chaussée ou du premier étage des bâtiments, ce qui ne représente qu'une sonde sur la maquette. De plus les problèmes de revêtement énoncés précédemment rendent la comparaison délicate. Cependant, cela est possible pour les valeurs au sol. La maquette est en effet équipée d'une sonde au sol, au milieu du canyon et il est possible de calculer à partir des cartes de luminances, l'éclairage reçu au milieu de la rue en utilisant la même méthode que pour les façades. Pour cela, le facteur de réflexion lumineux de la chaussée est pris égal à 0,1. Il s'agit de la valeur moyenne d'un ensemble de quatre mesures effectuées dans plusieurs rues de Lyon.

Le Tableau IV-7 présente la valeur moyenne de l'éclairage relatif au sol calculé à partir des cartes de luminances pour chacune des rues étudiées. L'écart type et le nombre de valeurs utilisées sont donnés dans le tableau, ainsi que la configuration de maquette (rapport d'aspect et revêtement de façade) se rapprochant le plus des résultats des cartes de luminances. Les configurations prises en compte sont des situations sans soleil visible, aucune situation avec soleil visible n'ayant donné de valeur proche.

| Rue | Éclairage relatif moyen | Écart type | Nombre de valeurs utilisées | Configuration maquette la plus proche |
|-----------------|-------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Charmettes nord | 0,55 | 0,33 | 18 | H/W=1; crépi; CIE8 |
| Charmettes sud | 0,14 | 0,06 | 20 | H/W=2; verre; CIE13 |
| Fénelon | 0,10 | 0,01 | 18 | H/W=2; noir; CIE13 |
| Leynaud | 0,06 | 0,05 | 28 | H/W=2; noir; CIE1 |
| Molière | 0,09 | 0,02 | 32 | H/W=2; noir; CIE12 |
| Royale | 0,03 | 0,02 | 33 | H/W=2; noir; CIE1 |

Tableau IV-7 : Configurations de la maquette représentatives des éclairages relatifs mesurés sur site à partir des cartes de luminances

Ce tableau montre tout d'abord que la configuration la plus proche correspond toujours à un rapport d'aspect H/W=2 sauf pour la partie nord de la rue des Charmettes. Cela peut être

compris dans le cas des rues Royale et Leynaud dont les rapports d'aspect sont supérieurs à 2, cependant ce n'est pas le cas des autres rues dont la valeur est comprise entre 1,2 et 1,4 qui auraient dû, en théorie, se rapprocher des valeurs obtenues sur la maquette pour $H/W=1$.

Concernant la partie nord de la rue des Charmettes, il s'agit de la seule rue dont la route était ensoleillée durant les mesures, c'est la raison pour laquelle le rapport d'aspect $H/W=1$ donne une valeur plus proche que $H/W=2$. En effet, une rue plus large permet d'obtenir des niveaux d'éclairement lumineux supérieurs au sol. La partie nord de la rue des Charmettes est aussi celle pour laquelle l'écart type est maximal. Cela est dû au fait que les photos montrent que sur 3 des 18 valeurs disponibles, un passage piéton (blanc), une bande de goudron récente (plus foncée), se trouvent sur la zone utilisée pour calculer l'éclairement. De plus, plusieurs passages de voitures ont été constatés sur certaines des photos qui ont été utilisées pour établir les cartes de luminances.

En ce qui concerne le revêtement des façades des configurations les plus proches, à la seule exception de la rue des Charmettes, il s'agit toujours du revêtement noir. Ce qui correspond donc au revêtement donnant les plus faibles éclairagements relatifs au sol. Si l'on prend la maquette en référence, cela permet de constater que la méthode basée sur les cartes de luminances sous-estime l'éclairement reçu au sol. Ce qui correspond à la même conclusion que pour les valeurs d'éclairement des façades.

IV.3.5. Comparaison entre éclairagements relatifs modélisés et mesurés

Nous proposons dans cette section, de comparer les éclairagements lumineux obtenus à partir de simulations avec ceux mesurés sur site. Pour cela, nous utilisons le logiciel Daysim pour les raisons mentionnées dans la section III.1.8, les simulations ayant été préparées selon la méthode décrite dans la même section. Les éclairagements sont calculés au niveau des 4 sondes LI-COR, pour la moitié des séries de mesures de la rue Royale.

La Figure IV-79 montre la corrélation entre les éclairagements relatifs obtenus à partir des deux méthodes, pour les mêmes séries de mesures retenues que celles retenues dans la section IV.3.3.4. Cette figure montre que les éclairagements relatifs simulés sont majoritairement supérieurs à ceux mesurés : la corrélation est peu élevée. Le coefficient de corrélation de Pearson a cette fois une valeur de 0,5. Cela s'explique naturellement par l'écart entre la géométrie 3D utilisée, et le revêtement réel des façades, comme le montre la Figure IV-80. En effet, bien que le modèle soit de grande qualité, la géométrie ne contient pas d'informations concernant la présence des ouvertures (fenêtres, portes) ni du relief (balcons). De plus, la comparaison est faite sur quatre points de mesure par série, ce qui implique une marge d'erreur très faible concernant la géométrie. Pour résoudre ce problème, une comparaison à plus grande échelle peut être effectuée, c'est-à-dire sur toute une façade plutôt que sur quelques points précis.

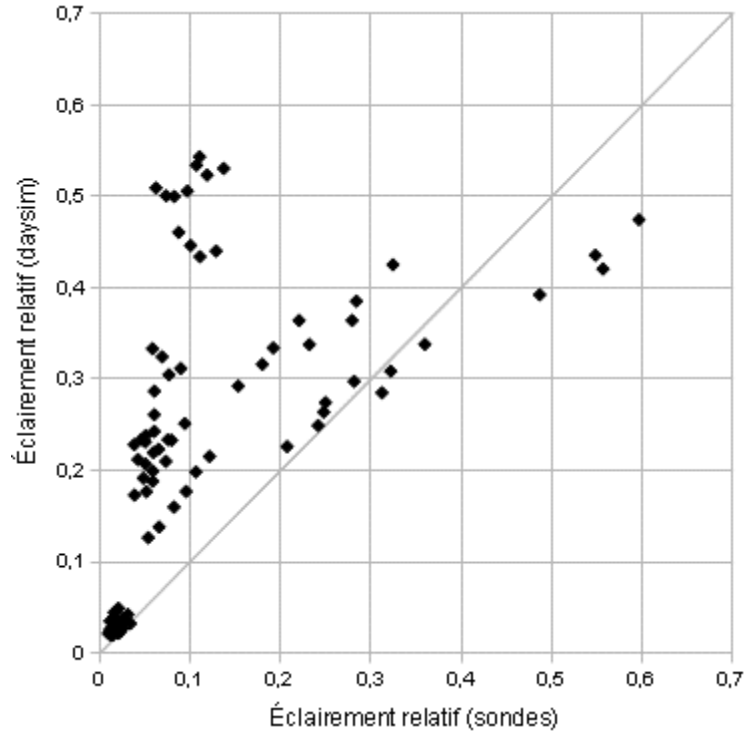


Figure IV-79 : Corrélation entre les éclairagements relatifs mesurés par les sondes photométriques et ceux modélisés par Daysim

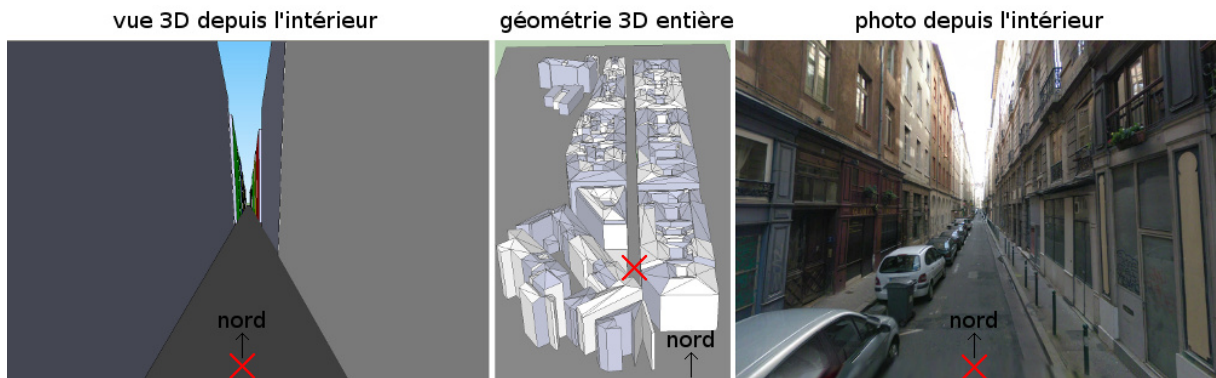


Figure IV-80 : Vues 3D et photographie de la rue Royale

Nous avons vu dans les sections précédentes que l'obtention de valeurs d'éclairage lumineux sur toute une façade, à partir d'une carte de luminances, était possible mais très sensible à la disponibilité du facteur de réflexion réel en différents points de cette façade. Le protocole de mesure utilisé dans cette thèse (cf. section III.1.7.2) ne permet d'en obtenir qu'une valeur unique, laquelle n'est pas obligatoirement représentative du reste de la façade (cf. section IV.3.3.2). Les cartes de luminances de Daysim n'ont *a priori* aucun intérêt pratique, car nous souhaitons générer des éclairagements lumineux. Par contre pour cette comparaison, il vaut mieux s'en tenir aux luminances car il est difficile de transformer la carte de luminances en carte d'éclairagements : il faudrait connaître les facteurs de réflexion réels de toute la façade. Il est donc, dans ce cas précis, plus simple de passer des

éclairagements lumineux de Daysim aux valeurs de luminances, puisque dans Daysim le facteur de réflexion utilisé est le même sur tous les pans de façade. Conserver la carte de luminances telle quelle, c'est conserver la complexité réelle et cela permet de montrer l'écart entre la simulation et le réel. Puisque Daysim ne permet d'obtenir des valeurs d'éclairagement lumineux que pour des points précis, nous avons calculé un maillage de points disposés à la surface des façades, à raison d'un point tous les mètres. La simulation a été effectuée pour une partie de la rue Royale longue de près de 100 mètres, avec des bâtiments d'une hauteur d'environ 25 mètres, soit 2500 points de mesure au total. Certains points ont été exclus pour l'analyse, car n'étant pas disposés immédiatement devant une façade, les bâtiments ayant des hauteurs légèrement différentes (cf. Figure IV-81).

Les éclairagements lumineux ainsi obtenus ont été convertis en luminances en utilisant l'équation (III-9) (cf. page 179). Des cartes de luminances ont été obtenues pour chacun des quatre types de façades du côté Est de la rue Royale, regroupées par leur facteur de réflexion lumineux, comme le montre la Figure IV-81. Pour ces simulations, les facteurs de réflexion des groupes de façades, tels que délimités dans la géométrie, ont été arrondis à la dizaine près, à partir des valeurs moyennes mesurées directement dans la rue pour chaque groupe. La Figure IV-81 montre le plaquage des quatre cartes de luminances obtenues, sur la géométrie dans le logiciel Sketchup. Les couleurs correspondent à l'échelle utilisée par PHOTOLUX.

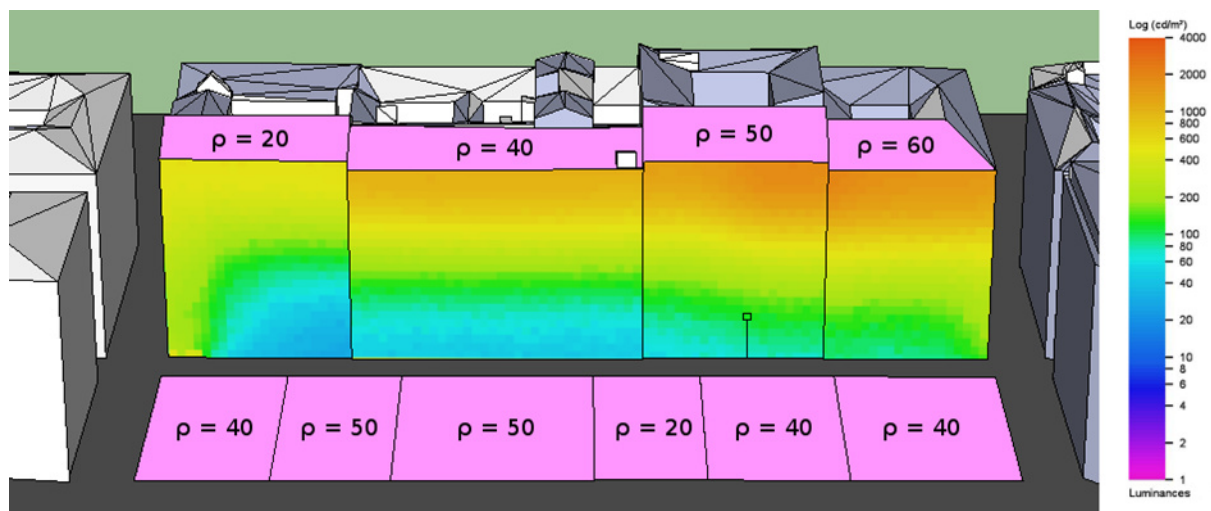


Figure IV-81 : Plaquage des luminances obtenues avec Daysim, sur la géométrie de la rue Royale

Les valeurs ρ des facteurs de réflexion lumineux sont indiquées dans les parties roses : les toits des façades concernées sur le côté Est, et sur l'empreinte au sol des bâtiments correspondant aux façades du côté Ouest. Pour des raisons pratiques, ces bâtiments ont été supprimés de la vue mais étaient bien présents dans la géométrie utilisée par Daysim pour effectuer les simulations. Sur l'une des façades, un petit carré noir représente la projection de l'appareil photo et du mât lors de la mesure située à 33 mètres du point de référence de la rue (qui représente la première série de mesure effectuée, le plus au sud, le plus à droite de l'image). En effet, ces cartes de luminances ont toutes été générées pour un instant donné, qui correspond au moment où cette série de mesures a été effectuée. Sur la Figure IV-81,

nous pouvons voir que les luminances augmentent avec la hauteur considérée sur la façade, ce qui est logique. L'influence des façades opposées est difficile à évaluer. Cependant l'influence du facteur de réflexion des façades concernées est bien visible. Pour un étage donné, les luminances sont plus élevées avec un facteur de réflexion élevé.

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus, j'ai réalisé un programme permettant de projeter la carte des luminances des quatre façades, de façon à produire une image comparable à celle obtenue à partir de l'objectif fisheye, en appliquant notamment le coefficient de correction de l'appareil photo (cf. section III.1.7.1). Le résultat est présenté sur la Figure IV-82. Une fois de plus, la simplicité du revêtement de la géométrie 3D produit un écart important entre les différentes zones de la façade. Cela s'observe notamment au niveau des ouvertures, mais aussi par rapport au revêtement du rez-de-chaussée. Ce revêtement produit une rupture avec la variation assez linéaire des luminances en fonction de la hauteur sur la façade.

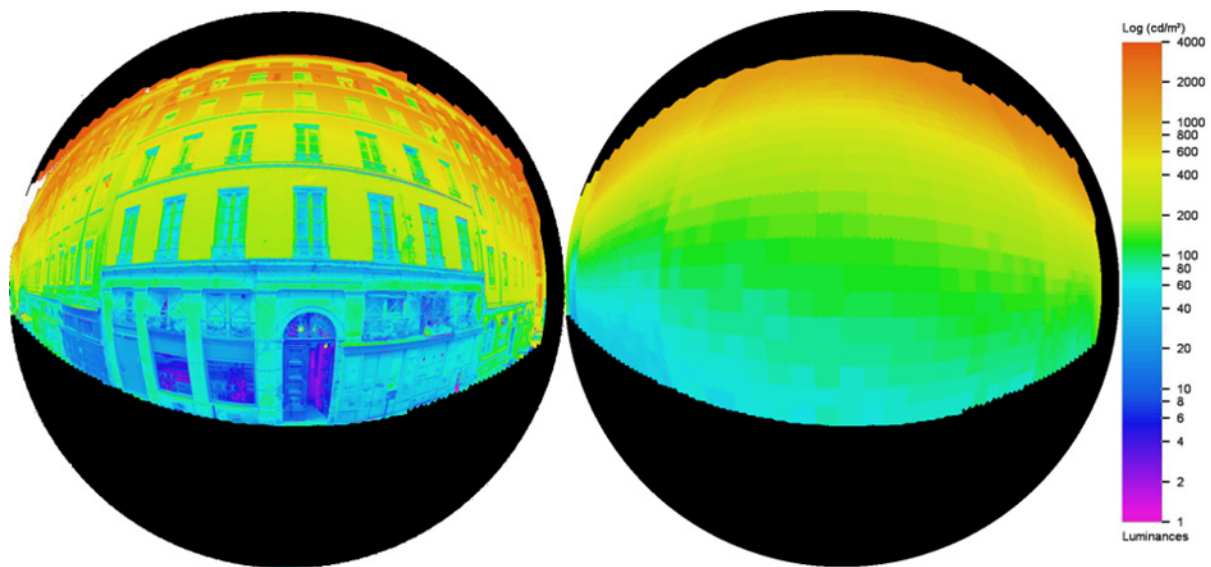


Figure IV-82 : Carte de luminances obtenue à partir des photos (à gauche), et des valeurs modélisées avec Daysim après projection (à droite)

Afin de pouvoir comparer quantitativement les luminances obtenues à partir des deux méthodes, une troisième image a été générée (cf. Figure IV-83). Cette image représente à l'aide d'une échelle de couleurs, l'écart relatif Δ entre les luminances simulées par Daysim et celles obtenues à partir des photographies. L'écart occasionné par les ouvertures est le plus important : des luminances de 3 à 5 fois plus élevées ont été simulées par rapport à celles mesurées. Cela provient du fait que les facteurs de réflexion lumineux de ces zones sont 3 à 5 fois plus faibles dans la réalité. Nous remarquons toutefois que pour le reste de la façade, l'écart relatif est globalement compris entre 0,5 et 1. Ce résultat indique que les luminances calculées à partir de Daysim sont plus faibles, cela peut venir du fait que les éclairagements lumineux calculés par Daysim sont plus faibles et/ou que le facteur de réflexion de cette zone de la façade est aussi trop faible comparé à la valeur réelle. Il faut aussi rappeler que les simulations ont été faites en utilisant le facteur de réflexion mesuré au niveau du rez-de-chaussée. S'il est plus faible que celui du reste de la façade, ce qui est souvent le cas, les luminances calculées à partir des éclairagements Daysim sont plus faibles.

Nous observons sur la Figure IV-83 que les luminances des façades les plus éloignées, à gauche et à droite de l'image, sont davantage sous-estimées.

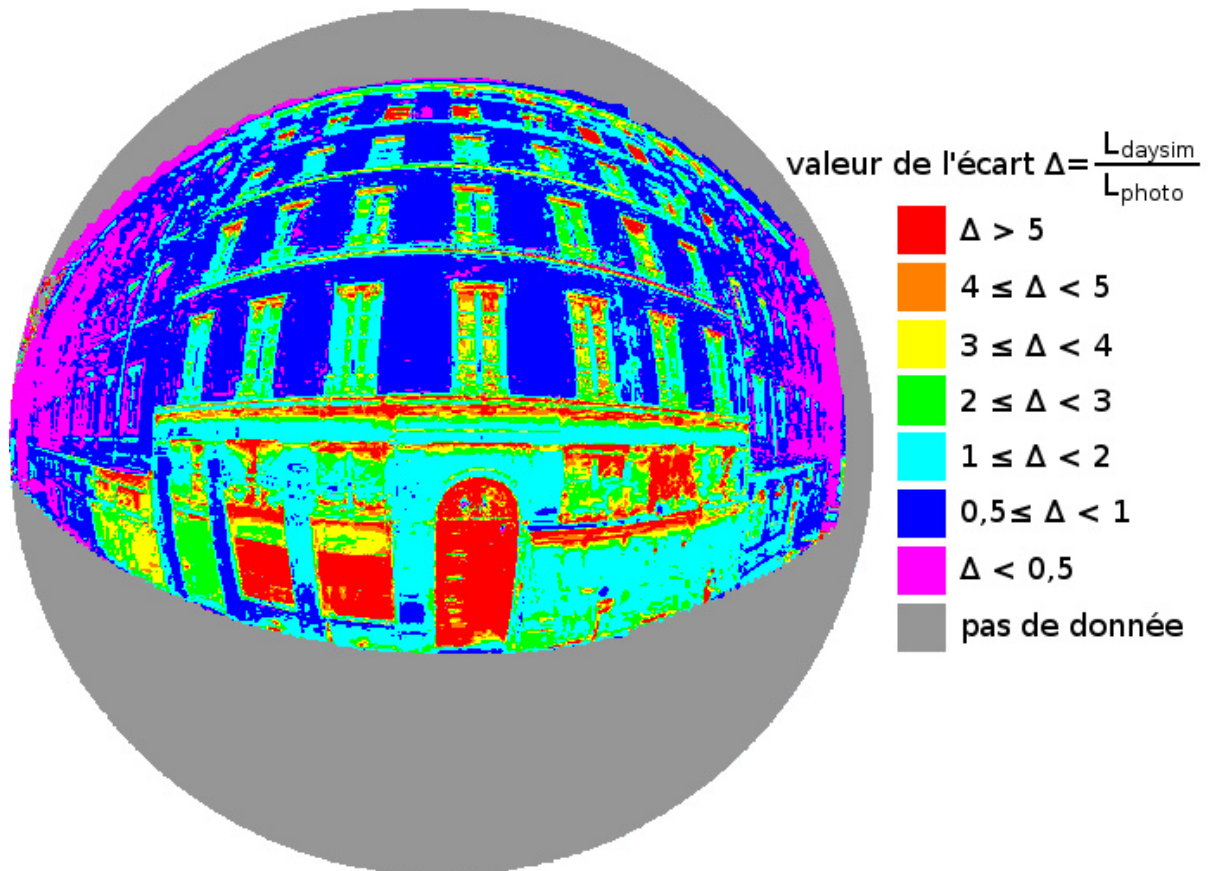


Figure IV-83 : Carte de l'écart relatif entre les luminances L_{daysim} obtenues depuis les éclairagements lumineux simulés par Daysim et celles mesurées à partir des photos (L_{photo})

Cette comparaison entre les luminances permet d'obtenir plus d'information sur la qualité des simulations par rapport à la simple comparaison de points de mesure. En effet, nous pouvons voir les paramètres qui posent problème aux logiciels de simulation. Sans surprise, l'absence d'information sur le revêtement, autre qu'une seule valeur de facteur de réflexion, mène à des écarts importants par rapport aux luminances mesurées sur site. Toutefois, la méthode reste prometteuse, une étape suivante consisterait à reproduire plus fidèlement le revêtement des façades afin d'évaluer plus justement les valeurs simulées.

Conclusion générale

Cette thèse se concentre sur l'estimation du rayonnement solaire et de la lumière naturelle disponibles sur les façades et le sol des canyons urbains. L'idée étant d'évaluer le potentiel offert par cette énergie gratuite. Nous avons donc étudié la variation de la lumière naturelle dans un canyon urbain en fonction de ses caractéristiques. Nous avons tout d'abord déterminé les paramètres qui ont une influence sur l'accès à la lumière naturelle dans un canyon. Nous avons ensuite étudié leur influence grâce à des mesures effectuées sous des conditions de ciel réelles, pendant une année sur un modèle réduit de canyon urbain et ponctuellement dans cinq rues de Lyon. Nous avons ainsi défini une méthode pour mesurer sur site la lumière naturelle disponible à l'intérieur d'un canyon urbain. Pour présenter les résultats et comparer les différentes configurations que nous avons testées, nous avons utilisé un indicateur reprenant le principe du facteur de lumière du jour : l'éclairement relatif, le rapport entre l'éclairement d'une surface à l'intérieur du canyon et l'éclairement global horizontal en l'absence de toute obstruction. Les résultats présentés tiennent compte des types de ciel définis par la CIE pour déterminer l'influence du climat local sur l'éclairement relatif au sol et sur les façades. Pour vérifier que les logiciels de simulation peuvent apporter des résultats proches de la réalité, nous en avons validé trois en utilisant la base de données de mesures ainsi obtenue. À cette occasion, nous avons évalué les sources de données qui peuvent être utilisées pour modéliser le canyon. Les méthodes et les logiciels d'évaluation de l'accès à la lumière naturelle en milieu urbain, utilisent différentes approximations aussi bien pour s'affranchir du manque de données disponibles que pour accélérer les calculs. Souvent, ils ne tiennent pas compte de paramètres importants tels que la complexité de la géométrie des façades, la diversité des revêtements ou la variabilité du climat.

Résultats des mesures

Le modèle réduit nous a permis dans un premier temps, d'évaluer l'accès à la lumière naturelle en fonction du type de ciel CIE, du rapport d'aspect et du type de revêtement, pour un canyon urbain orienté nord/sud.

Au sol, le rapport d'aspect a une influence plus grande que le facteur de réflexion du revêtement : une rue plus large permet la contribution d'une plus grande partie du ciel alors que l'apport des réflexions multiples provenant des façades reste faible quel que soit le rapport d'aspect. Il y a très peu de différences entre les revêtements : noir, crépi ou crépi vitré ; le revêtement blanc crée un écart mais son facteur de réflexion de 0.65 est peu représentatif de la réalité. Nous avons remarqué toutefois que sans soleil visible, plus le ciel est dégagé, plus l'éclairement relatif est faible, et plus l'écart entre les revêtements est faible. Compte tenu de l'influence manifeste de la distribution des luminances du ciel sur la distribution des luminances dans le canyon, le rapport d'aspect doit être choisi en fonction des caractéristiques du climat local (distribution des types de ciel). Nous avons constaté qu'avec $H/W=1$, les éclaircissements relatifs sont les plus élevés pour tous les revêtements, par rapport au revêtement noir, et pour tous les types de ciel. Ce rapport d'aspect est donc le plus adapté pour maximiser l'accès à la lumière naturelle au sol, à Vaulx-en-Velin. Il faut

s'intéresser au sol du canyon : disponibilité de la lumière et facteur de réflexion, car il contribue à la lumière disponible au niveau des étages inférieurs du canyon.

Concernant l'éclairement sur les façades, la contribution du revêtement est naturellement d'autant plus importante que son facteur de réflexion est élevé. Cependant, l'influence du facteur de réflexion varie plus fortement pour des façades claires. Des façades fraîchement repeintes dans des tons très clairs pour augmenter la luminosité d'une rue, perdront rapidement une partie importante de leur contribution à cause de la pollution des véhicules. Grâce aux différentes configurations de la maquette, nous avons montré que cette contribution est d'autant plus grande que l'étage considéré est situé près du sol et/ou que le canyon est étroit. De même, nous avons établi que le rapport d'aspect $H/W=1$ représente un bon compromis entre l'accès à la lumière provenant directement du ciel et la contribution de la façade opposée. L'utilisation de différents revêtements nous a permis de montrer que l'erreur commise en ne considérant pas les parties vitrées était plus grande pour les situations avec soleil visible, ou sous des ciels sans nuages. Enfin, lorsque les différents étages ne sont pas ensoleillés, à rapport d'aspect identique, la diminution de l'éclairement relatif d'un étage à l'autre est assez équivalente quel que soit le revêtement. Relativement au dernier étage, l'éclairement relatif est deux fois plus faible en bas des façades du canyon pour $H/W=1$, il est deux fois plus faible dès le milieu du canyon pour $H/W=2$. Les conclusions que nous pouvons tirer sont liées à la morphologie du canyon mais, tout comme pour le sol, la considération du type de ciel n'est pas superflue. Des écarts peuvent ainsi être constatés entre un type CIE 12 et 13 dont la distribution des luminances varie à cause du trouble atmosphérique. Il est difficile de demander aux urbanistes de s'intéresser au trouble, mais le climat local devrait tout de même être pris en compte, dans une certaine mesure, afin d'adapter la morphologie des rues aux besoins de lumière.

Les mesures dans des rues de Lyon ont mis en évidence la difficulté d'obtenir des données dans un milieu complexe et hétérogène. En raison de la complexité, il est peu évident d'établir une corrélation entre les mesures sur la maquette et les mesures sur site. Néanmoins, les mesures sur site nous ont permis d'évaluer une nouvelle méthode de mesure à partir de cartes de luminances. Les comparaisons entre les éclairagements lumineux obtenus à partir de cette méthode et à partir des sondes photométriques étalonnées ont produit une corrélation prometteuse. Cette corrélation n'a pu être effectuée que sur 16% des 153 séries de mesures (4 points par série). Nous avons en effet déterminé *a posteriori* les critères permettant de valider la méthode : de futures études pourront en bénéficier pour obtenir un plus grand nombre de données significatives. En disposant d'une carte des facteurs de réflexion des façades, il est possible d'obtenir des résultats proches de la réalité : nous avons obtenu un coefficient de Pearson de 0,96 entre 100 éclairagements mesurés par des sondes et ceux obtenus à partir des cartes de luminances. Sans disposer des facteurs de réflexion sur toute la façade, cette méthode peut être utilisée pour évaluer qualitativement la variation de l'éclairement lumineux sur toute une façade. Elle a d'ailleurs été utilisée pour valider la capacité de Daysim à représenter cette variation à l'aide de valeurs simulées.

Résultats des simulations

Puisqu'Heliodon modélise le soleil et pas le ciel, seuls les types CIE 11, 12 et 13 ont été considérés pour sa validation. Tous les types CIE ont été retenus pour Citysim et Daysim.

La comparaison entre les valeurs simulées par chacun des logiciels et mesurées sur la maquette donne des écarts plus faibles pour les ciels sans nuages et le ciel couvert standard de la CIE. Les ciels intermédiaires, plus difficiles à modéliser, donnent des écarts plus importants. D'ailleurs, ces écarts sont plus importants pour le canyon le plus large, quel que soit le type de ciel. Cela confirme la difficulté des modèles de ciel utilisés par les logiciels à représenter les distributions réelles des luminances du ciel. La disponibilité de données plus précises, provenant de scanners de ciel ou de photos fisheye, permettrait de réduire cet écart.

Concernant l'approximation sur le climat, Heliodon se révèle assez performant, pour autant que l'on ne considère que des ciels sans nuages, malgré plusieurs approximations. Son emploi peut être recommandé pour étudier des conditions ensoleillées, il est alors plus simple à utiliser et il produit rapidement des résultats qu'il est facile d'exploiter avec un tableur. Citysim et Daysim utilisent tous deux le même modèle de ciel, il est donc naturel que leurs résultats soient assez proches. Notons toutefois que Daysim utilise une méthode de calcul impliquant une première simulation assez longue, nécessaire pour calculer les Daylight Coefficients. Si la géométrie et le facteur de réflexion des surfaces ne changent pas, ces coefficients peuvent être réutilisés ensuite pour n'importe quel climat, la simulation est alors aussi rapide qu'avec Citysim. Citysim est donc globalement plus rapide que Daysim, c'est pourquoi il peut être préféré. La version que nous avons utilisée ne permettait pas de configurer facilement les simulations à partir de l'interface graphique, ce qui représentait un point négatif. Néanmoins, l'interface du logiciel a été améliorée par ses développeurs durant la thèse. Pour des raisons pratiques, nous nous sommes surtout focalisés sur les éclairagements lumineux produits par son solveur manipulé en lignes de commandes. Citysim est néanmoins capable d'effectuer des simulations du comportement thermique des bâtiments. Du fait de l'utilisation d'algorithmes aussi rapides que précis, il constitue un outil prometteur pour l'évaluation des dépenses énergétiques des bâtiments à l'échelle du quartier ou de la ville. Daysim, basé sur RADIANCE, permet d'effectuer des simulations avec des géométries et des propriétés de matériaux plus élaborées, notamment avec la prise en compte des réflexions spéculaires. Si le temps de calcul n'est pas un problème, ce dernier peut donc être préféré pour sa plus grande précision dans la modélisation du rayonnement solaire et de la lumière naturelle en milieu urbain. Il permet aussi de prendre en compte l'éblouissement causé par la lumière naturelle, de modéliser l'utilisation des stores et à partir de cela, de calculer les consommations électriques liées à l'éclairage artificiel. Ce sont des fonctionnalités non étudiées dans cette thèse mais importantes pour la conception des bâtiments. Citysim est finalement très orientée énergie des bâtiments : chauffage, climatisation. Daysim est, quant à lui, très orienté éclairage intérieur des bâtiments et rayonnement solaire sur l'enveloppe du bâtiment.

Nous n'avons pas mis en évidence de lien entre la complexité de la géométrie et le temps de calcul. Ce dernier augmente toutefois, dans tous les logiciels, avec le nombre de sondes virtuelles placées dans la scène. Les logiciels sont donc capables de gérer des calculs d'éclairage lumineux pour des rues réelles. Il faut que cette géométrie soit disponible, ce qui est le cas pour Lyon. Néanmoins, obtenir une représentation en 3D exploitable d'une ville peut être coûteux, lorsque cela est possible, ce qui reste assez rare.

Recommandations, bonnes pratiques

Nous avons vu que la plupart des études utilisaient un facteur de réflexion lumineux unique pour toute une rue, un quartier, voire une ville. Cependant, pour une même façade, nous avons constaté *in situ* des différences entre le rez-de-chaussée et les autres étages. L'utilisation d'une valeur unique implique une erreur non négligeable. Lorsque cette erreur est portée à plus grande échelle, des résultats peu représentatifs de la réalité peuvent être attendus. De même, il est commun d'utiliser soit un ciel couvert (CIE 1) soit un ciel uniforme ou un ciel sans nuages idéal, qui ne sont pas nécessairement représentatifs d'un climat réel. Nous avons vu que sous des conditions de ciel réelles, les éclairagements lumineux mesurés varient fortement et que, si le type de ciel n'est pas pris en compte, des erreurs d'analyse pouvaient être causées concernant le choix des configurations de canyon les plus adaptées au climat local. Par exemple, le rapport d'aspect $H/W=0,5$ permet d'obtenir les éclairagements relatifs les plus élevés dans le canyon pour un ciel couvert, alors qu'il s'agit de $H/W=2$ dans le cas d'un ciel sans nuages. Ces résultats sont valides uniquement pour Vaulx-en-Velin avec le revêtement crépi. Les validations des logiciels de calcul d'éclairément à l'aide de mesures sous des conditions réelles avec des maquettes ou des mesures sur sites doivent donc être améliorées et étendues. La validation de logiciels de simulation pour des rues réelles nécessite de :

- Disposer d'une géométrie 3D fidèle à la réalité
- Disposer des facteurs de réflexion lumineux représentatifs de toute la façade
- Comparer les simulations aux mesures pour les différents types de ciel CIE
- Prendre en compte la position du soleil, s'il est visible

De plus, cette validation doit être effectuée pour un grand nombre de rues de configurations différentes : orientation, rapport d'aspect, hétérogénéité des revêtements et des hauteurs de bâtiments. La plus grande difficulté est actuellement de disposer des données concernant le revêtement des façades, telles que le facteur de réflexion lumineux et le taux de vitrage. En effet, nous disposons de modèles 3D de bonne qualité comme ceux que nous avons utilisés dans cette thèse. Cependant, ces modèles ne comprennent pas d'information sur les façades. La mise en place d'une méthode de mesure à grande échelle, c'est-à-dire sur un véhicule mobile est nécessaire afin de produire une base de données contenant ces informations à l'échelle d'un quartier ou d'une ville.

Réflexions autour de l'apport de cette thèse

Les données de terrain de bonne qualité et les logiciels que nous avons présentés permettent d'estimer et d'améliorer l'accès à la lumière naturelle des bâtiments en milieu urbain. Nous avons vu, dans l'introduction, à quel point cet accès peut être lié à des problématiques de consommation et de gestion de l'énergie, mais aussi de santé et de confort. La mise en place d'écoquartiers doit bénéficier de ce type d'études dès la conception. Il apparaît nécessaire de réduire la densité des zones urbaines : nous avons vu qu'un rapport d'aspect $H/W=1$ garantissait un meilleur accès à la lumière naturelle. Cela implique des rues plus larges ou des bâtiments moins hauts. Cependant, la géométrie des rues a aussi une influence sur d'autres effets comme l'îlot de chaleur urbain ou la concentration des polluants. Le choix du rapport d'aspect ne concerne donc pas que la lumière naturelle. Nous pouvons aussi souligner qu'avec des rues plus larges, les villes sont plus étalées, ce qui implique d'autres

conséquences comme l'artificialisation des sols naturels. Quoiqu'il en soit, la modification du rapport d'aspect n'est pas possible pour les quartiers déjà existants. Toutefois, nous avons montré l'importance de la contribution des réflexions entre les façades, dont la réfection est réalisable. Elle est aussi obligatoire tous les 10 ans dans le droit français, même si elle est généralement effectuée à une fréquence plus faible du fait de son coût élevé. À cette occasion, le facteur de réflexion lumineux des façades doit être augmenté. Les matériaux choisis devraient aussi pouvoir être nettoyés facilement. Cela permettrait d'augmenter la fréquence de l'entretien des façades tout en réduisant son coût. Cette fréquence devrait notamment varier en fonction du rapport d'aspect, les rues les plus étroites se salissant plus vite. L'accès à la lumière naturelle pourrait se justifier par des directives sanitaires, du fait de son lien établi avec la santé humaine. Actuellement, cet accès se traduit par exemple à travers la valeur des appartements à la location ou à la revente. Il y a une inégalité de la disponibilité de la lumière naturelle entre les étages inférieurs et supérieurs. Les étages inférieurs subissent déjà un niveau de pollution et une gêne sonore plus élevés. Cela s'inscrit donc bien dans les considérations sociales des écoquartiers. Face à ces problématiques, nous apportons :

- Une base de données de mesures à utiliser pour des comparaisons
- Une nouvelle méthode de mesure d'éclairement lumineux en site urbain
- Un avis sur les résultats de simulations avec trois logiciels disponibles
- Une analyse sur l'impact de différentes simplifications communes

Perspectives

L'intérêt des simulations est primordial, nous avons pu voir la difficulté d'obtenir des mesures fiables, difficulté croissant avec la complexité de l'environnement. Les travaux effectués dans cette thèse méritent d'être repris à une plus grande envergure. Nous avons besoin d'outils proprement validés, cela nécessite des mesures comme celles que nous avons effectuées sur la maquette. Cependant, l'utilisation d'une seule maquette rend l'analyse des données difficile. La mise en place de plusieurs maquettes situées au même endroit permettrait de tester plus facilement l'écart entre différentes configurations.

En utilisant plusieurs maquettes, il devient possible de se concentrer sur un seul paramètre. Par exemple, trois maquettes avec des rapports d'aspect différents, mais avec le même revêtement, permet d'évaluer l'influence du rapport d'aspect en fonction du revêtement. Inversement, autant de maquettes que de revêtements à évaluer, mais avec un rapport d'aspect identique, permet de se focaliser sur l'influence du revêtement (facteur de réflexion lumineux, taux de vitrage). Cela dépend du paramètre sur lequel on souhaite se concentrer.

Le modèle réduit de canyon urbain représente un environnement de mesure mieux maîtrisé que le terrain. Cependant, les données obtenues sont particulièrement sensibles aux conditions climatiques rencontrées durant la période de mesures. Afin de maîtriser également les conditions climatiques (distribution des luminances du ciel et positions du soleil), il serait utile de disposer en laboratoire d'un ciel artificiel permettant de reproduire les distributions de luminances des ciels types de la CIE.

Un tel dispositif permettrait de produire très rapidement une base de données de qualité pouvant être utilisée pour une validation plus poussée des logiciels de simulation. Ces logiciels, une fois validés, pourraient alors être utilisés exclusivement, pour générer des résultats pour des centaines de configurations dans le but de mettre en place des modèles d'accès à la lumière naturelle en fonction de la morphologie d'une rue.

D'autres points méritent également d'être étudiés. Par exemple, la possibilité d'utiliser des revêtements routiers assez clairs en milieu urbain. Cela pourrait être bénéfique aussi bien à l'éclairage naturel qu'à l'éclairage artificiel. Cela pourrait améliorer la quantité de lumière disponible au niveau des étages les plus bas et contribuer à la réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Un dispositif expérimental utilisant plusieurs maquettes avec des chaussées de facteurs de réflexion lumineux différents permettrait de quantifier l'augmentation des éclairages sur les façades liées à l'augmentation de la clarté du sol. Dans l'étude bibliographique, les toits sont plus souvent mentionnés que le sol, qui pourtant fait partie intégrante du milieu urbain, et dont les mesures et la réflexion sont bien plus évidentes.

L'influence des façades est d'autant plus grande lorsque l'on se rapproche du sol à cause de la loi des réflexions multiples et de l'accès réduit à la lumière provenant du ciel. Il pourrait être envisagé d'uniformiser la répartition de la lumière à tous les étages, en utilisant un facteur de réflexion variable en fonction de la hauteur sur la façade. Un dégradé suivant une loi serait idéal mais difficilement réalisable. Cependant, une "couleur" par niveau pourrait déjà mener à des résultats intéressants. D'ailleurs, c'est aux niveaux inférieurs, dont l'accès est le plus réduit, que cette modification peut être faite le plus facilement. Cela pourrait être proposé aux architectes et urbanistes afin de concevoir un milieu urbain en accord avec les besoins énergétiques et les impératifs de santé concernant l'énergie collectée sur les façades aussi bien que la lumière pénétrant dans les bâtiments. Enfin, l'utilisation d'un taux de vitrage fixe à tous les étages d'un bâtiment devrait être remise en question, afin que les habitants des différents étages aient la même quantité d'éclairage intérieur.

Bibliographie

- Abshire, J. B., Sun, X., Riris, H., Sirota, J. M., McGarry, J. F., Palm, S., . . . Liiva, P. (2005). Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance. *Geophysical Research Letters*, 32(21).
- ADEME. (2010). Bilan du PREBAT : le bâtiment basse consommation, une obligation du Grenelle Environnement et déjà une réalité. *Communiqué de presse de l'ADEME*.
- Aida, M., et Gotoh, K. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure, a two-dimensional numerical simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, 23(4), 415-424.
- Andersen, M., Kleindienst, S., Yi, L., Lee, J., Bodart, M., et Cutler, B. (2008). An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach. *Building Research & Information*, 36(6), 593-607.
- ASTER GDEM Validation Team. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results.
- ASTM G173-03. (2012). Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances. *ASTM International*. doi: 10.1520/G0173-03R12
- Baik, J. J., Kwak, K. H., Park, S. B., et Ryu, Y. H. (2012). Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmospheric Environment*.
- Baker, N. (2000). *Energy and environment in architecture*: Taylor & Francis.
- Baldrige, A., Hook, S., Grove, C., et Rivera, G. (2009). The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), 711-715.
- Baldwin, R., Leach, S., Doggart, J., et Attenborough, M. (1990). *BREEAM 1/90: an environmental assessment for new office designs*: Building Research Establishment Garston.
- Barker, M., Blewett-Silcock, T., Eising, K., Gutschner, M., Kjellsson, E., Lutter, E., . . . Tondi, G. (2001). Solar ElectricCity Guide. *ENERGIE*.
- Barnes, K. B., Morgan, J., et Roberge, M. (2001). Impervious surfaces and the quality of natural and built environments. *Baltimore: Department of Geography and Environmental Planning, Towson University*.
- Beckers, B., et Beckers, P. (2011). Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère. *Rapport Helio_008_fr*.
- Beckers, B., Masset, L., et Beckers, P. (2011). The universal projection for computing data carried on the hemisphere. *Computer-Aided Design*, 43(2), 219-226.
- Bourbia, F., et Awbi, H. (2004). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate, Part 2: Shading simulations. *Renewable Energy*, 29(2), 291-301.
- Bourges, B. (1992). *Climatic Data Handbook for Europe: Climatic Data for the Design of Solar Energy Systems*: Kluwer Academic Pub.
- Bozonnet, E. (2005). *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments: Cas de la rue canyon*. Université de la Rochelle.
- Bozonnet, E., Belarbi, R., et Allard, F. (2005). Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, 79(1), 10-24.

- Brotas, L., et Wilson, M. (2006). *Daylight in urban canyons: planning in Europe*. Article présenté à PLEA, Geneva.
- Brown, M. J., Grimmond, S., et Ratti, C. (2001). *Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environments*. Article présenté à International Society of Environmental Hydraulics, Tempe.
- Brundtland, G. H. (1987). Rapport Brundtland (Notre avenir à tous).
- BSRN. (2013). Baseline Surface Radiation Network, depuis <http://www.gewex.org/bsrn.html>
- Budig, C., Orozaliev, J., et Vajen, K. (2010). Comparison of Different Sources of Meteorological Data for Central Asia and Russia.
- Capeluto, I. G. (2003a). Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy and Buildings*, 35(3), 327-336.
- Capeluto, I. G. (2003b). The influence of the urban environment on the availability of daylighting in office buildings in Israel. *Building and environment*, 38(5), 745-752.
- Capeluto, I. G., et Shaviv, E. (1997). Modeling the design of urban fabric with solar rights considerations. *IBPSA*, 99, 1341-1347.
- Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., et Golay, F. (2010). *Urban environment quality indicators: application to solar radiation and morphological analysis on built area*. Article présenté à World Scientific and Engineering Academy and Society.
- CDC. (2013). The Climate Data Centre of Deutscher Wetterdienst (DWD), depuis <http://cdc.dwd.de/catalogue/srv/en/main.home>
- Cellura, M., Di Gangi, A., Longo, S., et Orioli, A. (2012). Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2041-2052.
- Cetegen, D., Veitch, J. A., et Newsham, G. R. (2008). *View size and office luminance effects on employee satisfaction*. Article présenté à Balkan Light.
- Chapman, L., et Thornes, J. (2004). Real-time sky-view factor calculation and approximation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(5), 730-741.
- Chapman, L., Thornes, J., et Bradley, A. (2001). Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. *Theoretical and applied climatology*, 69(1), 81-89.
- Chapman, L., Thornes, J. E., et Bradley, A. V. (2002). Sky-view factor approximation using GPS receivers. *International Journal of Climatology*, 22(5), 615-621.
- Charte d'Aalborg. (1994). *Charter of European cities and towns towards sustainability*. Article présenté à European Conference on Sustainable Cities & Towns, Aalborg, Denmark.
- Chellappa, S. L., Steiner, R., Blattner, P., Oelhafen, P., Götz, T., et Cajochen, C. (2011). Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? *PloS one*, 6(1), e16429.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., et Compagnon, R. (2006). *Urban form, density and solar potential*. Article présenté à PLEA, Geneva.
- Cheung, C. K., Fuller, R., et Luther, M. (2005). Energy-efficient envelope design for high-rise apartments. *Energy and Buildings*, 37(1), 37-48.

- Chevillard, P. (2013). Les critères pour calculer le prix d'un logement, depuis <http://www.pap.fr/conseils/achat-vente/vendeur-bien-fixer-le-prix-de-votre-logement/a2522/les-criteres-pour-calculer-le-prix-d-un-logement>
- CIE. (1986). CIE Publication N° 15.2. *Commission Internationale de l'éclairage, Vienna*, 19-20.
- CIE. (1988). 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision. Publication N°86.
- CIE. (1998). CIE 130-1998 Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance.
- CIE. (2004). Standard 011/E: 2003 Spatial distribution of daylight-CIE standard general sky: February.
- CIE. (2007). CIE Colorimetry - Part 1: Standard Colorimetric Observers *ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006*.
- CIE TC 2.17. (1989). Technical Report, Solar Spectral Irradiance. *Publication CIE N°85*.
- CIE TC 3.07. (1994). Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement.
- Coch Roura, H., et Curreli, A. (2013). Urban layout and façade solar potential : a case study in the mediterranean region. *ACE: architecture, city and environment*(21), 117-132.
- Commission Européenne. (2008). 20 20 by 2020 Europe's climate change opportunity. *COM (2008), 30*.
- Commission Européenne. (2010). Energy, transport and environment indicators. *Eurostat Pocketbooks p.35*.
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), 321-328.
- Coubard, F., Brédif, M., Briottet, X., et Paparoditis, N. (2011). Estimation de la réflectance de matériaux d'une scène urbaine: modélisation et méthode d'inversion. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection n, 194(2), 25*.
- CSTB. (2009). Vers des bâtiments à énergie positive, proposition de structuration des actions de recherche.
- Dana, K. J., Van Ginneken, B., Nayar, S. K., et Koenderink, J. J. (1999). Reflectance and texture of real-world surfaces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 18(1), 1-34.
- Darula, S., Kittler, R., et Gueymard, C. A. (2005). Reference luminous solar constant and solar luminance for illuminance calculations. *Solar Energy*, 79(5), 559-565.
- De Carli, M., et De Giuli, V. (2009). *Optimization of daylight in buildings to save energy and to improve visual comfort: analysis in different latitudes*. Article présenté à 11th IBPSA Conference, Glasgow.
- de la Flor, F. J. S., Ortiz Cebolla, R., Luis Molina Félix, J., et Álvarez Domínguez, S. (2005). Solar radiation calculation methodology for building exterior surfaces. *Solar Energy*, 79(5), 513-522.
- Denholm, P., et Margolis, R. (2006). *Very large-scale deployment of grid-connected solar photovoltaics in the United States: challenges and opportunities*. Article présenté à Solar 2006 Conference.
- DLR. (2013). SOLEMI, Solar Energy Mining, depuis http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422_read-6581

- Dogan, T., Reinhart, C., et Michalatos, P. (2012). Urban daylight simulation calculating the daylight area of urban designs.
- Dora, C., Phillips, M. A., et Phillips, M. (2000). *Transport, Environment, and Health*: World Health Organization.
- Doya, M. (2010). *Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense*. Université de La Rochelle.
- Dumortier, D. (1995). *Mesure, Analyse et Modélisation du gisement lumineux: application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments*. Université de Lyon.
- Dumortier, D., Coutelier, B., Faulcon, T., et Roy, F. (2005). PHOTOLUX: a new luminance mapping system based on Nikon Coolpix digital cameras. *Lux Europa*, 308-311.
- Enertech. (2011). Evaluation par mesure des performances énergétiques des 8 bâtiments construits dans le cadre du programme européen Concerto.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., . . . Roth, L. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004.
- Fattal, R., Lischinski, D., et Werman, M. (2002). Gradient domain high dynamic range compression. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(3), 249-256.
- Fazio, P., Bedard, C., et Gowri, K. (1989). Knowledge-based system approach to building envelope design. *Computer-Aided Design*, 21(8), 519-527.
- Feist, W. (2007). What is a Passive House. *Passive House Institute*.
- Fontoynt, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J., Skartveit, A., . . . Roche, L. (1999). *Satellite - A WWW server which provides high quality daylight and solar radiation data for Western and Central Europe*. Article présenté à 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography Paris, France.
- Fritz, S. (1955). Illuminance and luminance under overcast skies. *JOSA*, 45(10), 820-825.
- Frölich, A. (2000). Integrated Photovoltaic Noise Barrier Concepts. *Photovoltaic Building Integration Concepts*, 33.
- Gal, T., Lindberg, F., et Unger, J. (2009). Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and applied climatology*, 95(1), 111-123.
- Gal, T., Rzepa, M., Gromek, B., et Unger, J. (2007). Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica et Chorologica*, 40(41), 17-26.
- Getter, K. L., et Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Ghisi, E., et Tinker, J. A. (2005). An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. *Building and environment*, 40(1), 51-61.
- GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse.
- GIMP. (2004). Image Manipulation Program. *Freely distributed Image Processing Software* <http://www.gimp.org>.
- Global Chance. (2010). La consommation sectorielle d'électricité en Europe. *Les Cahiers de Global Chance n°27*, p. 23.

- Google. (2012). Building Maker, depuis <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/buildingmaker?hl=fr>
- Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P., et Battaile, B. (1984). *Modeling the interaction of light between diffuse surfaces*. Article présenté à ACM SIGGRAPH Computer Graphics.
- Grand Lyon. (2011). Plan local d'urbanisme p-317.
- Grauthoff, M., Janssen, U., et Fernandes, J. (2012). Identification et mobilisation du potentiel solaire à l'aide de stratégies locales.
- Green, B. (2004). A guide to using plants on roofs, walls and pavements. *Jacklyn Johnston and John Newton, London Ecology Unit*.
- Grena, R. (2008). An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82(5), 462-470.
- Grenier, A. (2007). Ville et énergie. Spécificité et complexité de la question en France. *Les Annales de la recherche urbaine*.
- Grigge, E., Sharp, T., et MacDonald, J. (1989). *Guide for Estimating Differences in Building Heating and Cooling Energy Due to Changes in Solar Reflectance of a LowStopped Roof*: Oak Ridge National Laboratory USA.
- Grimmond, C., Potter, S., Zutter, H., et Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, 21(7), 903-913.
- Grobman, Y. J., Yezioro, A., et Capeluto, I. G. (2008). *Building form generation based on multiple performance envelopes*. Article présenté à PLEA 2008.
- Groleau, D. (2000). *SOLENE, Un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains*. Article présenté à Colloque Artepa, Rouen.
- Gueymard, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5), 325-346.
- Gyr, A., et Rys, F. S. (1995). *Diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields* (Vol. 1): Springer.
- Harman, I. N., Best, M. J., et Belcher, S. E. (2004). Radiative exchange in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 110(2), 301-316.
- Helioclim. (2013). The HelioClim solar radiation Databases - estimated from Meteosat images, depuis <http://www.soda-is.com/eng/helioclim/>
- Hofierka, J., et Suri, M. (2002). *The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications*. Article présenté à International GRASS users conference in Trento, Italy.
- Holmer, B. (1992). A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs. *Meteorol. Zeitschrift, NF, 1*, 236-239.
- Hopkinson, R. G., Petherbridge, P., et Longmore, J. (1966). *Daylighting*: Heinemann.
- Hoyer-Klick, C., Dumortier, D., Tsvetkov, A., Polo, J., Torres, J., Kurz, C., et Ineichen, P. (2008). D 1.1. 2 Existing Ground Data Sets. *Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge, CA-Contract(038665)*.
- Huang, W., Ramsey, K. M., Marcheva, B., et Bass, J. (2011). Circadian rhythms, sleep, and metabolism. *The Journal of clinical investigation*, 121(6), 2133.

- Hutcheon, N. (1968). *Requirements for exterior walls*. Canadian Building Digest, (48). National research council of Canada, Division of Building Research.
- IAU. (2012). *Resolution B2 : on the re-definition of the astronomical unit of length*. Article présenté à 28th General Assembly of International Astronomical Union, Beijing.
- Ibarra, D., et Reinhart, C. F. (2011). *Solar availability: a comparison study of six irradiation distribution methods*. Article présenté à Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney.
- IDMP. (2013). The IDMP Network, depuis <http://idmp.entpe.fr/>
- IEA. (2012a). Key world energy statistics. p 44.
- IEA. (2012b). online unit converter, depuis <http://www.iea.org/stats/>
- IEA. (2013). *PVPS annual report 2012*. Fribourg, Switzerland.
- Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., et Nakamura, H. (2004). Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. *Solar Energy*, 77(2), 137-157.
- IGN. (2011). Processus de production de la maquette Territoire3D.
- IGN. (2012). BD Alti, depuis <http://professionnels.ign.fr/bdalti>
- Ineichen, P. (2005). Angular distribution of the diffuse illuminance. *Université de Genève, Suisse*.
- Ineichen, P. (2011). Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations. *Scientific report, University of Geneva*.
- Ineichen, P., et Perez, R. (2002). A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, 73(3), 151-157.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*: Academic Press Canada.
- Jochem, A., Höfle, B., Hollaus, M., et Rutzinger, M. (2009). Object detection in airborne LIDAR for improved solar radiation modelling in urban areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38.
- Johnson, G. T., et Watson, I. D. (1984). The determination of view-factors in urban canyons. *Journal of Applied Meteorology*, 23, 329-335.
- Kakon, A. N., et Nobuo, M. (2009). *The sky view factor effect on the microclimate of a city environment: A case study of Dhaka City*.
- Kanda, M., Kawai, T., et Nakagawa, K. (2005). A simple theoretical radiation scheme for regular building arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, 114(1), 71-90.
- Kassner, R., Koppe, W., Schüttenberg, T., et Bareth, G. (2008). Analysis of the solar potential of roofs by using official lidar data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 399-403.
- Kasten, F., et Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Opt*, 28(22), 4735-4738.
- Kittler, R. (1967). Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies. *Sunlight in buildings, Bouwcentrum Rotterdam*, 273-286.
- Kittler, R., et Darula, S. (2000). Determination of sky types from global illuminance. *Lighting Research and Technology*, 32(4), 187-193.

- Kjenner, J. (2010). Daylight analysis plug-in for Sketchup, depuis <http://code.google.com/p/su2ds/>
- Knowles, R. L. (2003). The solar envelope: its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, 35(1), 15-25.
- Kobav, M. B. (2009). *Development and validation of methods used to compute time values of indoor daylight illuminances*. Doc'INSA-INSA de Lyon.
- Kolbe, T. H., Gröger, G., et Plümer, L. (2005). *CityGML–Interoperable access to 3D city models*. Article présenté à First International Symposium on Geo-Information for Disaster Management GI4DM.
- Kristl, Ž., et Krainer, A. (2001). Energy evaluation of urban structure and dimensioning of building site using iso-shadow method. *Solar Energy*, 70(1), 23-34.
- Krochmann, J., et Seidl, M. (1974). Quantitative data on daylight for illuminating engineering. *Lighting Research and Technology*, 6(3), 165-171.
- Kunzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., . . . Quenel, P. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*, 356(9232), 795-801.
- LeBaron, B., Michalsky, J., et Perez, R. (1990). A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, 44(5), 249-256.
- Lehmann, H., et Peter, S. (2003). Assessment of roof & façade potentials for solar use in Europe. *Institute for sustainable solutions and innovations (ISUSI): Aachen, Germany*.
- Leprince, V. (2010). *Bâtiment très basse consommation d'énergie : aide à la conception par l'analyse des interactions entre l'enveloppe et les équipements*. Université de Lyon.
- Leung, K. S., et Steemers, K. (2008). *Estimating Average Sky View Factors of Urban Surfaces with Simple Geometric Parameters*. Article présenté à PLEA, Dublin.
- LI-COR. (2005). LI-COR Terrestrial Radiation Sensors, Instruction Manual, Publication Number 984-08308.
- Li, D., Rao, Z., et Liao, S. (2012). The impact of density of neighborhood on energy demand and irradiation.
- Li, D., et Tang, H. (2008). Classification of Hong Kong Prevailing Standard Skies. *Open Construction and Building Technology Journal*, 2, 251-256.
- Li, D. H., Cheung, G. H., Cheung, K., et Lam, T. N. (2010). Determination of vertical daylight illuminance under non-overcast sky conditions. *Building and environment*, 45(2), 498-508.
- Li, X. X., Britter, R. E., Norford, L. K., Koh, T.-Y., et Entekhabi, D. (2012). Flow and pollutant transport in urban street canyons of different aspect ratios with ground heating: large-eddy simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, 142(2), 289-304.
- Lindberg, F., Eliasson, I., et Holmer, B. (2003). *Urban geometry and temperature variations*.
- Littlefair, P. J. (1988). Measurements of the luminous efficacy of daylight. *Lighting Research and Technology*, 20(4), 177-188.
- Liu, B. Y. H., et Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1-19.

- Lobaccaro, G., Fiorito, F., Masera, G., et Prasad, D. (2012). *Urban solar district: a case study of geometric optimization of solar façades for a residential building in Milan*. Article présenté à AuSES Solar, Melbourne.
- Loi n° 2009-967. (2009). Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1)
- Macomber, M. M. (1984). World geodetic system 1984: DTIC Document.
- Mardaljevic, J. (1995). Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. *Lighting Research and Technology*, 27(4), 181-188.
- Mardaljevic, J. (2004a). Spatio-temporal dynamics of solar shading for a parametrically defined roof system. *Energy and Buildings*, 36(8), 815-823.
- Mardaljevic, J. (2004b). Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings. *Lighting Research and Technology*, 36(3), 217-239.
- Mardaljevic, J. (2006). *Examples of climate-based daylight modelling*. Article présenté à CIBSE National Conference.
- Mardaljevic, J., Heschong, L., et Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology*, 41(3), 261-283.
- Mardaljevic, J., et Rylatt, M. (2003). Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach. *Energy and Buildings*, 35(1), 27-35.
- Matuschek, O., et Matzarakis, A. (2010). Estimation of sky view factor in complex environment as a tool for applied climatological studies. *Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, 20, 534-539.
- MEDDE. (2011). La démarche EcoQuartier, depuis <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Plan-Ville-Durable.html>
- MEDDE. (2012a). L'énergie solaire thermique en France de 2000 à 2011, depuis <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>
- MEDDE. (2012b). Le plan bâtiment Grenelle, depuis <http://www.legrenelle-environnement.fr/leplanbatimentgrenelle>
- Meeus, J. H. (1991). *Astronomical algorithms*: Willmann-Bell, Incorporated.
- Mentens, J., Raes, D., et Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and urban planning*, 77(3), 217-226.
- Miguet, F., et Groleau, D. (2002). A daylight simulation tool for urban and architectural spaces - application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and environment*, 37(8), 833-843.
- Moon, P., et Spencer, D. E. (1942). Illumination from a non-uniform sky. *Illuminating Engineering*, 37(10), 707-726.
- Morello, E., et Ratti, C. (2009). Sunscapes: Solar envelopes' and the analysis of urban DEMs. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 26-34.
- Muneer, T. (1990). Solar radiation model for Europe. *Building services engineering research and technology*, 11(4), 153-163.

- Nader, S. (2009). Paths to a low-carbon economy, The Masdar example. *Energy Procedia*, 1(1), 3951-3958.
- Najjar, G., Kastendeuch, P., Stoll, M., Colin, J. R., Nerry, F., Ringenbach, N., . . . Viville, D. (2004). Le projet Reclus-Téledétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg.
- Nakamura, H., Oki, M., et Hayashi, Y. (1985). Luminance distribution of intermediate sky. *Journal of light and visual environment*, 9(1), 6-13.
- NASA. (2013). SRB Data and Information, depuis https://eosweb.larc.nasa.gov/project/srb/srb_table
- Nazridoust, K., et Ahmadi, G. (2006). Airflow and pollutant transport in street canyons. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 94(6), 491-522.
- NF EN 12464-1. (2011). Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieurs. *AFNOR*.
- Ng, E. (2009). Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities—air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and environment*, 44(7), 1478-1488.
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., et Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719-729.
- NREL. (2013). National Solar Radiation Data Base, depuis http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/
- Nusselt, W. (1978). Graphische Bestimmung der Winkelverhältnisses bei der Warmestrahlung. *VDIZ*, 72, 673.
- Oke, T. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237-254.
- Oke, T. R. (1988). *Boundary layer climates*: Routledge.
- Olseth, J., et Skartveit, A. (1989). Observed and modelled hourly luminous efficacies under arbitrary cloudiness. *Solar Energy*, 42(3), 221-233.
- Ordóñez, J., Jadraque, E., Alegre, J., et Martínez, G. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2122-2130.
- Parish, Y. I., et Müller, P. (2001). *Procedural modeling of cities*. Article présenté à Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.
- Perez-Lombard, L., Ortiz, J., et Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., et Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289.
- Perez, R., Seals, R., et Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution, preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235-245.
- Perrin, C., et Vauge, C. (1982). Le Gisement Solaire: Evaluation de la Ressource Energétique. *Technique et Documentation, Librairie Lavoisier, Paris, France*.

- Perrin de Brichambaut, C., et Vauge, C. (1982). *Le gisement solaire: Evaluation de la ressource énergétique*: Technique et documentation-Lavoisier.
- Persson, M.-L. (2006). *Windows of Opportunities: The Glazed Area and its Impact on the Energy Balance of Buildings*. Uppsala University.
- Plan Climat. (2004). Face au changement climatique agissons ensemble. *MIES, Paris*.
- Poulle, Y. (1999). La France à l'heure allemande. *Bibliothèque de l'école des chartes*, 157(2), 493-502.
- Prévoist, A., Rodríguez, D., Molines, N., et Beckers, B. (2011). La modélisation 3D: une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(4), 557-583.
- Rasband, W. (2008). ImageJ. <http://rsbweb.nih.gov/ij/>.
- Ratti, C., Baker, N., et Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776.
- Ratti, C., et Richens, P. (1999). *Urban texture analysis with image processing techniques*. Article présenté à CAADFutures99.
- Ratti, C., Robinson, D., Baker, N., et Steemers, K. (2000). *LT Urban: the energy modelling of urban form*. Article présenté à PLEA, Cambridge.
- Reagan, J., et Acklam, D. (1979). Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern USA residences. *Energy and Buildings*, 2(3), 237-248.
- Reinhart, C., et Breton, P. (2009). Experimental Validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and Daysim 3.0. *Leukos*, 6(1), 7-35.
- Reinhart, C., et Herkel, S. (2000). The simulation of annual daylight illuminance distributions, a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods. *Energy and Buildings*, 32(2), 167-187.
- Reinhart, C., Landry, M., et Breton, P. (2009). Daylight Simulation in Autodesk 3ds Max Design 2009 - Getting Started. *Autodesk*.
- Reinhart, C. F., et Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683-697.
- Remund, J., et Kunz, S. (1997). *METEONORM: Global meteorological database for solar energy and applied climatology*: Meteotest.
- Remund, J., Wald, L., Lefèvre, M., Ranchin, T., et Page, J. H. (2003). *Worldwide Linke turbidity information*. Article présenté à Proceedings of ISES Solar World Congress 2003.
- Richens, P. (1997). Image processing for urban scale environmental modelling.
- Robinson, D., Campbell, N., Gaiser, W., Kabel, K., Le-Mouel, A., Morel, N., . . . Stone, A. (2007). SUNtool—a new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, 81(9), 1196-1211.
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., et Wilke, U. (2009). *CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning*. Article présenté à IBPSA, Glasgow.

- Robinson, D., et Stone, A. (2005). A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building services engineering research and technology*, 26(4), 271-284.
- Rodrigues, J. E., et Lucas, E. W. M. (2010). *INMET experience in deploying its network of automatic weather stations surface*. Article présenté à WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, Helsinki, Finland.
- Rylatt, M., Gadsden, S., et Lomas, K. (2001). GIS-based decision support for solar energy planning in urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 25(6), 579-603.
- Rzepa, M. (2009). *The map of sky view factor in the center of Lodz*. Article présenté à 7th International Conference on Urban Climate.
- Satel-Light. (2013). The European Database of Daylight and Solar Radiation, depuis www.satellight.com/
- Selkowitz, S. E., et Lampert, C. M. (1989). Application of large area chromogenics to architectural glazings. *Large-Area Chromogenics: Materials and Devices for Transmittance Control*, CM Lampert and CG Granqvist, eds., SPIE Optical Engineering Press Bellingham, WA, USA, 22-45.
- Shah, S., et Aggarwal, J. (1996). Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation. *Pattern Recognition*, 29(11), 1775-1788.
- Shih, N. J., et Huang, Y. S. (2001). An analysis and simulation of curtain wall reflection glare. *Building and environment*, 36(5), 619-626.
- SOeS. (2012). Bilan énergétique de la France pour 2011. Dans Service de l'observation et des statistiques (Ed.), (Vol. n°130): Commissariat général au développement durable.
- Sørensen, B. (2001). GIS management of solar resource data. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67(1), 503-509.
- Souza, L. C. L., Rodrigues, D. S., et Mendes, J. F. G. (2003). *A 3d-gis extension for sky view factors assessment in urban environment*. Article présenté à International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Sendai.
- Sparrow, E., et Cess, R. (1970). *Radiation Heat Transfer*.
- Spencer, J. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), 172.
- Steyn, D. (1980). The calculation of view factors from fisheye-lens photographs: Research note. *Atmosphere-Ocean*, 18(3), 254-258.
- Steyn, D., Hay, J., Watson, I. D., et Johnson, G. T. (1986). The determination of sky view-factors in urban environments using video imagery. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3, 759-764.
- Strømmand-Andersen, J., et Sattrup, P. A. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8).
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13): Springer.
- Summit, E. (1992). *Agenda 21*. Article présenté à The United Nations Programme of action from Rio. Final text of agreements negotiated at the United Nations Conference of Environmental and Development (UNCED).

- Suri, M., Remund, J., Cebecauer, T., Dumortier, D., Wald, L., Huld, T., et Blanc, P. (2008). *First steps in the cross-comparison of solar resource spatial products in Europe*. Article présenté à EUROSUN 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings.
- Swaid, H. (1993). The role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 64(3), 231-259.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99-103.
- Taillandier, F., et Deriche, R. (2004). *Automatic buildings reconstruction from aerial images: a generic bayesian framework*. Article présenté à Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.
- Teller, J., et Azar, S. (2001). Townscope II—A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy*, 70(3), 187-200.
- Terrat, M.-N., et Joumard, R. (1990). The measurement of soiling. *Science of the total environment*, 93, 131-138.
- Tobler, R. F., Neumann, L., Sbert, M., et Purgathofer, W. (1998). A new form factor analogy and its application to stochastic global illumination algorithms *Rendering Techniques' 98* (pp. 35-44): Springer.
- Tregenza, P. (2004). Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies. *Lighting Research and Technology*, 36(4), 271-279.
- Tregenza, P., Perez, R., Michalsky, J., et Seals, R. (1994). Guide to recommended practice of daylight measurement. *CIE TC-3.07*.
- Tregenza, P., et Waters, I. (1983). Daylight coefficients. *Lighting Research and Technology*, 15(2), 65-71.
- Trenkle, R. (1988). The absorption of solar energy in a courtyard. *Energy and Buildings*, 11(1), 309-317.
- Tsangrassoulis, A., et Santamouris, M. (2003). Numerical estimation of street canyon albedo consisting of vertical coated glazed facades. *Energy and Buildings*, 35(5), 527-531.
- Tsangrassoulis, A., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., et Tregenza, P. (1999). A method for the estimation of illuminances on surfaces of urban canyons with balconies in sunlit areas. *Lighting Research and Technology*, 31(1), 5-12.
- Tuhus-Dubrow, D., et Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and environment*, 45(7), 1574-1581.
- Tzempelikos, A., Athienitis, A. K., et Karava, P. (2007). Simulation of façade and envelope design options for a new institutional building. *Solar Energy*, 81(9), 1088-1103.
- UN-DESA. (2007). United Nations Department of Economic and Social Affairs : Urban and Rural Areas.
- UN-DESA. (2012). World Urbanization Prospects, The 2011 Revision.
- UN-HABITAT. (2008). *State of the World's Cities 2008/2009, Harmonious Cities*. London: Earthscan.
- UNEP. (2012). *Sustainable Cities, building cities for the future*.

- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1), 59-80.
- US Green Building Council. (1999). Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), Green Building Rating System V. 1.0. <http://www.usgbc.org>.
- van Esch, M., Looman, R., et de Bruin-Hordijk, G. (2011). The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. *Energy and Buildings*.
- Van Renterghem, T., et Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and environment*, 44(5), 1081-1087.
- Vardimon, R. (2011). Assessment of the potential for distributed photovoltaic electricity production in Israel. *Renewable Energy*.
- Vartiainen, E. (2000). A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements. *Renewable Energy*, 20(3), 265-277.
- Wa-Gichia, M. (1998). The high-rise opposing facade in clear sky conditions, not always an obstruction to daylight. *Solar Energy*, 64(4-6), 179-188.
- Walraven, R. (1978). Calculating the position of the sun. *Solar Energy*, 20(5), 393-397.
- Wang, Y., Tian, W., Ren, J., Zhu, L., et Wang, Q. (2006). Influence of a building's integrated-photovoltaics on heating and cooling loads. *Applied energy*, 83(9), 989-1003.
- Ward, G. J. (1994). *The RADIANCE lighting simulation and rendering system*. Article présenté à 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques.
- Ward, G. J., et Rubinstein, F. M. (1988). A new technique for computer simulation of illuminated spaces. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 17(1), 80-91.
- Watson, I., et Johnson, G. (1987). Graphical estimation of sky view factors in urban environments. *International Journal of Climatology*, 7(2), 193-197.
- Watt, M. E. (2001). *The Added Values of Renewable Energy—A Case Study of Photovoltaic Power Systems*. Article présenté à ISES Solar World Congress, Adelaide, South Australia.
- Whitman, A. M. (2003). A Simple Expression for the Equation of Time.
- WMO. (2003). Manual on the Global Observing System N°544. *World Meteorological Organization*.
- Yun, G. Y., et Steemers, K. (2009). Implications of urban settings for the design of photovoltaic and conventional façades. *Solar Energy*, 83(1), 69-80.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., et Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and applied climatology*, 62(3-4), 199-207.

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : Croissance de la population des aires urbaines dans le monde entre 1950 et 2010 (UN-DESA, 2012) | 19 |
| Figure I-2 : Émissions de CO ₂ dues à l'exploitation des énergies fossiles (IEA, 2012a)..... | 21 |
| Figure I-3 : Évolution de la production des énergies primaires en Europe (Commission Européenne, 2010) | 22 |
| Figure I-4 : Pourcentage d'énergie primaire produite à partir de sources renouvelables, en 2009, en Europe (Commission Européenne, 2010) | 23 |
| Figure I-5 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur, dans des villes à haut revenu (UN-HABITAT, 2008) | 25 |
| Figure I-6 : Vue des façades sud de l'écoquartier BedZED | 33 |
| Figure I-7 : Schéma d'un projet d'habitations conçues selon le concept d'enveloppe solaire (Knowles, 2003) | 35 |
| Figure I-8 : Habitations à Acoma Pueblo adaptées au soleil d'été et d'hiver (à gauche), et agencées de façon à limiter leur ombrage mutuel durant l'hiver (à droite)..... | 35 |
| Figure I-9 : Exemple de "self-shading building" : la banque d'Israel, Jerusalem | 36 |
| Figure I-10 : Centrales solaires thermodynamiques à concentration à tour (à gauche) et à miroirs cylindro-paraboliques (à droite)..... | 39 |
| Figure I-11 : Schéma de fonctionnement d'une cellule PV | 40 |
| Figure I-12 : Centrale PV "Copper Mountain Solar Facility" dans le Nevada (150 MWc).. | 41 |
| Figure I-13 : Centrale PV en toiture de 694 kWc sur un entrepôt (à gauche) et sur le toit d'un particulier avec 2 kWc (à droite)..... | 41 |
| Figure I-14 : Intégration de cellules PV dans une structure transparente, dans la gare principale de Berlin..... | 42 |
| Figure I-15 : Spectre solaire extraterrestre (en bleu), sensibilité spectrale (en rouge), et principaux domaines de longueur d'onde | 43 |
| Figure I-16 : Efficacité lumineuse relative spectrale (CIE, 1988)..... | 44 |
| Figure I-17 : Réflexion spéculaire (à gauche) et réflexion diffuse (à droite)..... | 46 |
| Figure I-18 : Schéma et photographie d'un canyon urbain (rue Royale à Lyon)..... | 50 |
| Figure I-19 : Schéma des 4 typologies urbaines (à gauche) et exemples en 3D (à droite)... | 52 |
| Figure I-20 : Illustration du résultat de la méthode iso-shadow | 53 |
| Figure I-21 : Valeurs de SF pour différentes orientations de rues, pour différents rapports d'aspect (H/W) l'été (juin/juillet), et l'hiver (décembre/janvier) au sol et pour les façades | 56 |
| Figure I-22 : Enveloppe solaire ne nuisant pas au voisinage (Capeluto et Shaviv, 1997).... | 57 |
| Figure I-23 : Caractérisation de la couche limite urbaine (Gyr et Rys, 1995) | 59 |
| Figure I-24 : Écart de température entre une zone rurale et une zone urbaine en fonction du rapport H/W (T. R. Oke, 1988)..... | 59 |
| Figure I-25 : Schéma d'un canyon urbain vu de profil..... | 61 |
| Figure I-26 : Schéma d'un canyon urbain vu de dessus permettant de définir le SFA | 62 |
| Figure I-27 : Schéma d'une grille de bâtiments en forme de croix (à gauche) et vue en 3D du profil de ces bâtiments (à droite) | 63 |
| Figure I-28 : Découpage d'une photo fisheye en anneaux pour estimer le SVF | 64 |

| | |
|--|-----|
| Figure I-29 : Calcul du SVF à l'aide d'un traitement d'image..... | 65 |
| Figure I-30 : Éclairement lumineux annuel, sans la tour (à gauche), et avec la tour avec un facteur de réflexion (rho) de 0 (au milieu) ou de 0,5 (à droite)..... | 68 |
| Figure I-31 : Résultat du calepinage d'un bâtiment avec prise en compte des obstacles et de leur ombre portée (225 modules soit 38 kWc pour 972 m ²) | 69 |
| Figure I-32 : Différentes enveloppes de bâtiments évaluées pour l'analyse de la forme permettant de collecter un maximum d'énergie solaire (Lobaccaro et al., 2012), la signification des couleurs n'est pas donnée dans l'article | 73 |
| Figure I-33 : Validation de données à partir de différentes sources | 74 |
| Figure II-1 : Calcul du potentiel solaire de deux quartiers de Genève | 80 |
| Figure II-2 : Différence entre Modèle Numérique de Terrain (MNT) et Modèle Numérique d'Élévation (MNE) | 81 |
| Figure II-3 : Problèmes liés à une résolution insuffisante du maillage d'une base de données altimétriques | 81 |
| Figure II-4 : Intégration du modèle 3D dans Google Earth (à gauche), photographie du lieu réel (à droite) | 83 |
| Figure II-5 : Schéma de la trajectoire de la terre autour du soleil | 89 |
| Figure II-6 : Écart entre quatre algorithmes de déclinaison solaire et l'algorithme de Walraven (D. Dumortier, 1995)..... | 89 |
| Figure II-7 : Schéma de la géométrie solaire dans le repère local..... | 90 |
| Figure II-8 : Exemple de diagramme solaire pour un lieu en France, latitude 43°18'29" N et longitude 6°09'14" E | 91 |
| Figure II-9 : Équation du temps | 93 |
| Figure II-10 : Spectre solaire extraterrestre et AM 1,5 (ASTM G173-03, 2012) | 94 |
| Figure II-11 : pyranomètre (à gauche), pyréliomètre (au milieu) et luxmètre avec arceau pour mesurer le rayonnement diffus (à droite)..... | 96 |
| Figure II-12 : Carte des écarts types du cumul annuel de l'éclairement global horizontal entre 6 BDD obtenues à partir d'images satellitaires | 98 |
| Figure II-13 : Réseau de stations du WRDC entre 1964 et 1993..... | 100 |
| Figure II-14 : Distance de 100 m entre la station IDMP et la maquette d'après l'outil de mesure de Google Earth | 102 |
| Figure II-15 : Vue panoramique des instruments de la station IDMP de Vaulx-en-Velin, durant l'année 2005..... | 103 |
| Figure II-16 : Schéma de la position du soleil et d'un élément de ciel..... | 105 |
| Figure II-17 : Distribution des luminance pour des types de ciels typiques | 105 |
| Figure II-18 : Courbes d'indicatrices de gradation (à gauche), et de diffusion (à droite), retenues par la CIE (CIE, 2004)..... | 110 |
| Figure II-19 : Découpage du ciel en 10 sections parallèles au plan horizontal | 112 |
| Figure II-20 : Type de ciel CIE (en rouge) calculé pour un jour avec un ciel peu nuageux (à gauche) et un jour avec un ciel couvert (à droite) | 113 |
| Figure II-21 : Bâtiment émettant une lumière éblouissante (à gauche) et bâtiment en subissant les effets (à droite) (Shih et Huang, 2001)..... | 116 |
| Figure II-22 : Albédo urbain en fonction du rapport d'aspect pour une hauteur de soleil de 30° (Tsangrassoulis et Santamouris, 2003)..... | 117 |
| Figure II-23 : Exemple de repérage des zones passives pour un étage (à gauche), courbes qui permettent de calculer la consommation (à droite) | 118 |

| | |
|---|-----|
| Figure II-24 : MNE avec hauteur relative en niveaux de gris (à gauche), vue en 3D de l'Obstruction Angle (OA) d'une façade (à droite) en rouge | 119 |
| Figure II-25 : Consommation d'énergie annuelle d'après la méthode LT du 2 ^{ème} étage, de trois villes européennes, avec WWR fixé à 0,5 (C. Ratti et al., 2005) | 119 |
| Figure II-26 : découpage du diagramme solaire (à gauche) création d'un ciel en combinant deux ciels de base (à droite) | 120 |
| Figure II-27 : Énergie solaire reçue annuellement par m ² de façade (méthode ICUE) | 121 |
| Figure II-28 : Exemple d'utilisation de la rose d'orientations (Compagnon, 2004) | 121 |
| Figure II-29 : Variation de l'absorption du rayonnement solaire par le sol, les façades, et les toits, ainsi que le rayonnement total réfléchi, dans une cour d'immeubles en juin et décembre (Trenkle, 1988)..... | 122 |
| Figure II-30 : Photo fisheye du ciel dans une rue (à gauche), et partie visible de la trajectoire du soleil de la même rue pendant un jour donné de l'année (à droite), selon la méthode de Chapman et al. (Chapman et al., 2001) | 124 |
| Figure II-31 : Éclairage énergétique global annuel cumulé à partir de r.sun pour un plan horizontal (à gauche), pour un plan orienté sud incliné à 15° (au centre) et pour un plan orienté sud incliné à 25° (à droite)..... | 126 |
| Figure II-32 : Rendu en 3D d'une toiture complexe (à gauche) et carte de rendu spatial de l'énergie reçue au sol à l'intérieur du bâtiment (à droite) (Andersen et al., 2008)..... | 129 |
| Figure II-33 : Géométrie 3D d'un canyon, importée dans Citysim (à gauche), et vue rapprochée d'une zone représentant une sonde (à droite)..... | 131 |
| Figure II-34 : Résultat de la projection d'un triangle dans Heliodon (crédit image : Luc Masset, Université de Liège) | 134 |
| Figure II-35 : Schéma de l'analogie de Nusselt (Tobler, Neumann, Sbert, et Purgathofer, 1998) | 135 |
| Figure II-36 : Éclairage lumineux horizontal, sans obstruction, pour la journée du 10 août 2012 | 136 |
| Figure II-37 : Écarts relatifs entre les mesures de la station IDMP et les logiciels, pour la journée du 10 août 2012 | 137 |
| Figure II-38 : Écart entre la déclinaison solaire de différents algorithmes par rapport à celui de Walraven..... | 138 |
| Figure II-39 : Éclairage lumineux horizontal pour la journée du 19 octobre 2011..... | 139 |
| Figure II-40 : Éclairage lumineux sur une façade verticale plein sud, sans obstruction, pour la journée du 10 août 2012 | 139 |
| Figure II-41 : Ombrage lointain vu de la station IDMP de l'ENTPE (Kobav, 2009) | 140 |
| Figure III-1 : Exemple de "tone mapping" d'une image HDR à partir de 3 photos..... | 146 |
| Figure III-2 : Carte d'albédo du centre ville de Strasbourg (Najjar et al., 2004) | 147 |
| Figure III-3 : Caractérisation du tissu urbain Lyonnais réalisé par l'auteur | 148 |
| Figure III-4 : Détail du rapport d'aspect des rues de Lyon. Les couleurs en abscisse se rapportent à celles utilisées dans la Figure III-3 | 149 |
| Figure III-5 : Localisation et propriétés des rues sélectionnées | 150 |
| Figure III-6 : Correspondance entre la luminosité L* des pixels et la luminance L, pour le boîtier Canon EOS 50D utilisé (numéro de série : #2060709339) | 152 |
| Figure III-7 : Gamme de luminances mesurable par le Canon EOS 50D #2060709339 | 152 |
| Figure III-8 : Photographie du mât sur lequel sont montés les instruments de mesure. Durant la mesure, celui qui tient le mât se place derrière pour ne pas cacher de sonde..... | 155 |

| | |
|--|-----|
| Figure III-9 : Distribution des types de ciel pour les trois journées de mesure sur site..... | 156 |
| Figure III-10 : Comparaison des mesures de longueurs de façades pour 3 sources de données par rapport aux mesures sur le terrain | 157 |
| Figure III-11 : Différence de revêtement entre le bas de l'immeuble et le reste de la façade, séparés par un trait rouge | 158 |
| Figure III-12 : Distribution en fréquence des facteurs de réflexion lumineux mesurés dans les rues de Lyon..... | 159 |
| Figure III-13 : Schéma des méthodes permettant de mesurer la largeur (à gauche) et la hauteur (à droite) d'une fenêtre à l'aide d'un télémètre | 161 |
| Figure III-14 : Distribution des valeurs mesurées du rapport largeur/hauteur (à gauche) et des valeurs de largeur (à droite) de 68 fenêtres dans les rues sélectionnées | 161 |
| Figure III-15 : Taux de vitrage calculés à partir des mesures pour chacune des rues..... | 162 |
| Figure III-16 : Étapes du calcul du taux de vitrage à partir d'une photographie..... | 164 |
| Figure III-17 : Photographie d'une façade avec un petit appareil photo numérique (en haut) et vue de la même façade proposée par Google Street View (en bas) | 166 |
| Figure III-18 : Même façade que sur la Figure III-17 donnée par UrbanDive de Mappy ... | 167 |
| Figure III-19 : Schéma utilisé pour calculer le SVF d'une façade | 168 |
| Figure III-20 : Repérage des coins d'un bâtiment à pointer (à gauche), et aperçu de la portion de ciel occultée par ce même bâtiment (en violet à droite)..... | 170 |
| Figure III-21 : Photographies fisheye utilisées pour calculer le SVF de chaque rue | 171 |
| Figure III-22 : Valeurs de SVF obtenues à partir des deux méthodes, pour les rues de référence..... | 172 |
| Figure III-23 : Correspondance entre les valeurs de courant mesurées par les quatre sondes utilisées sur le terrain, et les éclaircissements mesurés par la station IDMP. Données du 10/02/12 entre 10h et 16h | 174 |
| Figure III-24 : Données utilisées pour calculer le coefficient d'étalonnage (à gauche) et résultat de la corrélation après application de ce coefficient (à droite) | 175 |
| Figure III-25 : Schémas de la position de l'appareil sur le mât, permettant d'expliquer la rotation des images obtenues | 176 |
| Figure III-26 : Rotation de la carte de luminances et repérage de la position du pied du bâtiment et du centre de l'image ainsi que de la position des sondes (points rouges) | 176 |
| Figure III-27 : Correspondance entre la position de la sonde B dans le canyon (à gauche) et sa position sur l'image (à droite) | 177 |
| Figure III-28 : Élimination des pixels aberrants dans les zones blanches..... | 178 |
| Figure III-29 : Vue 3D provenant de Bati3D avec textures ajoutées (à gauche) et photo aérienne de la vraie rue (à droite) | 180 |
| Figure III-30 : Erreur dans la géométrie provenant de relevés LIDAR | 181 |
| Figure III-31 : Lignes selon lesquelles sont alignées les positions du mât dans la rue Royale (à gauche) et Fénelon (à droite) | 182 |
| Figure III-32 : Schéma de la maquette en 3D | 184 |
| Figure III-33 : Photographie aérienne de la maquette | 185 |
| Figure III-34 : Structure de la maquette | 186 |
| Figure III-35 : Adaptabilité de la maquette permettant de modifier le rapport d'aspect (à gauche) et de changer les façades (à droite) | 187 |
| Figure III-36 : Quelques de valeurs de H/W et W/L que peut prendre la maquette | 188 |

| | |
|---|-----|
| Figure III-37 : Photo du décalage vertical (à gauche), schéma de la conséquence sur l'éclairement au sein du canyon (à droite)..... | 189 |
| Figure III-38 : Schéma de la maquette vue de dessus..... | 190 |
| Figure III-39 : Façades utilisées sur la maquette (à gauche) et vue rapprochée des revêtements (à droite) | 193 |
| Figure III-40 : Gabarit pour la disposition des fenêtres et rendu dans le canyon | 194 |
| Figure III-41 : Anneau utilisé pour estimer le relief | 197 |
| Figure III-42 : Prise en compte des mailles significatives..... | 197 |
| Figure III-43 : Calcul de l'angle d'obstruction | 198 |
| Figure III-44 : Image prise avec un objectif fisheye depuis le centre de la maquette avant la mise en place des façades, avec un axe de prise de vue vertical | 199 |
| Figure III-45 : Relation entre la hauteur angulaire d'une obstruction et la distance par rapport au centre de l'image du pixel correspondant | 200 |
| Figure III-46 : Combinaison de l'obstruction obtenue avec les deux méthodes..... | 201 |
| Figure III-47 : Correspondance entre le relief calculé (en rouge) et une photo panoramique centrée sur le sud | 202 |
| Figure III-48 : Obstruction intégrée au diagramme solaire..... | 203 |
| Figure III-49 : Représentation du relief sous forme d'un rideau en 3D..... | 204 |
| Figure III-50 : Photo d'une sonde LI-COR de type LI-210, modèle qui a été utilisé sur la maquette | 205 |
| Figure III-51 : Réponse spectrale des cellules LI-COR (données fabricant)..... | 205 |
| Figure III-52 : Intégration des sondes dans les façades..... | 206 |
| Figure III-53 : "Percent True Response" mesuré en laboratoire avec un goniomètre | 208 |
| Figure III-54 : Écart entre les valeurs mesurées de PTR d'une sonde en fonction de l'angle d'incidence par rapport aux valeurs fournies par le fabricant..... | 209 |
| Figure III-55 : Écart relatif entre les éclairements lumineux pour un plan horizontal avec correction en cosinus idéale et la correction réelle (heures d'hiver) | 209 |
| Figure III-56 : Éclairement lumineux modélisé pour un plan vertical orienté vers l'est, avec une correction en cosinus idéale et réelle | 210 |
| Figure III-57 : Écart relatif entre les valeurs d'éclairement de la Figure III-56..... | 211 |
| Figure III-58 : Montage utilisé pour déterminer les coefficients d'étalonnage des sondes..... | 212 |
| Figure III-59 : Comparaison entre une sonde LI-COR et la sonde de référence | 213 |
| Figure III-60 : Transposition des éclairement lumineux mesurés par la station IDMP dans le même plan qu'une sonde LI-COR..... | 213 |
| Figure III-61 : Corrélacion entre les éclairements lumineux mesurés par la sonde IDMP transposée comme I11 et les éclairements lumineux mesurés par la sonde I11 avec les coefficients C_h et C_t | 216 |
| Figure III-62 : Effet de l'utilisation d'une moyenne glissante sur les valeurs mesurées | 217 |
| Figure III-63 : Récupération des données..... | 219 |
| Figure III-64 : Aperçu du programme d'analyse des données développé pour la thèse..... | 219 |
| Figure III-65 : Éclairement diffus horizontal mesuré (EED) et calculé à partir de EEG et EES pour une journée de ciel sans nuages (à gauche) et une journée de ciel couvert (à droite)..... | 221 |
| Figure III-66 : Obstruction causée par un corbeau de passage..... | 222 |
| Figure III-67 : Résultat de la règle de l'écart relatif mesure/modèle supérieur à 50% utilisée pour éliminer les points de mesure douteux, pour H/W=1 avec façades blanches | 224 |

| | |
|--|-----|
| Figure III-68 : Pourcentage de mesures exclues pour chaque sonde | 224 |
| Figure III-69 : Fréquence à laquelle l'écart entre les mesures et les modèles (soit Daysim, soit Citysim) dépasse 50% | 225 |
| Figure III-70 : Fréquence d'observation des types de ciel CIE dans la BDD | 226 |
| Figure III-71 : Fréquences mensuelles d'observation des ciels CIE dans la BDD | 227 |
| Figure III-72 : Fraction d'insolation de la période de mesure par rapport aux valeurs sur 30 ans pour le même lieu. Les points rouges correspondent à la période de mesure sur la maquette | 228 |
| Figure IV-1 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=0,5 avec les façades noires le 22/06/12 | 232 |
| Figure IV-2 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=0,5 avec les façades blanches le 29/06/12 | 233 |
| Figure IV-3 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=0,5 avec les façades en crépi le 17/07/12 | 234 |
| Figure IV-4 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=0,5 avec les façades en crépi vitré le 19/08/12 | 235 |
| Figure IV-5 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=1 avec les façades noires le 25/06/11 | 235 |
| Figure IV-6 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=1 avec les façades blanches le 01/08/11 | 236 |
| Figure IV-7 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=1 avec les façades en crépi le 03/10/11 | 237 |
| Figure IV-8 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=1 avec les façades en crépi vitré le 25/12/11 | 238 |
| Figure IV-9 : Influence du rapport d'aspect sur la hauteur, sur la façade opposée, que peuvent atteindre les réflexions spéculaires dans un canyon | 238 |
| Figure IV-10 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=2 avec les façades noires le 01/03/12 | 239 |
| Figure IV-11 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=2 avec les façades blanches le 15/03/12 | 240 |
| Figure IV-12 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=2 avec les façades en crépi le 03/05/12 | 241 |
| Figure IV-13 : Éclairiments lumineux mesurés sur la maquette pour H/W=2 avec les façades en crépi vitré le 01/06/12 | 241 |
| Figure IV-14 : Ensemble des positions du soleil disponibles, pour chaque configuration de la maquette | 243 |
| Figure IV-15 : Schéma d'un canyon avec une façade transparente | 245 |
| Figure IV-16 : Pourcentage de situations dans la BDD, pour lesquelles le soleil est visible par une des sondes selon le critère géométrique uniquement | 247 |
| Figure IV-17 : Pourcentage de situations dans la BDD pour lesquelles le soleil est géométriquement visible par au moins une sonde, mais avec EVSN<12 klux | 248 |
| Figure IV-18 : Pourcentage du temps dans la BDD où le soleil est caché pour chaque sonde avec le critère géométrique et le critère climatique (selon l'OMM) | 249 |
| Figure IV-19 : Écart absolu entre le pourcentage de situations avec soleil visible suivant le critère géométrique et suivant les critères géométrique et climatique | 249 |
| Figure IV-20 : Pourcentage de situations avec soleil visible pour H/W=0,5 | 250 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV-21 : Pourcentage de situations avec soleil visible pour H/W=1 | 251 |
| Figure IV-22 : Pourcentage de situations avec soleil visible pour H/W=2 | 252 |
| Figure IV-23 : Pourcentage de situations avec soleil visible depuis la sonde au sol en fonction du rapport d'aspect | 253 |
| Figure IV-24 : Pourcentage de situations avec soleil visible depuis le centre de chaque étage en fonction du rapport d'aspect | 254 |
| Figure IV-25 : Nombre total de mesures effectuées pour chaque rapport d'aspect, par type de ciel..... | 255 |
| Figure IV-26 : Éclairement relatif mesuré au sol pour chaque rapport d'aspect et pour chaque revêtement sans soleil visible..... | 257 |
| Figure IV-27 : Distribution des hauteurs angulaires du soleil pour les ciels CIE 8..... | 258 |
| Figure IV-28 : Variations de la valeur médiane de l'éclairement relatif, pour la sonde au sol | 259 |
| Figure IV-29 : Écart relatif entre les valeurs médianes de chaque type de revêtement, par rapport aux façades noires..... | 260 |
| Figure IV-30 : Éclairement relatif au sol pour chaque rapport d'aspect avec soleil visible | 261 |
| Figure IV-31 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec H/W=0,5 pour les situations sans soleil visible | 264 |
| Figure IV-32 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec H/W=0,5 pour les situations sans soleil visible | 265 |
| Figure IV-33 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec H/W=1 pour les situations sans soleil visible | 266 |
| Figure IV-34 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec H/W=1 pour les situations sans soleil visible | 267 |
| Figure IV-35 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec H/W=2 pour les situations sans soleil visible | 268 |
| Figure IV-36 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec H/W=2 pour les situations sans soleil visible | 269 |
| Figure IV-37 : Influence du revêtement des façades en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations sans soleil direct..... | 270 |
| Figure IV-38 : Influence de la hauteur de l'étage en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations sans soleil..... | 273 |
| Figure IV-39 : Moyenne des éclairements relatifs pour tous les types de ciel par étage et par type de revêtement pour chaque rapport d'aspect, sans soleil visible | 275 |
| Figure IV-40 : Moyenne des éclairements relatifs pour tous les types de ciel par étage et par rapport d'aspect pour chaque revêtement, sans soleil visible | 276 |
| Figure IV-41 : Pourcentage de mesures en présence de rayonnement solaire direct | 278 |
| Figure IV-42 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec H/W=0,5 pour les situations avec soleil visible | 280 |
| Figure IV-43 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec H/W=0,5 pour les situations avec soleil visible | 281 |
| Figure IV-44 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec H/W=1 pour les situations avec soleil visible..... | 282 |
| Figure IV-45 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec H/W=1 pour les situations avec soleil visible..... | 283 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV-46 : Éclairement relatif pour les étages 1 à 3 des façades Est et Ouest, avec H/W=2 pour les situations avec soleil visible..... | 284 |
| Figure IV-47 : Éclairement relatif pour les étages 4 à 6 des façades Est et Ouest, avec H/W=2 pour les situations avec soleil visible..... | 285 |
| Figure IV-48 : Influence du revêtement des façades en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations avec soleil..... | 286 |
| Figure IV-49 : Influence de la hauteur de l'étage en fonction du type de ciel, de l'étage et du rapport d'aspect, pour les situations avec soleil..... | 287 |
| Figure IV-50 : Éclairement relatif moyen pour le revêtement crépi, tous types de ciel confondus..... | 289 |
| Figure IV-51 : Éclairéments relatifs moyens pour chaque rapport d'aspect par type de ciel, pour le revêtement crépi, avec et sans soleil visible..... | 290 |
| Figure IV-52 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement noir (en klux)..... | 292 |
| Figure IV-53 : Positions du soleil disponibles dans la BDD, pour H/W=2, avec les revêtements noir et blanc..... | 293 |
| Figure IV-54 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement blanc (en klux)..... | 295 |
| Figure IV-55 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement crépi (en klux)..... | 296 |
| Figure IV-56 : Corrélations entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour le revêtement crépi+verre (en klux)..... | 297 |
| Figure IV-57 : Coefficients de corrélation par type de ciel par logiciel pour toutes les combinaisons de rapports d'aspect et de revêtements..... | 299 |
| Figure IV-58 : Éclairéments relatifs pour la partie sud de la rue des Charmettes. Façades Est dos au soleil et façades Ouest face au soleil..... | 301 |
| Figure IV-59 : Photos fisheye des façades de la partie sud de la rue des Charmettes..... | 302 |
| Figure IV-60 : Photos fisheye des façades de la partie nord de la rue des Charmettes..... | 302 |
| Figure IV-61 : Éclairéments relatifs pour la partie nord de la rue des Charmettes. Façades Est dos au soleil et façades Ouest face au soleil..... | 303 |
| Figure IV-62 : Photos fisheye des façades de la rue Fénelon..... | 303 |
| Figure IV-63 : Éclairéments relatifs pour la rue Fénelon. Façades sud dos au soleil et façades nord face au soleil..... | 304 |
| Figure IV-64 : Photos fisheye des façades de la rue Molière..... | 305 |
| Figure IV-65 : Éclairéments relatifs pour la rue Molière. Façades Est dos au soleil et façades Ouest face au soleil..... | 305 |
| Figure IV-66 : Photo correspondant à la série de mesures de la façade Ouest à 50 m..... | 306 |
| Figure IV-67 : Éclairéments relatifs pour la rue Leynaud. Façades sud dos au soleil et façades nord face au soleil..... | 307 |
| Figure IV-68 : Photos fisheye des façades de la rue Leynaud..... | 307 |
| Figure IV-69 : Photos fisheye des façades de la rue Royale..... | 308 |
| Figure IV-70 : Éclairéments relatifs pour la rue Royale. Façades Est dos au soleil et façades nord face au soleil..... | 309 |
| Figure IV-71 : Idem que la Figure IV-70 mais avec une échelle plus adaptée..... | 309 |
| Figure IV-72 : Fréquences à laquelle chaque configuration de la maquette est la plus représentative des mesures sur site..... | 310 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV-73 : Différentes cartes de luminances : rue des Charmettes (A), rue Royale (B et C) et rue Molière (D) | 312 |
| Figure IV-74 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 40 m dans la partie sud de la rue des Charmettes..... | 314 |
| Figure IV-75 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 50 m dans la partie nord de la rue des Charmettes | 315 |
| Figure IV-76 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 70 m dans la partie sud de la rue des Charmettes..... | 317 |
| Figure IV-77 : Carte de luminances (à gauche) et photo (à droite) de la série de mesures à 10 m dans la rue Molière..... | 318 |
| Figure IV-78 : Corrélation entre les éclairagements relatifs mesurés par les sondes photométriques et ceux obtenus à partir des cartes de luminances..... | 320 |
| Figure IV-79 : Corrélation entre les éclairagements relatifs mesurés par les sondes photométriques et ceux modélisés par Daysim | 323 |
| Figure IV-80 : Vues 3D et photographie de la rue Royale..... | 323 |
| Figure IV-81 : Plaquage des luminances obtenues avec Daysim, sur la géométrie de la rue Royale | 324 |
| Figure IV-82 : Carte de luminances obtenue à partir des photos (à gauche), et des valeurs modélisées avec Daysim après projection (à droite) | 325 |
| Figure IV-83 : Carte de l'écart relatif entre les luminances L_{daysim} obtenues depuis les éclairagements lumineux simulés par Daysim et celles mesurées à partir des photos (L_{photo}) | 326 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau II-1 : Paramètres permettant de décrire les types de ciel CIE (CIE, 2004) | 111 |
| Tableau II-2 : Influence de la finesse du découpage de la voûte céleste sur l'erreur dans la détermination du type de ciel..... | 113 |
| Tableau II-3 : Caractéristiques concernant l'utilisation des logiciels sélectionnés | 141 |
| Tableau II-4 : Temps de simulation pour H/W=1, au pas horaire | 142 |
| Tableau III-1 : Hauteur des sondes placées sur le mât lors des mesures | 154 |
| Tableau III-2 : Taux de vitrage calculé à partir de la méthode photographique..... | 164 |
| Tableau III-3 : Valeurs de SVF calculées à partir des photos fisheye | 172 |
| Tableau III-4 : Temps mis par le soleil pour couvrir le décalage vertical de 3 mm d'une façade en fonction du rapport d'aspect..... | 191 |
| Tableau III-5 : Facteurs de réflexion lumineux mesurés pour les revêtements des façades de la maquette | 195 |
| Tableau III-6 : Correspondance entre la hauteur des sondes sur la maquette et la hauteur correspondante sur un bâtiment de 20 m de haut. | 207 |
| Tableau III-7 : Orientations et inclinaisons calculées pour chaque sonde à partir de la procédure décrite précédemment | 215 |
| Tableau III-8 : Quantité de jours de mesures pour chaque configuration de la maquette ... | 220 |
| Tableau IV-1 : Variation du prix du mètre carré d'un logement à l'achat, en fonction de l'étage où il se situe (Chevillard, 2013) | 253 |
| Tableau IV-2 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-74 .. | 314 |
| Tableau IV-3 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-75 .. | 315 |
| Tableau IV-4 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-76 .. | 316 |
| Tableau IV-5 : Luminances et éclairagements lumineux correspondants à la Figure IV-77 .. | 317 |
| Tableau IV-6 : Pourcentages de séries de mesures remplissant les critères de validation .. | 319 |
| Tableau IV-7 : Configurations de la maquette représentatives des l'éclairagements relatifs mesurés sur site à partir des cartes de luminances | 321 |

Annexes

| | |
|--|-----|
| Annexe A. Précautions à prendre pour la détermination des masques à partir d'un objectif fisheye | 357 |
| Annexe B. Confirmation de la bonne correspondance des sondes LI-COR utilisées sur la maquette avec la sonde de référence de la station IDMP..... | 360 |
| Annexe C. Comparaison de différentes méthodes de mesure du facteur de réflexion lumineux des matériaux..... | 361 |
| Annexe D. Influence des points de colle de la plaque de verre, sur le facteur de réflexion des façades vitrées..... | 367 |
| Annexe E. Format de la BDD utilisé pour stocker les mesures effectuées sur la maquette | 370 |
| Annexe F. Numérotation des sondes | 371 |
| Annexe G. Unités PV..... | 372 |
| Annexe H. Mesure des dimensions d'une fenêtre à l'aide d'un télémètre | 373 |
| Annexe I. Caractérisation de la projection angulaire de l'objectif fisheye..... | 374 |
| Annexe J. Loi des multiples réflexions applicable au canyon urbain | 382 |
| Annexe K. Facteur de forme..... | 384 |
| Annexe L. Visibilité du soleil par les sondes selon le critère géométrique | 385 |
| Annexe M. Modélisation de l'éclairement lumineux avec des données produites par Heliodon | 387 |

Annexe A. Précautions à prendre pour la détermination des masques à partir d'un objectif fisheye

Influence de la mise au point de l'objectif sur le diamètre de l'image

La mise au point de l'objectif est un paramètre essentiel au moment de prendre la photo qui va permettre de définir la ligne d'horizon en dessous de laquelle le rayonnement solaire est bloqué. L'objectif fisheye Sigma 4,5 f/2,8 qui a été utilisé permet de régler la mise au point. Ce paramètre permet de régler la netteté de l'image en fonction de la distance à laquelle se trouve le sujet du cliché. En prenant une photographie du ciel, le réglage de mise au point vers l'infini semble logique, puisque les obstructions se trouvent suffisamment loin. Lors du travail sur la détermination de l'ombrage de la maquette, une singularité a été observée : le diamètre du disque qui contient l'image varie en fonction de la mise au point. La Figure A-1 montre l'écart que l'on peut obtenir entre les deux valeurs extrêmes que l'on peut atteindre en tournant la bague de mise au point.



Figure A-1 : Différence entre les deux diamètres de projection de l'image obtenue avec l'objectif fisheye en mise au point min et max

Les deux photos ont été prises avec un retardateur dans une sphère d'Ulbricht fermée d'un diamètre de 1,65 m. Du fait de sa géométrie, la sphère est particulièrement bien adaptée à

l'analyse de l'image prise avec un objectif fisheye dont l'angle de vue est de 180° . La Figure A-1 représente la différence entre les deux photos. La taille de l'anneau obtenu est de 35 pixels, sachant que le rayon du disque significatif avec une mise au point à l'infini est de 489 pixels, l'écart relatif est de 7,2%. Or il existe une relation linéaire entre l'angle d'un point sur la voûte par rapport au zénith et la distance d'un pixel représentant ce point par rapport au centre du disque. Étant donné que le rayon représente un angle de 90° , l'erreur maximale obtenue en réglant la mise au point la plus courte possible est de $6,4^\circ$. Il est donc très important de prendre soin de régler la mise au point à l'infini lors de ce type de démarche.

Variation de la position de l'image en fonction du couple boîtier/objectif

Le laboratoire disposant de deux boîtiers identiques (Canon EOS 50D) et de deux objectifs identiques (Sigma 4,5 f/2,8), la variation de la taille de l'image en fonction de la mise au point a été vérifiée avec l'autre appareil. Le Tableau A-1 montre que la position du disque sur l'image rectangulaire n'était pas identique avec une mise au point à l'infini. Chaque image du tableau est le résultat de la différence entre deux images prises avec la mise au point au minimum et au maximum. Un pixel noir correspond à une zone visible lors de la mise au point à l'infini mais pas avec la mise au point la plus courte.





| | Boitier 1 | Boitier 2 |
|-----------------------------------|--|---|
| objectif 2 moins objectif 1 |  |  |
| | Objectif 1 | Objectif 2 |
| boitier 2 moins boitier 1 |  |  |

Tableau A-1 : Soustraction des images obtenues à partir de différentes combinaisons de boitier et d'objectif

Le changement du boitier pour un même objectif implique une variation de la même façon qu'un changement d'objectif pour un même boitier. On peut donc en déduire que le centre de l'image produit par un couple boitier/objectif doit être déterminé et que cette valeur n'est valable que pour ce matériel dans cette configuration donnée. Les deux couples boitier/objectif ont aussi été démontés puis remontés sans les combiner pour déterminer si le démontage d'un objectif influe sur la position du centre de l'image. Après trois démontages avec photo test, il n'y a pas eu de variation de la position du disque sur le rectangle de l'image. Le démontage n'est donc pas problématique tant que le même couple boitier/objectif est utilisé, les paramètres d'étalonnages peuvent être réutilisés.

Annexe B. Confirmation de la bonne correspondance des sondes LI-COR utilisées sur la maquette avec la sonde de référence de la station IDMP

La Figure B-1 présente les éclairagements lumineux mesurés par chacune des sondes utilisées sur la maquette, après application du coefficient d'étalonnage. Les éclairagements mesurés par la sonde de référence de la station IDMP sont représentés par le trait bleu. Les mesures sont présentées pour une journée avec un ciel sans nuages alors que les coefficients d'étalonnage ont été déterminés à partir de plusieurs journées avec des conditions variées. L'écart avec la sonde de référence est faible, signe d'un bon étalonnage.

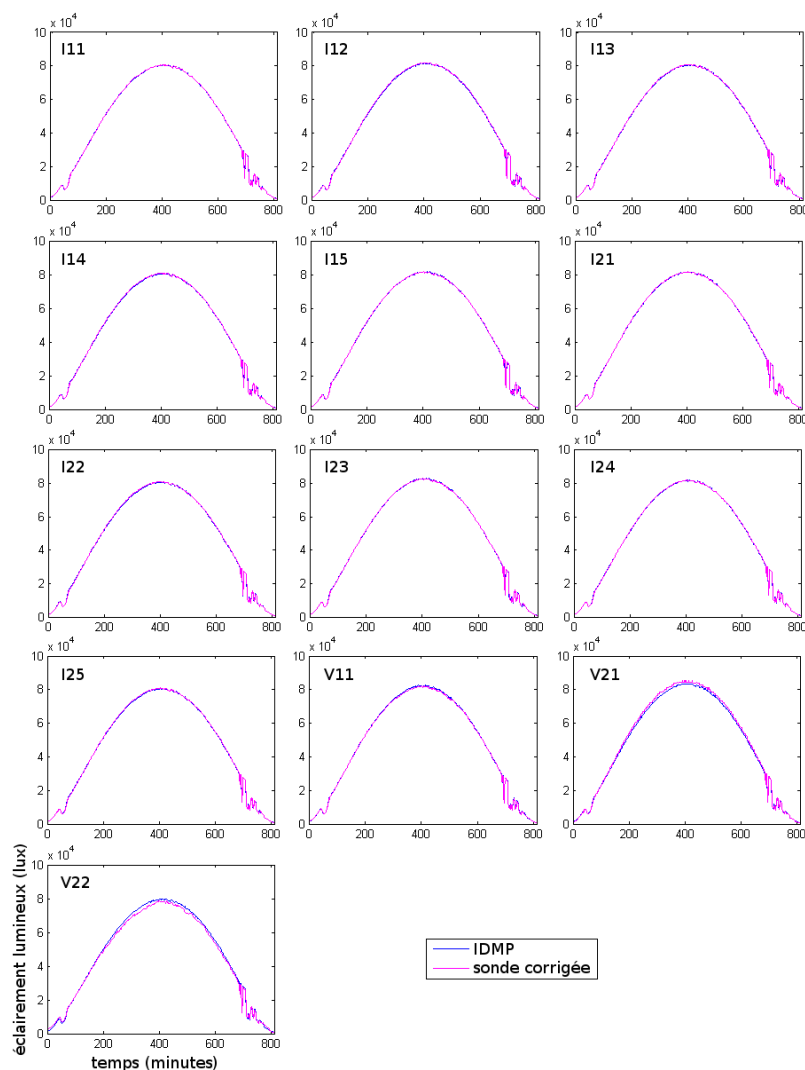


Figure B-1 : Comparaison entre les éclairagements lumineux mesurés par les sondes LI-COR de la maquette et ceux mesurés par la sonde de référence

Annexe C. Comparaison de différentes méthodes de mesure du facteur de réflexion lumineux des matériaux

Dans cette annexe, nous décrivons différentes méthodes de mesure des propriétés de surface d'un matériau à travers le facteur de réflexion. Le but est de déterminer une méthode fiable et rapide pour effectuer des mesures sur les façades des bâtiments. La méthode la plus précise consisterait à utiliser un appareil portatif capable de générer la "Bidirectional Reflectance Distribution Function" (BRDF) du revêtement de façade. La BRDF est une fonction à 4 dimensions qui décrit la façon dont la lumière est réfléchiée par le matériau dans l'espace, pour tous les angles d'incidence possibles d'une source. Il s'agit d'une donnée importante pour effectuer des comparaisons de qualité entre les mesures sur site et les simulations. Ce type d'appareil existe mais il est assez peu développé et reste à l'état de prototypes (Giardino & Brivio, 2003; Mattison et al., 1998) et (Ben-Ezra, Wang, Wilburn, Li, & Ma, 2008). Nous avons donc décidé de tester différentes méthodes permettant d'obtenir le facteur de réflexion lumineux diffus des façades. Nous nous sommes intéressés aux méthodes suivantes :

1. Utilisation du lien entre la couleur du matériau et son facteur de réflexion
2. Utilisation d'un luxmètre
3. Utilisation d'un luxmètre et d'un luminance-mètre
4. Utilisation d'un spectromètre

Nous avons testé ces 4 méthodes en effectuant des mesures à l'extérieur sur 5 murs ayant des états de surface différents (cf. Figure C-1). Nous avons choisi des murs faisant face au nord pour ne pas effectuer des mesures au soleil : le spectromètre que nous avons utilisé aurait pu saturer. Les mesures ont été prises sous des conditions de ciel clair sans nuages pour éviter une variation soudaine de la luminosité du ciel, un critère important pour des méthodes qui nécessitent des mesures successives.

Lien entre la couleur du matériau et son facteur de réflexion

L'idée de cette méthode est de déterminer la couleur moyenne de la surface dont on veut connaître la réflectance et de récupérer cette valeur dans une base de données. Nous nous sommes basé sur Dialux, un logiciel de simulation de l'éclairage qui dispose d'une base de données de facteurs de réflexion pour la presque totalité du nuancier de couleur RAL. Cette base de données contient des mesures réalisées sur des matériaux en suivant la norme allemande DIN 5036-3 (Deutsches Institut Für Normung, 1979). Les mesures ont été effectuées sur des échantillons peints mais aucune autre information n'a pu être obtenue de la part de la société qui édite le logiciel. L'information donnée par Dialux consiste en une correspondance entre une couleur définie sur l'ordinateur par ses coordonnées RVB et un facteur de réflexion lumineux.

Une photo de la zone mesurée de chaque façade doit être prise en prenant soin auparavant de faire une balance des blancs manuelle pour garantir un rendu des couleurs le plus juste possible. La balance des blancs permet d'étalonner le capteur de l'appareil pour corriger la couleur de l'éclairage ambiant. L'appareil photo dispose de quelques préréglages permettant de corriger un éclairage sous une lampe à incandescence, un ciel couvert ou un ciel ensoleillé, tous correspondent à des températures de couleur bien précises. Pour obtenir un réglage bien adapté aux conditions réelles, il est nécessaire de prendre en photo une surface blanche qui servira de référence. Après avoir effectué ce réglage, nous prenons une photo du matériau. Cette photo est ensuite importée dans un logiciel d'édition d'image. Le logiciel ImageJ se prête très bien à cette tâche : il est gratuit, léger et propose de nombreuses fonctions usuelles dans le traitement d'image (Rasband, 2008). Il permet ainsi d'obtenir un histogramme des couleurs pour une zone sélectionnée. Les photos qui ont une résolution de 3456x2304 pixels présentent un effet de vignettage assez important (coins plus sombres). Cette particularité modifie la couleur des pixels, des techniques existent pour la corriger, cependant le plus simple consiste à ne pas prendre en compte les bords de l'image. La zone sélectionnée pour calculer la couleur moyenne est alors un ovale de dimensions 2600x1700 avec son origine au point (400,300). La couleur moyenne du revêtement de façade est déterminée par l'arrondi de la moyenne de chaque composante rouge, verte et bleue. La base de données de Dialux possède 201 matériaux. L'écart quadratique moyen des composantes RVB entre chaque entrée de la base de données et la couleur moyenne est calculé. La valeur la plus petite correspond à la meilleure correspondance. Le facteur de réflexion associé à cette couleur est récupéré.

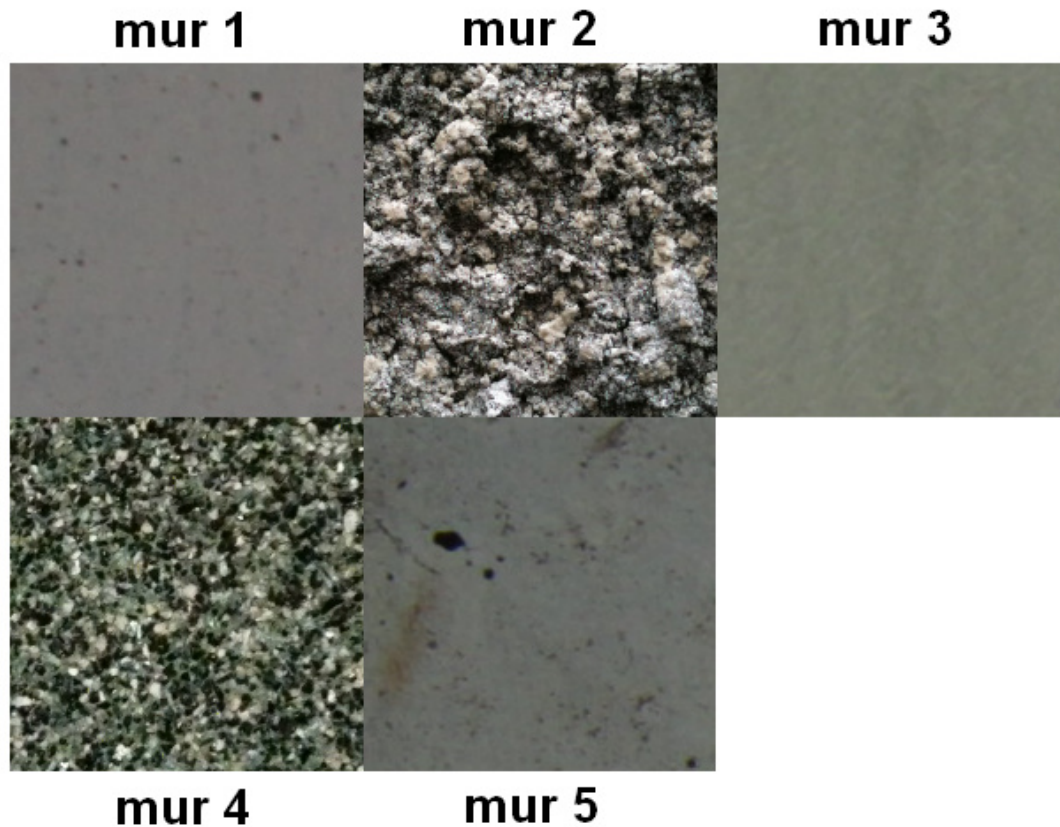


Figure C-1 : Photographies des zones des murs pour lesquelles le facteur de réflexion a été mesuré.

Luxmètre

Cette méthode provient d'une étude visant à mesurer les facteurs de réflexion des matériaux usuels utilisés pour le revêtement des façades de bâtiments aux Etats-Unis (Reagan & Acklam, 1979). Un luxmètre doit être placé à 15 cm de la façade à mesurer. Une surface dessinée par un cercle d'un diamètre minimum de 1,8 m autour du point situé à l'intersection entre la droite normale à la surface de partie sensible de l'appareil et le plan du mur doit être disponible. Dans cette zone, les propriétés du mur doivent être homogènes. L'éclairement lumineux est mesuré avec le capteur de l'appareil tourné vers l'environnement (dos au mur). Une seconde mesure est prise immédiatement après avoir pivoté l'appareil de 180° pour orienter le capteur face au mur (dos à l'environnement) sans avoir changé sa distance à ce dernier ni sa position. Le facteur de réflexion est obtenu en effectuant le rapport entre les deux valeurs mesurées :

$$\rho = \frac{\text{mesure face au mur}}{\text{mesure dos au mur}} \quad C-1$$

La mesure face au mur est une mesure de l'exitance du mur, la densité surfacique du flux qui le quitte, la mesure dos au mur correspond à l'éclairement reçu par le mur. Le rapport des deux donne donc le facteur de réflexion. Pour cette méthode, il est important de

minimiser l'obstruction créée par la personne qui tient l'appareil lorsqu'il se trouve face au mur. Pour cela nous sommes placés en dessous du luxmètre, la mesure a été effectuée en tenant l'appareil à bout de bras. Cette obstruction n'existe plus lorsqu'on retourne l'appareil car il est possible de se placer entre le luxmètre et le mur. La présence de l'obstruction pendant la première mesure mais pas durant la seconde peut mener à une erreur, c'est pourquoi il faut prendre soin de la réduire au maximum.

Luxmètre et luminance-mètre

A l'instar de la méthode précédente, il faut effectuer deux mesures dans un intervalle de temps le plus court possible afin de bénéficier du même éclairage naturel. Dans un premier temps, il faut mesurer l'éclairage lumineux en un point donné en positionnant le luxmètre directement contre la surface du mur, il faut prendre soin de tenir l'appareil en se faisant le plus petit possible pour minimiser l'influence de la personne qui mesure, en se tenant contre le mur par exemple. Ensuite la luminance est mesurée à la perpendiculaire du même point en orientant le luminance-mètre vers le mur. Pour calculer le facteur de réflexion, il faut considérer que le matériau suit la loi de Lambert. C'est-à-dire que son émittance est indépendante de la direction considérée et qu'elle est proportionnelle à la luminance avec un facteur π . Le facteur de réflexion est alors calculé à partir de la relation suivante :

$$\rho = \frac{\pi \times \text{Luminance}}{\text{Eclairage}} \quad C-2$$

Spectromètre

Un spectromètre est positionné face au mur perpendiculairement à la surface à mesurer. Une première mesure est prise sur un matériau diffus de référence placé contre le mur, au point dont on veut connaître la réflectance. La seconde mesure est faite à la même position mais directement sur le mur en ayant enlevé le standard de référence.

$$\frac{M_{mur}(\lambda)}{M_{ref}(\lambda)} = \frac{\rho_{mur}(\lambda) \times E_{mur}(\lambda)}{\rho_{ref}(\lambda) \times E_{ref}(\lambda)} \quad C-3$$

Si le temps entre les deux mesures est suffisamment court, alors :

$$E_{mur}(\lambda) = E_{ref}(\lambda) \quad C-4$$

Ce qui permet de calculer le facteur de réflexion pour chaque longueur d'onde :

$$\rho_{mur}(\lambda) = \frac{M_{mur}(\lambda)}{M_{ref}(\lambda)} \times \rho_{ref}(\lambda) \quad C-5$$

Pour obtenir le facteur de réflexion sur le domaine visible il faut intégrer de la façon suivante :

$$\rho_{visible} = \frac{\int_{380}^{780} \rho_{mur}(\lambda) \times D65(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} D65(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda} \quad C-6$$

Cette méthode permet d'utiliser le spectre standard D65 (CIE, 2007). Il s'agit d'un spectre de référence du rayonnement solaire à une température de 6500 K. Il est possible de remplacer le spectre D65 par une mesure du spectre prise à la suite des deux autres mesures. Cela permet d'éviter une erreur par rapport à l'utilisation d'un spectre standard qui n'est pas forcément représentatif du ciel au moment de la mesure. Il suffit de monter un filtre diffuseur sur le spectromètre. Pour calculer le facteur de réflexion il faut alors remplacer la fonction D65 dans l'équation C-6 par le spectre mesuré.

Comparaison des méthodes

L'avantage des méthodes 2 et 3 est que le facteur de réflexion lumineux peut être calculé directement sur le terrain, les méthodes 1 et 4 nécessitent un post-traitement sur ordinateur. La méthode 2 ne peut pas être utilisée pour une petite surface. Les méthodes 2, 3 et 4 nécessitent de faire deux mesures, l'ordre n'est pas important mais le temps entre chacune doit être le plus court possible.

La Figure C-2 montre les valeurs des facteurs de réflexion lumineux obtenus avec chacune des méthodes précédemment décrites pour les 5 murs. Il y a deux faits remarquables sur cet ensemble de diagrammes. Tout d'abord la méthode 1 (en bleu) donne presque toujours la même valeur alors que les autres méthodes donnent des résultats qui varient. Cela s'explique par le fait que la quantité de matériaux définis dans la base de données de Dialux est limitée. Ainsi lorsque deux matériaux ont des couleurs suffisamment proches, ils sont considérés comme identiques. Avec une base de données plus conséquente, le résultat aurait pu être plus intéressant. Le deuxième fait remarquable est que malgré la variation de l'ordre de grandeur du facteur de réflexion mesuré par les 3 autres méthodes, la valeur la plus grande est toujours celle donnée par le spectromètre et la plus petite par le luxmètre seul. Cette constance dans la variation traduit la régularité du protocole d'une mesure à l'autre. L'infériorité systématique de la méthode avec un luxmètre peut s'expliquer facilement. Lorsque l'instrument est positionné face au mur, la personne qui tient l'instrument crée une ombre, alors que lorsque l'instrument est dos au mur, cette ombre n'existe pas. Ainsi l'émittance mesurée est plus petite que l'émittance réelle d'où un rapport émittance par éclairage plus petit. La méthode avec le luxmètre et le luminancemètre souffre certainement aussi de cette ombre. Au contraire, la méthode avec le spectromètre ne possède pas cet inconvénient car la mesure s'effectue relativement à un échantillon de référence. La personne qui tient l'appareil doit cependant prendre soin de se trouver dans la même position pour chacune des mesures afin de minimiser l'influence de sa présence.

Pour ces raisons, la méthode du spectromètre est jugée la plus fiable, c'est elle que nous avons utilisée pour les mesures des facteurs de réflexion lumineux des façades de

bâtiment dans les rues de Lyon. Cette méthode nécessite un post-traitement sur ordinateur mais donne les meilleurs résultats et les mesures sont rapides à effectuer, ce qui est pratique lorsqu'il s'agit d'en effectuer un grand nombre, par exemple une ou plusieurs rues entières.

Nous avons vu dans la section IV.3.3.5 qu'il pouvait aussi être envisageable de mesurer le facteur de réflexion lumineux des façades à partir d'une carte de luminances : le rapport entre la luminance de la façade et la luminance de la surface de référence correspond au rapport entre le facteur de réflexion de la façade et celui de la surface de référence. Ce qui nécessite de pouvoir positionner autant de surfaces de référence que de types de revêtement sur la façade.

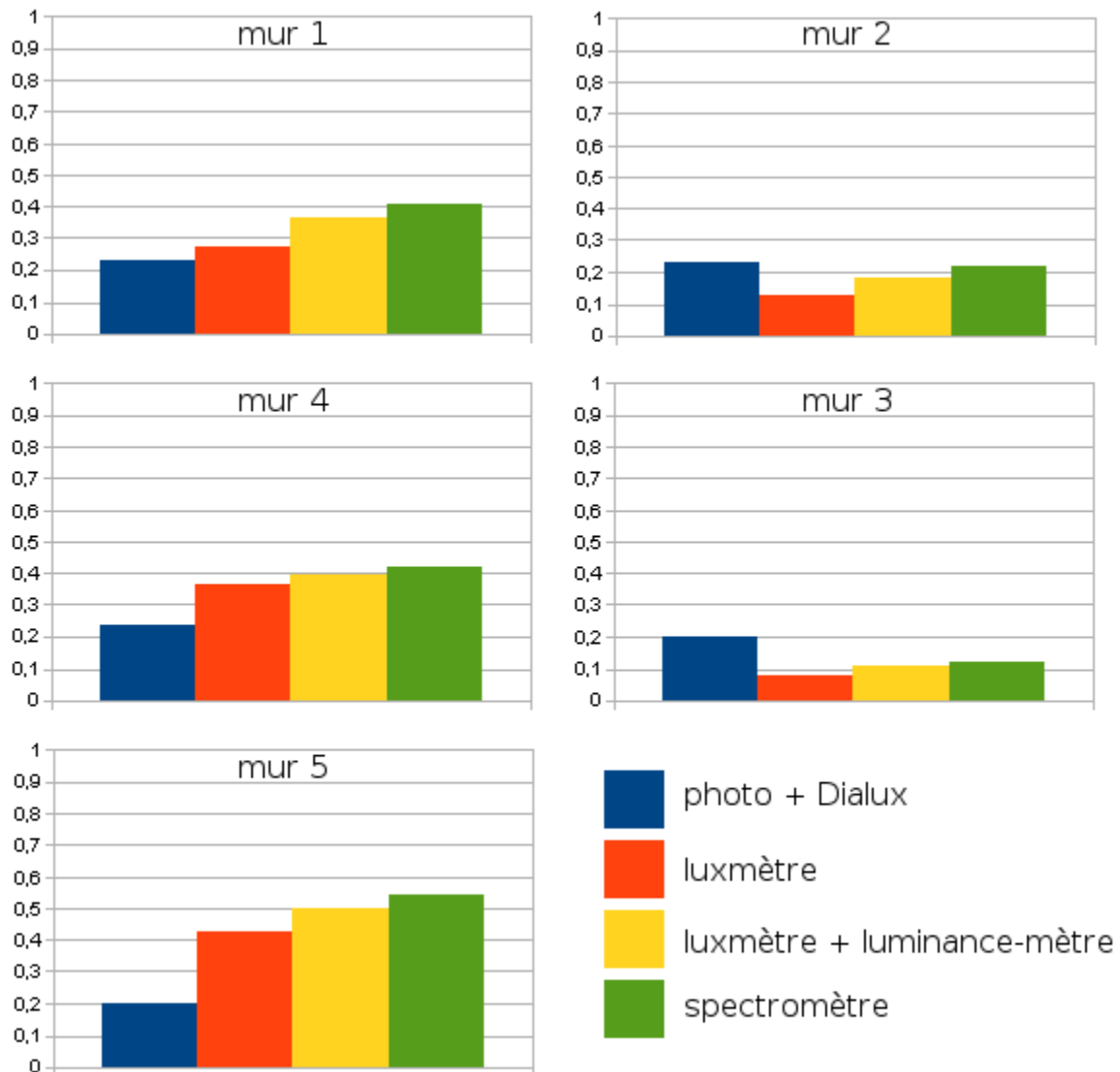


Figure C-2 : Comparaison des méthodes pour 5 murs différents

Annexe D. Influence des points de colle de la plaque de verre, sur le facteur de réflexion des façades vitrées

Les façades qui permettent de mesurer l'influence des réflexions spéculaires à l'intérieur du canyon présentent une particularité. Elles sont faites d'une planche de bois peinte en noire sur laquelle est collée une plaque de verre. Une couche de crépi est ensuite appliquée en prenant soin de masquer certaines zones rectangulaires pour représenter le taux de vitrage souhaité. La colle a été choisie transparente afin de ne pas masquer la peinture noire du support en bois. Néanmoins une fois le collage effectué, les points de colle sont restés visibles comme on peut le voir sur la Figure D-1.

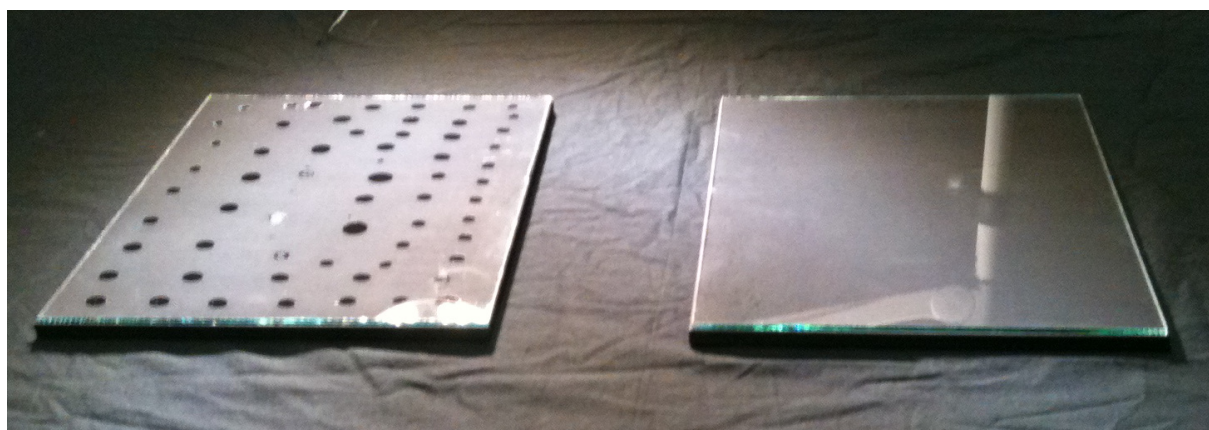


Figure D-1 : Plaque de verre collée (gauche), plaque non collée (droite)

La présence de ces points de colle a une répercussion sur la lumière réfléchi par la façade : ces zones absorbent plus la lumière, réduisant le facteur de réflexion lumineux. Le facteur de réflexion mesuré dans des conditions idéales (sans point de colle) n'est donc pas exact et une correction doit être ajoutée. La façade mesure 28 cm de large et 40 cm de haut. La mesure sur un goniomètre n'est pas envisageable étant donné la taille de l'échantillon et de ses irrégularités. Un protocole à plus grande échelle a donc été mis au point. La Figure D-2 est une photographie des instruments tels qu'ils étaient positionnés lors de la mesure. Une source de lumière équipée d'une lentille convergente éclaire la façade, elle est réglée de façon à obtenir la surface éclairée la plus grande possible sans dépasser sur la table. Un luxmètre est positionné de façon à mesurer le flux réfléchi par la façade éclairée. Le luxmètre est monté sur un pied qui permet de régler l'inclinaison et donc de le positionner avec le même angle d'incidence que les rayons de la source. La CIE préconise d'effectuer ce type de mesure avec un angle d'incidence de 45° (CIE, 1998), les contraintes matérielles ont imposé un angle de 75° . Cependant, le plus important pour cette méthode est de contrôler que l'angle du luxmètre correspond bien à l'angle d'incidence des rayons de la source.

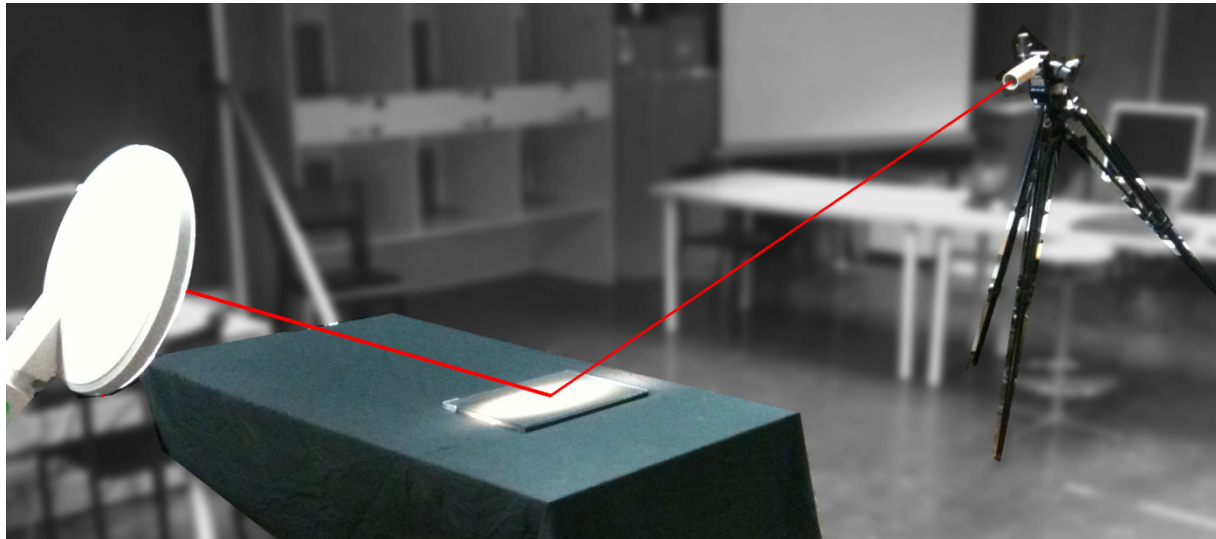


Figure D-2 : Méthode pour mesurer l'influence des tâches de colle

Bien que les mesures aient été effectuées dans le noir afin d'éliminer toute contribution venant d'une autre source lumineuse, le luxmètre a été équipé d'un tube dont la fonction est double. Tout d'abord, il permet de réduire l'angle de champs du capteur : environ 15° pour ce tube de 4 cm de diamètre et 15 cm de long. Sachant que la distance horizontale entre le luxmètre et la façade est connue (300 cm) la surface horizontale vue par le luxmètre au niveau de la façade est d'environ 2 m^2 . Grâce à cette limitation, le risque de mesurer une contribution de lumière venant d'une réflexion provenant de quelque part dans la pièce est minimisé. L'autre intérêt est de contrôler la position du luxmètre par rapport au faisceau de lumière réfléchi comme le montre la Figure D-3.

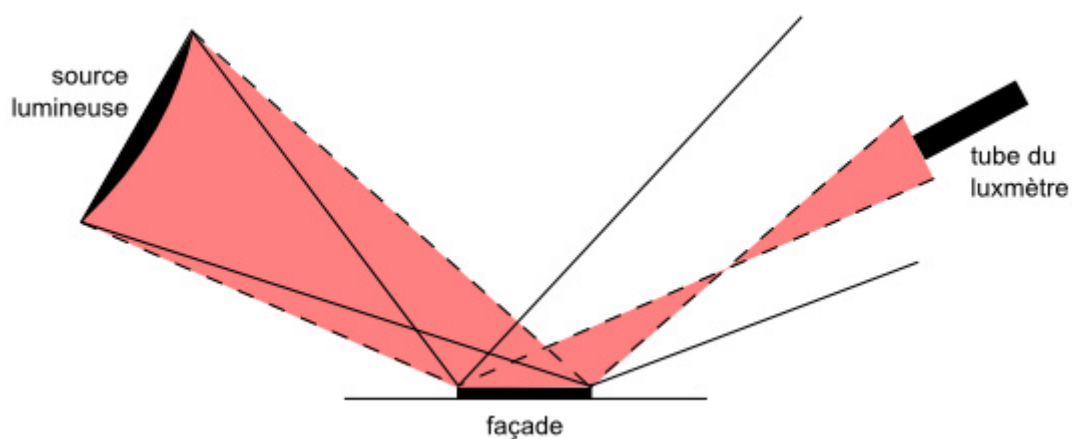


Figure D-3 : Largeur du faisceau au niveau du luxmètre

Sachant que la source a un diamètre de 50 cm et qu'elle se trouve à 150 cm de la façade, toutes les données connues permettent de calculer la largeur du faisceau au niveau du bout du tube du luxmètre. Cette donnée est importante du fait de la largeur de la source, de la même façon qu'une telle lumière est à l'origine de pénombre, en dehors de la zone en rouge sur le schéma, la quantité de lumière perçue ne provient que d'une fraction de la source.

Ainsi à la distance où se trouve le luxmètre, le faisceau est large d'environ 5 cm ce qui est suffisant.

Une fois ce montage en place, la quantité de lumière reçue par le luxmètre a été mesurée avec 5 façades collées et une façade sans colle. Plusieurs façades ont été utilisées car les points de colle ne sont pas situés au même endroit sur chacune, le but est donc de déterminer une valeur moyenne qui caractériserait l'ensemble des échantillons. Afin de s'assurer de la stabilité du protocole, le rayonnement réfléchi par la façade sans colle a été mesuré entre chaque changement de façade, une trace sur la table a été notée pour placer les planches systématiquement à la même position, 3 séries de mesures des 5 échantillons ont été effectuées. Sur les 3 séries, l'écart type des comparaisons est compris entre 0,09% et 0,38%. En moyenne, l'éclairement mesuré par le luxmètre est plus faible de 2,9% avec les points de colle. Cela indique que la présence des points de colle augmente légèrement l'absorption de la lumière dans le matériau, ce phénomène peut être remarqué sur la Figure D-1 où l'on peut voir que les tâches apparaissent plus noires que le reste de la façade. Dans la configuration des logiciels de simulation, cette diminution du facteur de réflexion a été prise en compte comme cela est indiqué dans la section III.2.1.4.

Annexe E. Format de la BDD utilisé pour stocker les mesures effectuées sur la maquette

| Type de donnée | Format |
|--|--|
| Orientation | Deux caractères (ns, ew) |
| Rapport d'aspect | Un nombre entier (12, 11, 21) |
| Type de revêtement | Une lettre (n, b, c, v) |
| Année | Un nombre entier, 12 pour 2012 |
| Mois | Un nombre entier (1..12) |
| Jour | Un nombre entier (1..31) |
| Heure | Un nombre à 2 décimales (2,50 pour 2h30) |
| Sondes façade Est étage 1 (<i>e1</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Est étage 2 (<i>e2</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Est étage 3 (<i>e3</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Est étage 4 (<i>e4</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Est étage 5 (<i>e5</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Est étage 6 (<i>e6</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sonde au sol | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Ouest étage 1 (<i>w1</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Ouest étage 2 (<i>w2</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Ouest étage 3 (<i>w3</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Ouest étage 4 (<i>w4</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Ouest étage 5 (<i>w5</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Sondes façade Ouest étage 6 (<i>w6</i>) | Un nombre à 4 décimales |
| Altitude du soleil | Un nombre à 1 décimale (0..90) |
| Azimut du soleil : | Un nombre à 1 décimale (0..360) 0° pour le nord, 90° pour l'Est, 180° pour le sud |
| Global horizontal lumineux (station IDMP) | Un nombre entier |
| Direct normal lumineux (station IDMP) | Un nombre entier |
| Type de ciel CIE | Un nombre entier (1..15) |

Annexe F. Numérotation des sondes

La Figure F-1 schématise, vues depuis le nord, les deux façades centrales du canyon urbain représenté par la maquette. Ce sont les façades sur lesquelles les sondes photométriques sont installées. Chaque sonde possède deux noms, le premier permet de repérer le type d'entrée dans le système d'acquisition ("V" pour une entrée en tension et "I" pour une entrée en courant) ainsi que le numéro de l'entrée. Ce nom est utilisé dans la base de données d'éclairément lumineux au sein d'un canyon urbain en fonction de différents paramètres. Dans cette BDD, l'autre nom des sondes est utilisé, il s'agit d'une lettre représentant le côté de la façade où se trouve la sonde ("e" pour Est, "w" pour Ouest) ainsi qu'un chiffre entre 1 et 6 permettant de connaître sa position sur la façade (plus le chiffre est grand plus la sonde est élevée).

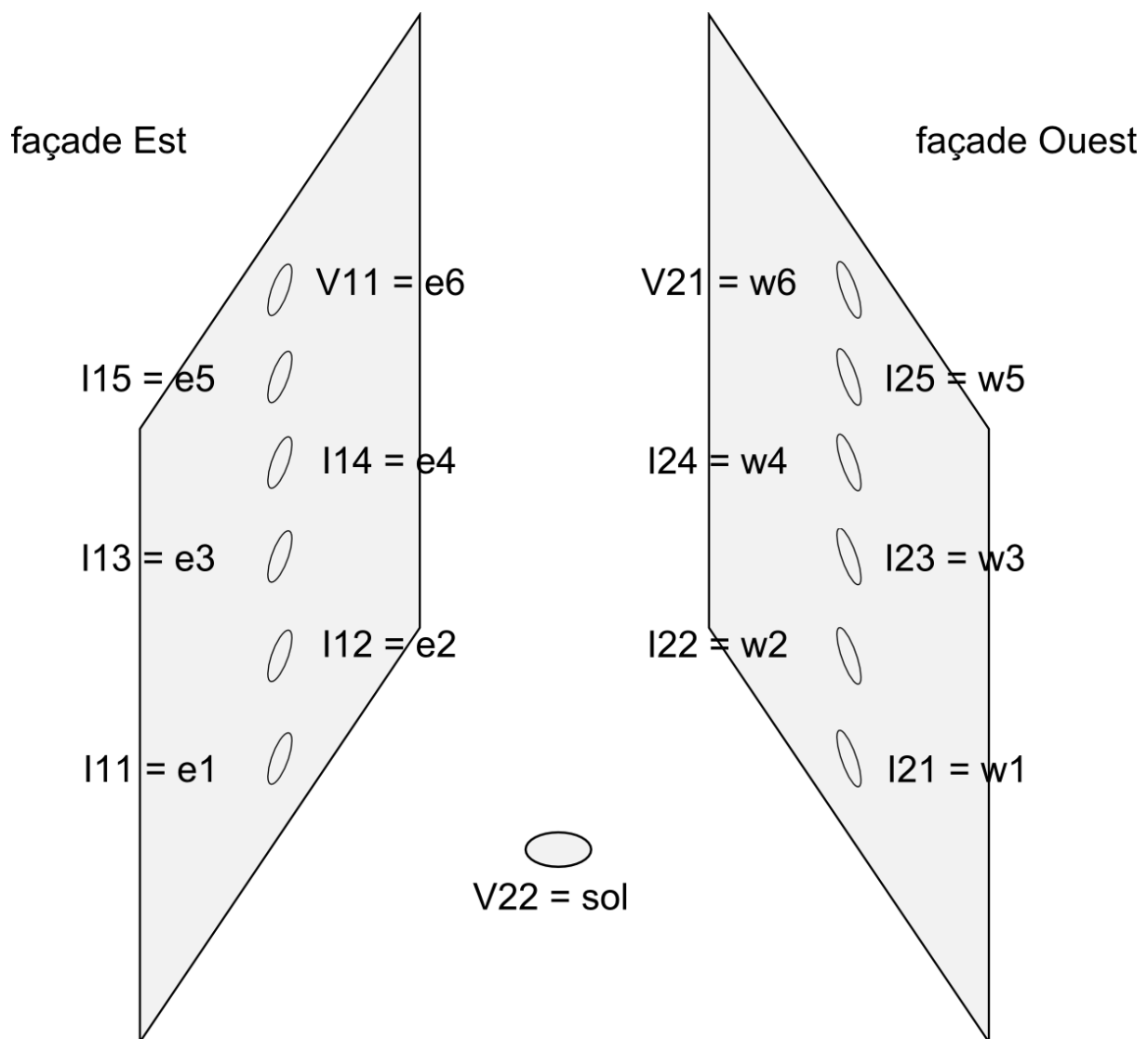


Figure F-1 : Schéma de position et numérotation des sondes dans le canyon

Annexe G. Unités PV

Dans le système international, l'unité de mesure de l'énergie est le Joule. Dans le domaine photovoltaïque, il est d'usage de mesurer l'énergie en wattheure. Sachant que 1 J correspond à la quantité d'énergie fournie par un flux de 1 W pendant 1 s. À partir de cette relation, il est trivial de déduire que 1 Wh correspond à 3600 J.

La puissance d'un rayonnement par unité de surface, appelée éclairement énergétique, est mesurée en W/m^2 . Par abus de langage, il est possible de rencontrer le mot "irradiance" qui correspond en réalité au mot anglais pour "éclairement énergétique".

L'énergie reçue par unité de surface se mesure en Wh/m^2 , cette grandeur est appelée "irradiation" dans le milieu photovoltaïque. Elle ne doit pas être confondue avec l'irradiation du domaine de la radiobiologie qui représente l'exposition d'un corps à un rayonnement et se mesure usuellement en Gray (soit des J/kg).

La puissance maximale d'une installation PV se mesure en watt-crête. Cette valeur correspond à la puissance fournie par un module sous des conditions de test standardisées (EN-61215, 1993) appelé "flashage", elle est notée W_c . La puissance du module est mesurée alors qu'il reçoit un éclairement énergétique de $1000 W/m^2$ à une température de $25^\circ C$ avec un coefficient AM 1.5. Ce coefficient AM (Air Mass) représente la distance que parcourent les rayons du soleil dans l'atmosphère, elle est définie par l'inverse du cosinus de l'angle zénithal du soleil dans le repère local. Ainsi pour $AM = 1,5$ cela correspond à un angle zénithal du soleil d'environ $48,2^\circ$. Les modules sont flashés pour cette valeur car elle est représentative des conditions moyennes des lieux où ils seront installés pour la majorité, c'est-à-dire dans des zones de climat tempéré, bien qu'ils peuvent être installés partout dans le monde.

La puissance mesurée de cette façon est appelée puissance crête du module. Le module peut produire plus de puissance s'il reçoit un éclairement énergétique supérieur. Le rapport entre la puissance produite par le module et la puissance fournie à ce dernier permet de déduire son rendement surfacique.

Il est possible d'estimer la surface théorique nécessaire pour installer une puissance crête donnée si le rendement surfacique est connu. Par exemple, un rendement de 15% correspond à une valeur cohérente pour un module au silicium multi cristallin au moment de la rédaction de cette thèse. Avec un éclairement énergétique de $1000 W/m^2$ tel qu'en STC, cela signifie qu'un mètre carré de cette technologie possède une puissance crête de 150 W_c . Ainsi pour installer 1 kW_c , cette technologie nécessite une surface de $6,67 m^2$.

Annexe H. Mesure des dimensions d'une fenêtre à l'aide d'un télémètre

La méthode décrite permet de calculer la largeur et la hauteur d'une fenêtre lorsqu'il n'est pas possible d'accéder physiquement à celle-ci. Cette méthode requiert un télémètre laser (aussi appelé distance-mètre) qui dispose d'un inclinomètre intégré. La Figure H-1 représente un schéma qui permet d'illustrer les dimensions utilisées par la méthode.

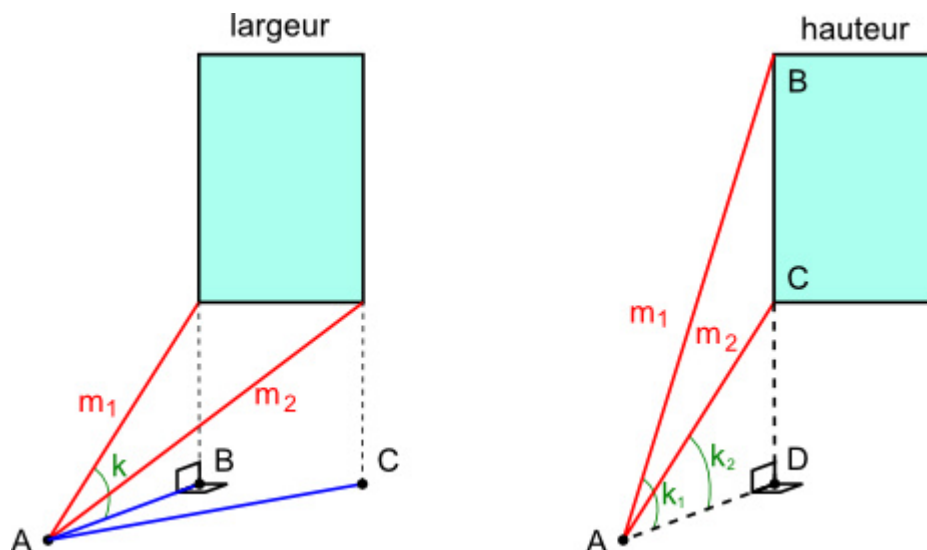


Figure H-1 : Schéma des méthodes permettant de mesurer la largeur (à gauche) et la hauteur (à droite) d'une fenêtre à l'aide d'un télémètre

La mesure de la largeur d'une fenêtre se fait à partir de deux mesures et d'un calcul. Le télémètre utilisé dispose d'un inclinomètre intégré qui permet d'obtenir l'angle k de l'appareil par rapport à l'horizontal. Grâce à cet instrument, l'appareil peut calculer la longueur AB sur le schéma de gauche à partir de la mesure m_1 . La longueur AC est calculée de la même façon à partir de la mesure m_2 . Le triangle ABC étant rectangle, la longueur BC se calcule simplement à partir du théorème de Pythagore. Pour que cette méthode soit utilisable, il faut se placer perpendiculairement à la façade et s'aligner à l'un des deux côtés de la fenêtre.

Pour mesurer la hauteur d'une fenêtre, il est possible d'utiliser une fonction du télémètre qui permet d'obtenir la longueur d'un côté d'un triangle rectangle à partir de la mesure de l'autre côté et de l'hypoténuse. Ainsi il est possible de calculer les longueurs BD et CD en effectuant deux fois ce type de mesure avec le segment [AD] représentant l'un des côtés du triangle et respectivement [AB] et [AC] comme hypoténuse. L'appareil doit se trouver dans la même position que la méthode pour mesurer la largeur.

Annexe I. Caractérisation de la projection angulaire de l'objectif fisheye

Les masques au rayonnement solaire peuvent être déterminés à partir de photographies prises avec un objectif fisheye offrant un angle de vision légèrement supérieur à 180° . Pour pouvoir calculer les angles d'obstruction avec précision, il faut déterminer la relation entre l'angle zénithal d'un point et la distance entre ce point et le centre du disque de projection. Soupçonnée linéaire à l'instar de l'objectif Nikon FC-E8 (Gal, Rzepa, Gromek, & Unger, 2007; Grimmond, Potter, Zutter, & Souch, 2001), cette relation a été étudiée de manière à se prémunir contre les erreurs liées à une ligne d'obstruction incorrecte. Dans ce but, la lentille extérieure de l'objectif, montée sur son boîtier, a été placée au centre de rotation d'un goniomètre. On peut voir sur la Figure I-1 le montage qui a été mis en œuvre.



Figure I-1 : Montage pour étalonner l'objectif fisheye

Une source de lumière a été mise en place sur le bras mobile du goniomètre, sa hauteur est telle qu'à 90° (c'est-à-dire dans l'alignement de la droite focale de l'objectif) le point qu'elle représente sur l'image se trouve au centre du disque. La source doit donc être la plus ponctuelle possible, un générateur couplé à une fibre optique a été utilisé afin de garantir que le point est suffisamment petit et que l'intensité est suffisamment grande pour être distinguée sans difficulté sur une photo prise dans le noir. Une fois la pièce plongée dans le noir, une photographie est prise pour chaque position de la source lumineuse de 0° à 180° avec un pas de 5° . Un pas de 1° a été utilisé au-dessous de 180° et en dessous de 0° afin

d'observer plus finement le comportement de l'objectif dans la zone qui nous intéresse le plus.

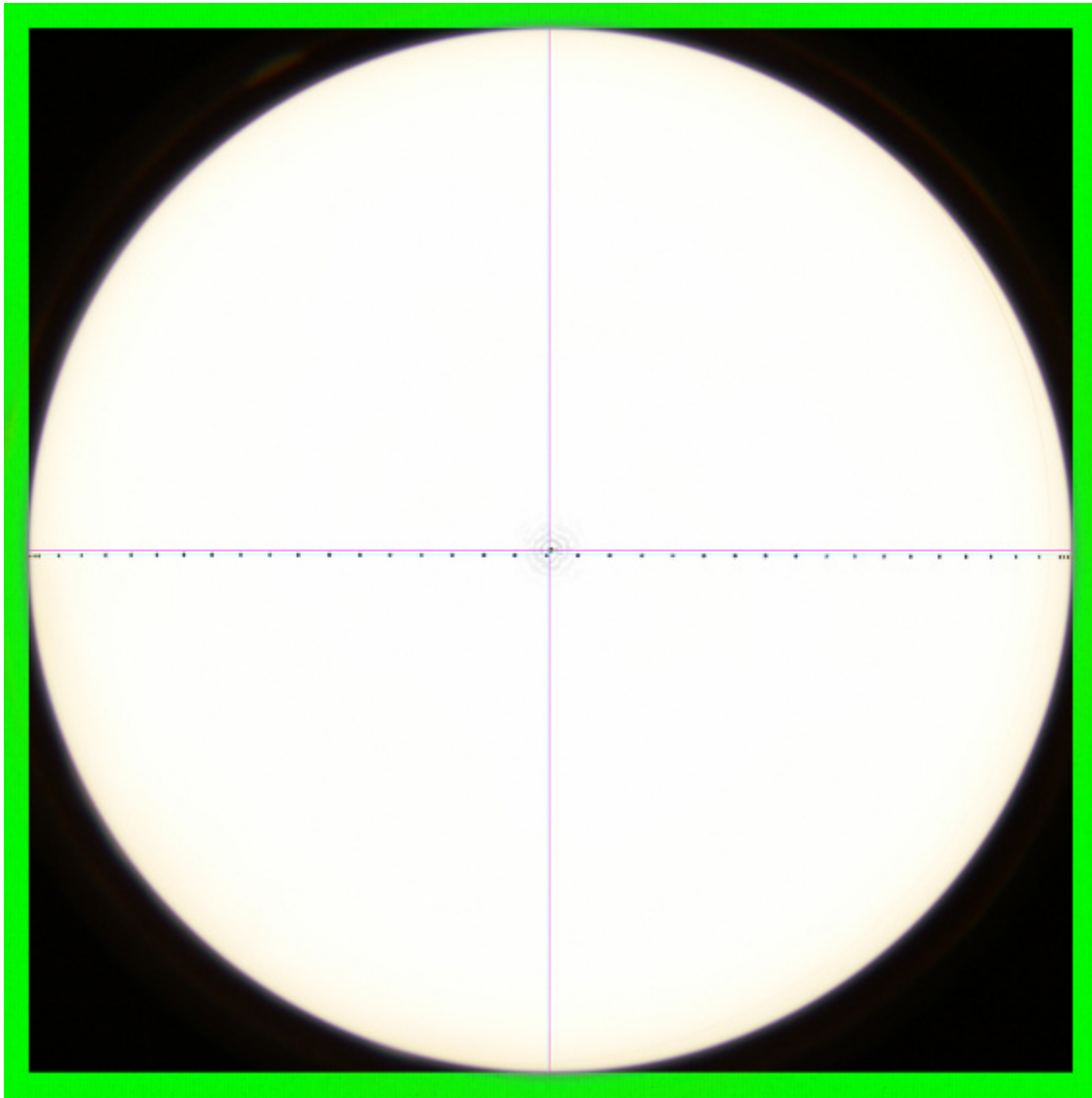


Figure I-2 : Résultat des mesures au goniomètre

La Figure I-2 montre la somme des photos prises en suivant ce protocole. Les points noirs alignés représentent la source lumineuse, chaque point correspond à une photo. Pour plus de lisibilité, les photos ont été mises en négatif, le point est donc noir sur fond blanc. Plusieurs essais ont été réalisés afin que la ligne qui passe par tous les points soit droite. En effet, le collimateur central de la visée de l'appareil n'est pas aligné avec le centre optique de l'objectif, il est donc peu évident de centrer la lumière visuellement d'autant que les résultats obtenus montrent que le centre optique ne se trouve pas au centre géométrique. Une technique similaire a déjà été utilisée pour déterminer le centre optique d'un objectif fisheye (Shah & Aggarwal, 1996). La Figure I-3 représente un zoom de la partie centrale de cette combinaison d'images. Le point se trouvant à l'intersection des lignes de couleur cyan correspond à la source lumineuse située à 90° . Étant donné que les points suivent la ligne

horizontale, cela prouve que le centre est bien situé, sinon les points dessineraient une courbe.

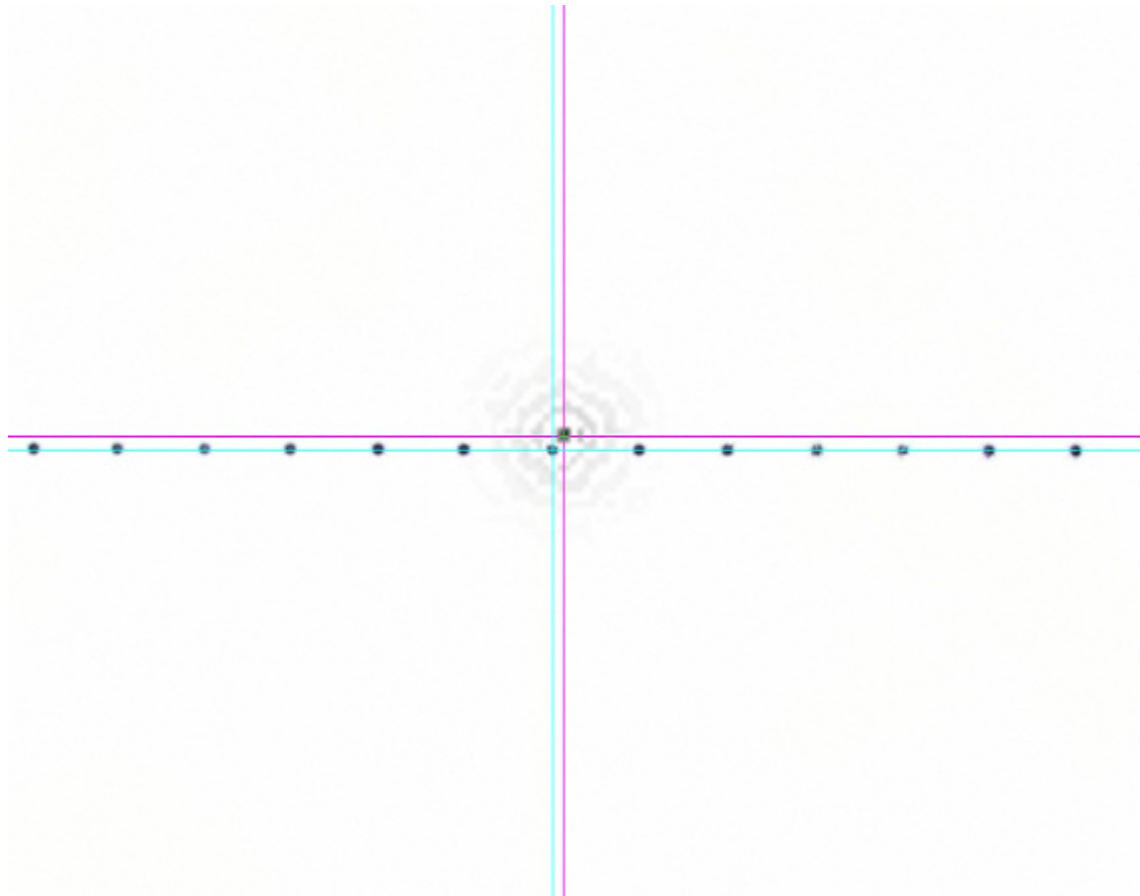


Figure I-3 : Centre du disque et centre optique

Le point situé à l'intersection des lignes de couleur magenta correspond au centre du disque. Le centre du disque a été déterminé de manière mathématique grâce à une méthode basée sur la transformée généralisée de Hough, une fonction utilisée dans des algorithmes de reconnaissance de formes. Une implémentation de cette méthode sous Matlab qui permet de tracer le centre d'un cercle a été récupérée en ligne et testée, l'auteur décrit cet algorithme dans une publication (Peng, Balijepalli, Gupta, & LeBrun, 2007). Des cercles générés par un logiciel de dessin vectoriel Inkscape ont été utilisés, le centre déterminé par le code utilisé a été comparé au centre dessiné manuellement dans le logiciel. La corrélation étant exacte, la méthode a été jugée fiable. Le décalage entre le centre de l'image et le centre optique est de -7 px en abscisse et -9 px en ordonnées si l'on considère un repère centré sur le point donné par la méthode basée sur la transformée de Hough.

L'analyse de l'image montre aussi que l'angle de champs de l'objectif s'étend au-delà de 180° . Il y a deux points visibles au-delà de 180° , de plus étant donné l'espacement entre ces points, on peut estimer qu'un troisième point pourrait être visible à la lisière du disque. De ce fait l'objectif utilisé a un angle de champs de $\pm 183^\circ$. Cela n'est pas surprenant, en effet, d'autres études ont relevé des angles de champs compris entre 180° et 190° pour le même type d'objectif (Grimmond et al., 2001). Cette donnée est très

importante dans le cas de l'utilisation d'un tel objectif pour cette application, car c'est au bord de l'image que se trouve l'information du relief.

La relation supposée linéaire peut maintenant être calculée à l'aide de ces résultats. En récupérant à la main la position du centre de chaque point sur l'image par rapport au point central, on peut tracer sur un graphique la valeur du rapport R/R_{max} . La valeur de R représente la distance en pixels d'un point par rapport au point central. La valeur de R_{max} représente la distance en pixel entre le point central et le bord du cercle qui contient l'image, pour un angle de 180° .

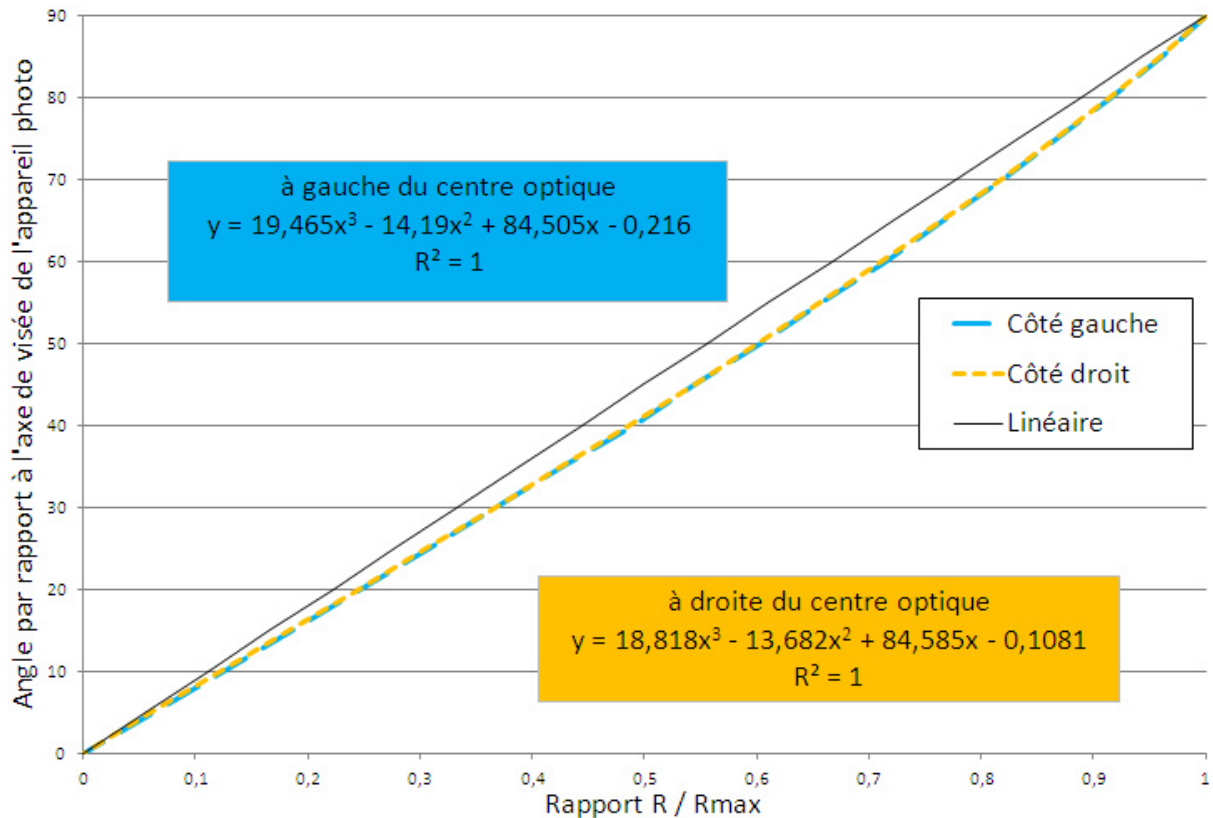


Figure I-4 : Caractérisation de la déformation de l'objectif fisheye

La Figure I-4 montre la correspondance entre le rapport R/R_{max} des points photographiés et l'angle associé à ces points. Si l'écart entre les points est constant, alors le rapport R/R_{max} est croissant de façon linéaire. Cette caractéristique est très intéressante car il suffit de multiplier la distance d'un pixel par rapport au centre de l'image par un coefficient pour connaître l'angle zénithal auquel il correspond. Or la relation entre l'angle et la distance du pixel au centre de l'image n'est pas linéaire. Une équation du troisième degré permet d'obtenir un coefficient de corrélation de 1, elle doit être utilisée à la place d'un coefficient seul. Étant donné que les courbes sont très proches, l'équation I-1 qui est utilisée a été calculée à partir des moyennes des rapports R/R_{max} à gauche et à droite.

$$y = 19,139x^3 - 13,931x^2 + 84,544x - 0,1621$$

I-1

Le montage qui a servi à évaluer cette distorsion, peut être amélioré, par exemple, en utilisant une plate-forme permettant un réglage fin de la position de l'appareil et de la source lumineuse. Sans une telle structure il est impossible d'effectuer des rotations de l'appareil. Ainsi la déformation a été calculée seulement sur une ligne droite, c'est-à-dire pour seulement deux rayons différents du disque formé par l'image. La forme de la distorsion sur le reste de l'image ne peut être que déduite des résultats obtenus avec ce montage basique. Une autre solution consiste à utiliser une demi-sphère à l'intérieur de laquelle est tracé une mire constituée d'un maillage régulier à base de cercles concentriques tels que la photographie de ce maillage avec un objectif fisheye d'un angle de champ de 180° afficherait des cercles avec un pas fixe en degrés. Ainsi une comparaison entre l'image de la mire idéale et la photo de la mire pourrait mettre en évidence la distorsion optique de l'appareil avec une grande résolution et pour toute la surface de l'image.

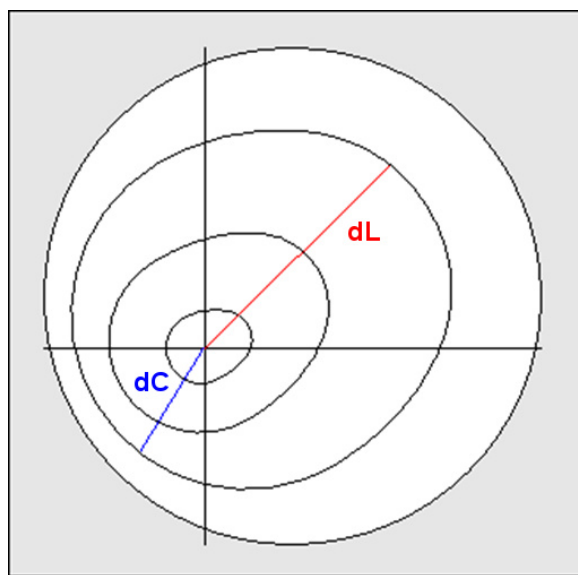


Figure I-5 : Représentation théorique de la distorsion

Une variation de la distance d'un point par rapport au centre sur un même rayon a donc été mise en évidence. Cependant cette particularité ne prend pas en considération la position du centre mesuré par rapport au centre géométrique de l'image. Afin de prendre en compte cette déformation observée, le centre optique de l'image a été considéré comme se trouvant à l'endroit de l'intersection des droites de couleur cyan sur la Figure I-3. Si cette estimation est correcte, on peut estimer que toute l'image est comprimée ou dilatée selon la zone considérée, la Figure I-5 schématise ce concept : la distance dC est plus petite que la distance dL alors qu'il s'agit du même angle.

Pour calculer le rayon avec prise en compte de la distorsion de l'objectif on considère que le centre optique est décalé par rapport au centre de l'image dans le cas de l'utilisation d'un objectif fisheye. L'angle de champs a été limité à 180° même si l'objectif utilisé couvre un angle légèrement supérieur. Afin de prendre en compte cette déformation dans le calcul de la ligne d'obstruction, le rayon entre le centre optique et les bords du disque contenant l'image est recalculé. La Figure I-6 schématise la géométrie sous-jacente.

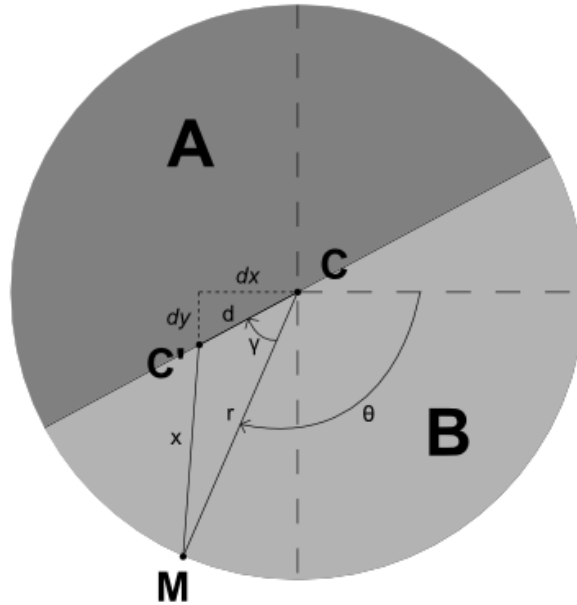


Figure I-6 : Schéma du décalage du centre optique par rapport au centre de l'image

En utilisant le théorème d'Al-Kashi dans le triangle CMC' on peut calculer la longueur x du segment MC'. La longueur r du segment CM est connue car il s'agit du rayon du disque formé par l'image. La longueur d du segment CC' est calculée de la façon suivante :

$$d = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad I-2$$

Avec dx et dy caractérisant le décalage du centre C' par rapport à C, en pixels. Il est possible d'appliquer le théorème d'Al-Kashi dans le triangle CMC' pour calculer la distance x d'un point du cercle par rapport au nouveau centre :

$$x^2 = d^2 + r^2 - 2rd \times \cos(\gamma) \quad I-3$$

La valeur de l'angle γ dépend de la valeur de l'angle θ . Dans les demi-cercles A et B, cet angle se calcule différemment, ils sont définis en fonction de θ de la façon suivante :

$$\begin{aligned} A : \frac{-\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right) < \theta \leq \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right) \\ B : \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right) < \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right) \end{aligned} \quad I-4$$

Ainsi la valeur de γ pour le demi-cercle A est :

$$\gamma_A = \frac{-\pi}{2} - \theta - \operatorname{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right) \quad I-5$$

Et dans le demi-cercle B :

$$\gamma_B = \pi - \theta - \operatorname{atan}\left(\frac{dy}{dx}\right) \quad I-6$$

Une seule valeur de γ peut être utilisé car :

$$\cos(\gamma_A) = \cos(\gamma_B) \quad I-7$$

La longueur x du nouveau rayon qui correspond la position vraie d'un point de la voute céleste en considérant ce type de distorsion est la suivante :

$$x = \sqrt{d^2 + r^2 - 2rd \times \cos\left(\frac{-\pi}{2} - \theta - \operatorname{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right)\right)} \quad I-8$$

Avec $dx = 7$ pixels, $dy = 9$ pixels,
 $d = 11,4$ pixels et $r = 977$ pixels

La Figure I-7 représente la différence de distance en pixels pour un angle donné entre le point correspondant à cet angle situé à droite du centre et le point situé à gauche. La courbe représente la distance de droite moins la distance de gauche. Le fait que la tendance soit croissante avec l'angle prouve que plus on s'éloigne du centre, plus l'écart est grand. De plus le fait que cette différence soit positive implique que les distances à droite sont supérieures à celles de gauche. L'image est donc bien compressée à gauche et dilatée à droite tel qu'on peut le voir sur la Figure I-5. Si cette déformation n'était prise en compte, nous obtiendrions des angles trop faibles à gauche de l'image, et trop grands à droite, par rapport aux angles réels.

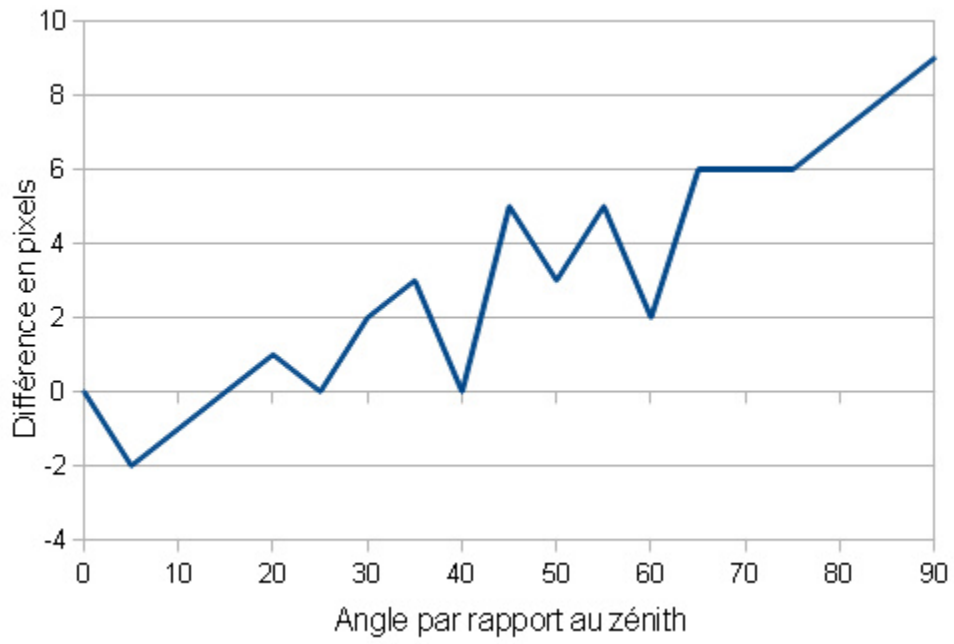


Figure I-7 : Mise en évidence de la nature de la distorsion de l'objectif fisheye utilisé

Annexe J. Loi des multiples réflexions applicable au canyon urbain

Afin de mettre en évidence le comportement de la lumière en fonction du facteur de réflexion, nous utiliserons le modèle de la sphère intégrante. La Figure J-1 représente une vue en coupe d'une sphère intégrante : une source lumineuse S se trouve au centre, un luxmètre C protégé par un cache mesure l'éclairement provenant des réflexions multiples du flux de la source sur les parois de la sphère. La surface interne est peinte avec un facteur de réflexion lumineux constant et de valeur proche de 1.

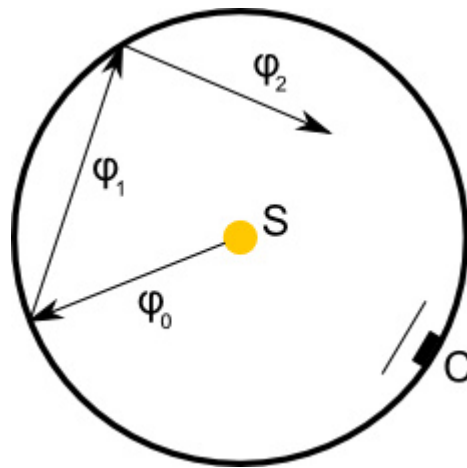


Figure J-1 : Schéma des multiples réflexions dans une sphère intégrante

Sachant que la source S émet un flux φ_0 , la valeur du flux après une réflexion s'appelle φ_1 et s'appelle φ_2 après deux réflexions jusqu'à φ_n après n réflexions. La valeur de φ_n se déduit de la façon suivante :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \rho\varphi_0 \\ \varphi_2 &= \rho\varphi_1 = \rho^2\varphi_0 \\ \varphi_n &= \rho^n\varphi_0\end{aligned}\tag{J-1}$$

Le flux indirect total Φ_{it} reçu en un point de la sphère après un total de n réflexions correspond à la somme suivante :

$$\Phi_{it} = \sum_{k=1}^n \varphi_k = \rho\varphi_0 + \rho^2\varphi_0 + \dots + \rho^n\varphi_0\tag{J-2}$$

Cette expression peut se factoriser de la façon suivante :

$$\Phi_{it} = \rho\varphi_0(1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^n) \quad J-3$$

La somme des termes $1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^n$ est une identité remarquable qui peut être simplifiée lorsque n tend vers l'infini, on obtient l'égalité suivante :

$$\Phi_{it} = \varphi_0 \frac{\rho}{1 - \rho} \quad J-4$$

La Figure J-2 montre la variation de Φ_{it} pour le cas particulier où φ_0 vaut 1 ce qui permet de voir l'influence de la valeur du facteur de réflexion lumineux sur la quantité totale de flux reçu en un point de la sphère après un nombre infini de réflexions.

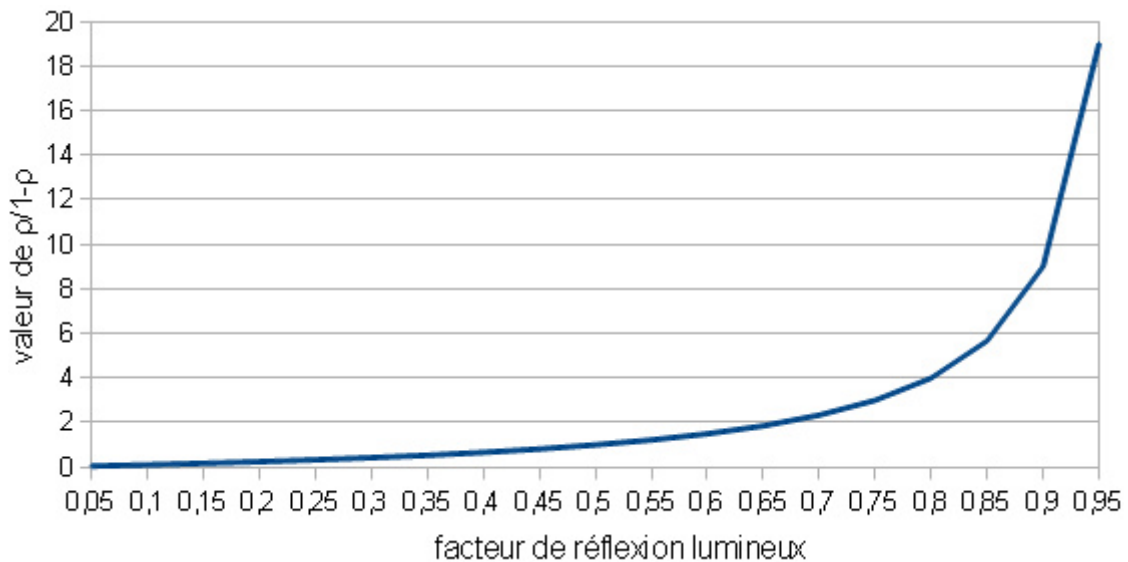


Figure J-2 : Variation de $\rho/1-\rho$ en fonction de ρ

Cette courbe montre que dans la sphère, dont le facteur de réflexion est souhaité le plus proche de 1 possible, l'influence de la salissure est dramatique car il entraîne une perte importante de l'éclairément mesuré même à un moindre degré. Dans un canyon urbain, un comportement équivalent peut être observé du fait des multiples réflexions entre les façades. L'influence de ces réflexions y est moins importante que dans la sphère intégrante mais la diminution du facteur de réflexion implique une diminution plus importante de l'éclairément lumineux sur les façades, lorsque leur facteur de réflexion est élevé : la salissure dans la sphère correspond à la pollution dans la rue.

Annexe K. Facteur de forme

Le facteur de forme est un outil mathématique permettant de décrire la surface visible d'un élément géométrique depuis un autre élément géométrique, par exemple, des surfaces unitaires. La Figure K-1 schématise le concept géométrique du facteur de forme entre deux surfaces.

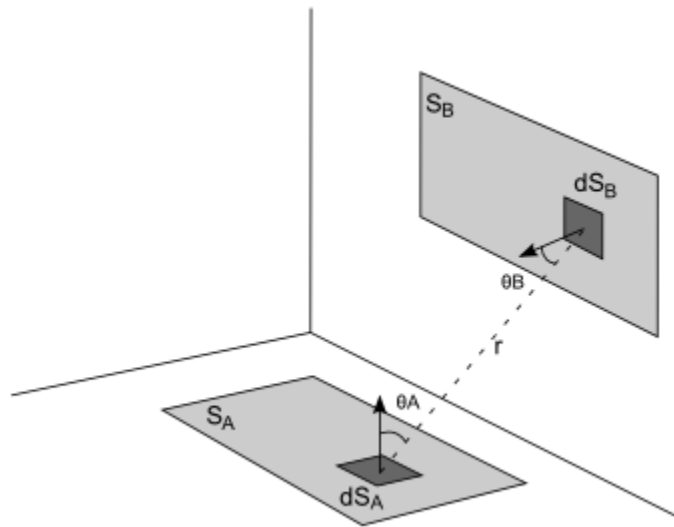


Figure K-1 : Visibilité d'une surface par rapport à une autre

Si φ_B est le flux total émis par la surface S_B , alors le flux reçu par la surface S_A provenant de la surface S_B appelé $\varphi_{A(B)}$ se calcule de la façon suivante :

$$\varphi_{A(B)} = \varphi_B \times F_{B \rightarrow A} \quad K-1$$

Le facteur de forme $F_{B \rightarrow A}$ total représente l'intégrale des facteurs de forme de chaque élément unitaire dS_A et dS_B des surfaces S_A et S_B :

$$F_{B \rightarrow A} = \frac{1}{B} \int_B \int_A \frac{\cos \theta_B \times \cos \theta_A}{\pi r^2} dS_A dS_B \quad K-2$$

Avec r la distance entre chaque élément unitaire dS_A et dS_B , θ_A et θ_B sont les angles par rapport à la normale des surfaces respectives S_A et S_B .

Annexe L. Visibilité du soleil par les sondes selon le critère géométrique

Les figures présentées dans cette annexe sont inspirés des diagrammes solaires. Elles contiennent le nombre de mesures pour lesquelles le soleil est visible par au moins une sonde selon le critère géométrique décrit dans la section IV.1.1.1 : le soleil est visible s'il n'est pas caché par la façade opposée. Cela permet de vérifier s'il est possible de comparer des situations avec soleil direct dans la même zone du ciel, pour des revêtements différents. Ils sont regroupés par rapport d'aspect, pour chacun d'entre eux, tous les revêtements sont représentés. Les positions du soleil sont regroupées dans des mailles de neuf degrés de côté concernant l'azimut et la hauteur angulaire. Les mailles colorées en gris représentent les zones du ciel à travers lesquelles le soleil est susceptible de se trouver dans une année, pour le lieu où se trouve la maquette (Vaulx-en-Velin). Rappelons que les périodes durant lesquelles les revêtements étaient installés sur la maquette s'étalent sur différents moments de l'année, cela explique l'hétérogénéité des valeurs numériques dans les zones de ciel entre les rapports d'aspect.

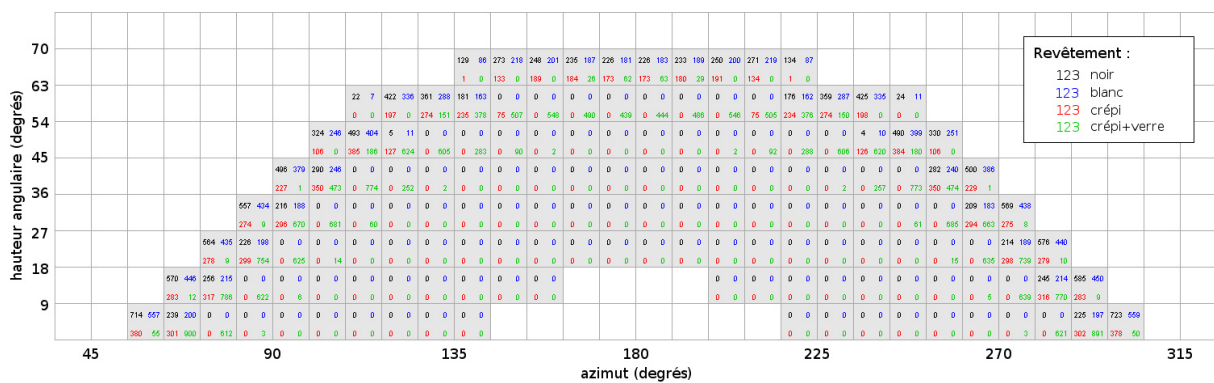


Figure L-1 : Nombre de situations avec soleil visible pour au moins une sonde pour $H/W = 05$

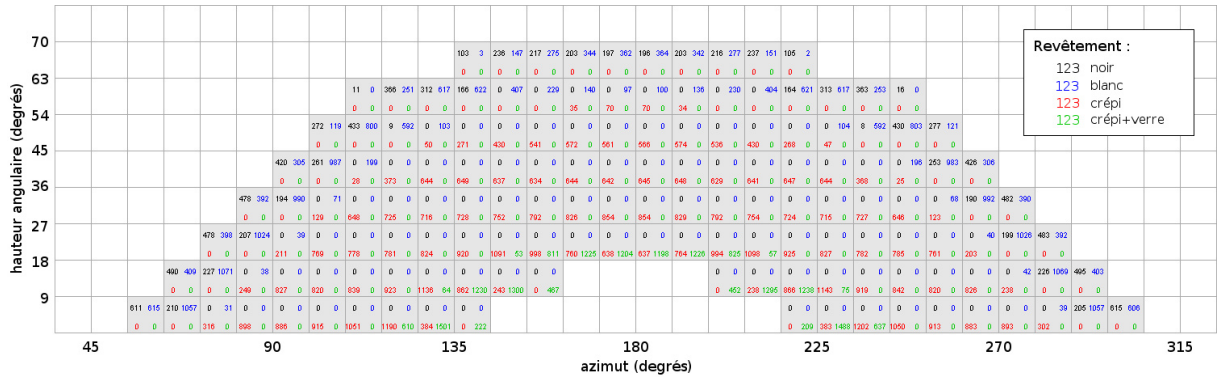


Figure L-2 : Nombre de situations avec soleil visible pour au moins une sonde pour $H/W = 1$

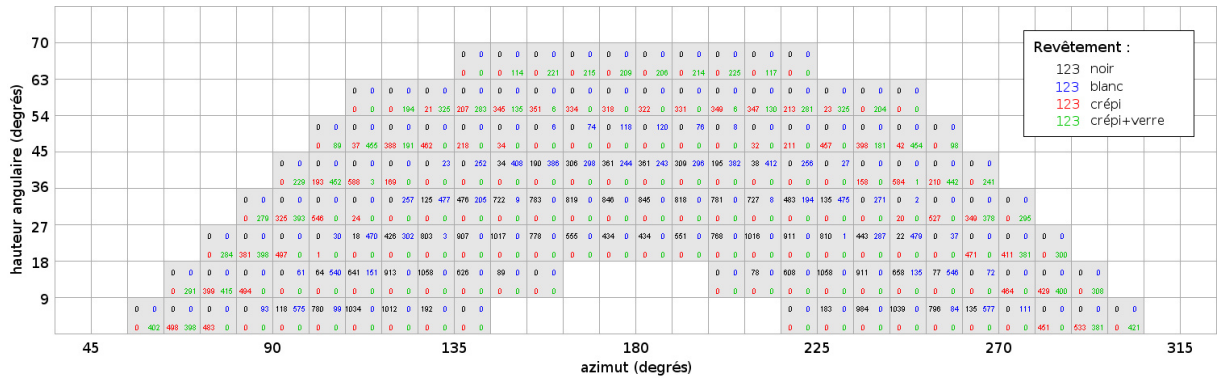


Figure L-3 : Nombre de situations avec soleil visible pour au moins une sonde pour $H/W = 2$

Annexe M. Modélisation de l'éclairement lumineux avec des données produites par Heliodon

Heliodon fournit des flux énergétiques pour des surfaces choisies. La première étape consiste à obtenir des éclairagements énergétiques c'est-à-dire une quantité de flux pour une surface donnée. Les surfaces utilisées dans nos simulations étant de simples carrés de dimensions connues, il suffit de diviser le flux par la surface pour obtenir des kW/m².

Pour obtenir des éclairagements lumineux, il faut ensuite appliquer une valeur d'efficacité lumineuse. Dans Heliodon, seul l'éclairement direct normal est calculé, il est défini par l'équation (M-1) (Campbell & Norman, 1998).

$$EESN = EESNO\tau^m$$

Avec :

$$m = \frac{e^{\frac{-A}{A_0}}}{\cos Z_s} \quad (M-1)$$

EESN est l'éclairement énergétique direct normal à la surface, τ représente la transmittance de l'atmosphère et m représente le rapport entre la distance parcourue par les rayons du soleil dans l'atmosphère et l'épaisseur de l'atmosphère au zénith. Il est calculé à l'aide de l'angle zénithal du soleil Z_s , de l'altitude du lieu A et d'une altitude de référence A_0 dont la valeur par défaut est 8200 m. La valeur de τ est fixée par défaut à 0,7 dans le logiciel, ce qui correspond à un ciel clair d'après les travaux de Campbell et Norman. Le facteur de trouble énergétique de Linke (cf. section II.3.1.4) a été utilisé pour analyser la pertinence de cette valeur. Ce dernier peut être calculé à partir des éclairagements énergétiques direct normaux au niveau du sol et en dehors de l'atmosphère en utilisant l'équation (M-2).

$$T_{eL} = \frac{\ln(EESNO) - \ln(EESN)}{a_{eR}m} \quad (M-2)$$

Avec a_{eR} le coefficient d'atténuation de l'atmosphère prenant en compte la diffusion de Rayleigh ainsi que l'absorption par les différents gaz et par l'ozone. a_{eR} est calculé à l'aide de l'équation (M-3) proposée par Louche (Louche, Peri, & Iqbal, 1986).

$$a_{eR} = \frac{1}{6,5567 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4} \quad (M-3)$$

La valeur de m utilisée provient de l'équation (M-1). Ces équations ont été utilisées pour calculer les moyennes mensuelles du trouble énergétique de Linke calculées à partir de mesures effectuées sur la station IDMP pour l'année 1994 (cf. Figure M-1) (Dumortier, 1995). D'autre part, j'ai calculé le trouble énergétique de Linke résultant de la formule Heliodon pour des hauteurs de soleil situées entre 5° et 90°, le résultat est visible sur la

Figure M-1. On remarque que pour les hauteurs de soleil supérieures à 45°, le trouble est constant et égal à 3.

Pour l'année 1994, la valeur du trouble se trouve entre 2,4 et 5. Les valeurs calculées à partir d'Heliodon (avec un facteur de transmission de l'atmosphère de 0,7) quant à elles, sont comprises entre 2,9 et 5,6 pour des hauteurs angulaires de soleil comprises entre 20° et 90°. En revanche, lorsque le soleil est plus bas dans le ciel, les valeurs deviennent rapidement plus élevées, jusqu'à un trouble de 9,3 pour une hauteur de soleil de 5°. Cela implique que l'erreur commise sur le calcul du rayonnement avec Heliodon est supérieure pour ces situations. Toutefois, cela a une conséquence réduite du fait que des comparaisons entre les simulations et les mesures sur le modèle réduit, seront effectuées pour des sondes situées à l'intérieur d'un canyon urbain. Ces sondes reçoivent du rayonnement solaire direct pour des hauteurs de soleil élevées du fait de l'obstruction de la façade opposée.

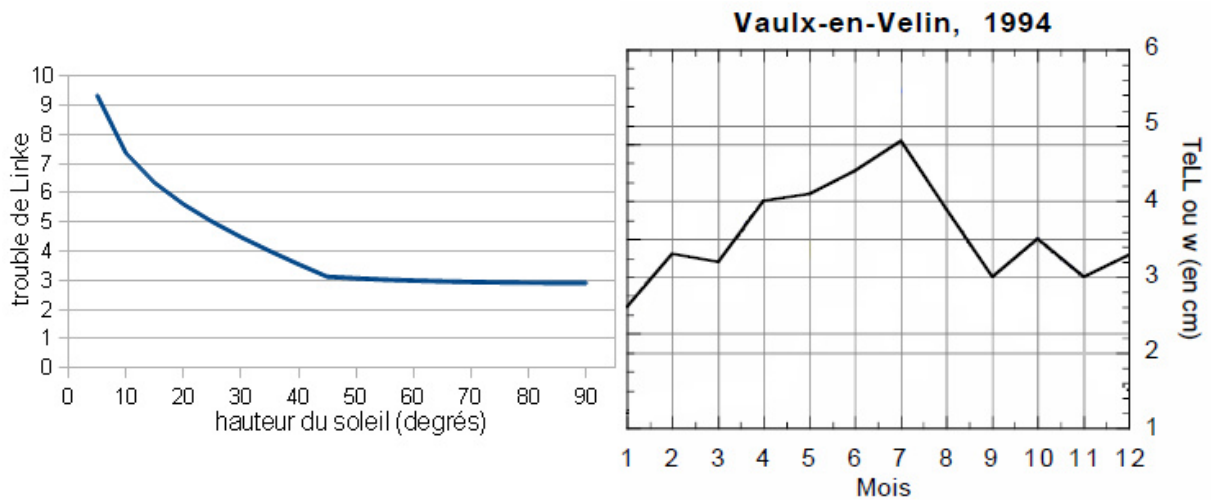


Figure M-1 : Moyennes mensuelles de T_{eL} obtenues à partir de mesures sur la station IDMP (à gauche) et valeurs calculées à partir de données générées par Heliodon (à droite)

Afin d'obtenir des éclairagements lumineux, il est possible d'introduire un coefficient C_{eff} dans l'équation (M-1), il s'agit de l'efficacité lumineuse. Ce coefficient dépend en réalité des conditions climatiques et des modèles existants pour le calculer (cf. section II.3.3.1). Pour notre étude, une valeur unique est choisie car il n'est pas possible de modifier le logiciel, ce qui devrait être fait pour prendre en compte une efficacité lumineuse dépendante de l'altitude du soleil. Cela ne représente qu'une hypothèse de plus pour Heliodon qui en fait déjà plusieurs. De plus le soleil ne pénètre dans le canyon que pour des hauteurs angulaires importantes. Pour des hauteurs angulaires du soleil supérieures à 20°, la valeur de l'efficacité lumineuse du rayonnement direct se stabilise (Dumortier, 1995). Pour une localisation géographique quelconque pour laquelle l'efficacité lumineuse moyenne n'est pas connue, le coefficient C_{eff} peut être défini de la façon suivante :

$$C_{eff} = \frac{EVSNO}{EESNO} \quad (M-4)$$

La valeur de EVSNO utilisée est celle recommandée par la CIE pour le programme IDMP (133800 lux) et la valeur de EESNO est celle qui est recommandée par l'OMM (1367 W/m²) (Kittler & Darula, 2000). Cela produit une efficacité lumineuse de 98 lm/W. L'éclairement lumineux direct normal EVSN est donc obtenu en modifiant l'équation (M-1) de la façon suivante :

$$EVSNO = 98 \times EESNO \tau^m \quad (M-5)$$

Bibliographie des annexes

- Ben-Ezra, M., Wang, J., Wilburn, B., Li, X., & Ma, L. (2008). *An LED-only BRDF measurement device*. Paper presented at the Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1998). *Introduction to environmental biophysics*: Springer Verlag.
- CIE. (1998). CIE 130-1998 Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance.
- CIE. (2007). CIE Colorimetry - Part 2: Standard Illuminants for Colorimetry. *ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006*.
- Deutsches Institut Für Normung. (1979). DIN 5036-3: Radiometric and photometric properties of materials; methods of measurement for photometric and spectral radiometric characteristics.
- Dumortier, D. (1995). *Mesure, Analyse et Modélisation du gisement lumineux: application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments*. Université de Lyon.
- EN-61215. (1993). International Standard EN-61215.
- Gal, T., Rzepa, M., Gromek, B., & Unger, J. (2007). Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica et Chorologica*, 40(41), 17-26.
- Giardino, C., & Brivio, P. (2003). The application of a dedicated device to acquire bidirectional reflectance factors over natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 24(14), 2989-2995.
- Grimmond, C., Potter, S., Zutter, H., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, 21(7), 903-913.
- Kittler, R., & Darula, S. (2000). Determination of sky types from global illuminance. *Lighting Research and Technology*, 32(4), 187-193.
- Louche, A., Peri, G., & Iqbal, M. (1986). An analysis of Linke turbidity factor. *Solar Energy*, 37(6), 393-396.
- Mattison, P. R., Dombrowski, M. S., Lorenz, J. M., Davis, K. J., Mann, H. C., Johnson, P., & Foos, B. (1998). *Handheld directional reflectometer: an angular imaging device to measure BRDF and HDR in real time*. Paper presented at the SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation.
- Peng, T., Balijepalli, A., Gupta, S. K., & LeBrun, T. (2007). Algorithms for on-line monitoring of micro spheres in an optical tweezers-based assembly cell. *Journal of computing and information science in engineering*, 7(4), 330-338.
- Rasband, W. (2008). ImageJ. <http://rsbweb.nih.gov/ij/>.
- Reagan, J., & Acklam, D. (1979). Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern USA residences. *Energy and Buildings*, 2(3), 237-248.
- Shah, S., & Aggarwal, J. (1996). Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation. *Pattern Recognition*, 29(11), 1775-1788.