



HAL
open science

Imagerie terrestre urbaine : vers une méthode physique d'estimation de la réflectance

Fabien Coubard

► **To cite this version:**

Fabien Coubard. Imagerie terrestre urbaine : vers une méthode physique d'estimation de la réflectance. Autre. Université Paris-Est, 2014. Français. NNT : 2014PEST1085 . tel-01142095

HAL Id: tel-01142095

<https://theses.hal.science/tel-01142095v1>

Submitted on 14 Apr 2015

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.

**Imagerie terrestre urbaine : vers une
méthode physique d'estimation de la
réflectance**

Fabien Coubard

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

Spécialité : Sciences et Technologies de l'Information Géographique

Soutenue le 30 octobre 2014

Jury :

Nicole VINCENT	Présidente	Professeur, Université Paris-Descartes
Nicolas PAPARODITIS	Directeur	Directeur de Recherche, IGN
Xavier BRIOTTET	Directeur	Directeur de Recherche, ONERA
Mathieu BRÉDIF	Encadrant	Chargé de Recherche, IGN
Fabrice HEITZ	Rapporteur	Professeur, Université de Strasbourg
Henri MAÎTRE	Rapporteur	Professeur Emérite, Telecom ParisTech
Bruno RAFFIN	Examineur	Chargé de Recherche HDR, INRIA



Résumé

L'imagerie terrestre urbaine se développe grâce à la diffusion grand public de visualisateurs immersifs au niveau de la rue. L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode physique d'estimation de la réflectance des matériaux d'une scène urbaine à partir des images d'un système mobile d'acquisition, comme par exemple le véhicule d'acquisition Stereopolis, développé au laboratoire MATIS de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN).

Pour cela, on considère que l'on dispose d'un modèle 3D de la scène, segmenté en zones de réflectance homogène (décrite par un modèle paramétrique), d'un jeu d'images géoréférencées corrigées radiométriquement. On propose une méthode d'estimation des réflectances par minimisation de l'écart entre les images réelles acquises par le capteur et des images simulées depuis le même point de vue.

Après une modélisation phénoménologique des différentes composantes de la luminance arrivant au niveau d'un capteur imageur dans le domaine visible, une méthode utilisant le lancer de rayon sert à simuler cette luminance. Cela constitue ici le problème direct.

Cet outil de simulation nécessite la connaissance de l'illumination de la scène, i.e. la répartition et la puissance des sources de lumière. Pour une acquisition avec Stereopolis, on ne réalise généralement pas de mesures atmosphériques et/ou radiométriques permettant de déterminer l'illumination avec des codes de transfert radiatif; c'est pourquoi on propose une méthode d'estimation de la luminance du ciel à partir des images, en utilisant les pixels qui voient le ciel. L'éclairement solaire direct, non accessible directement dans les images, est estimé par une méthode ombre-soleil grâce à une plaque de référence placée sur le toit du véhicule.

L'algorithme d'inversion du système se fait par minimisation d'une fonction coût constituée par la différence pixel à pixel entre les images simulées avec certains paramètres de réflectance et les images réelles. Cela nécessite de nombreuses simulations par lancer de rayon, car l'algorithme est itératif en raison des réflexions multiples entre les objets qui doivent être calculées avec des paramètres de réflectances initiaux. Afin d'éviter ces très coûteux lancers de rayons, on propose un algorithme de lancer de rayon formel qui stocke la luminance simulée comme des fonctions des paramètres de réflectances au lieu d'une valeur numérique. Cela permet de mettre à jour les images de luminance simulées par simple évaluation de ces fonctions avec le jeu de paramètres courant. La minimisation elle-même est effectuée par la méthode du gradient conjugué.

Des résultats sur des scènes synthétiques permettent de faire une première validation de la méthode. Cependant, l'application sur un jeu d'images issues de Stereopolis pose plusieurs difficultés, notamment liées à l'étalonnage radiométrique et à la segmentation du modèle 3D utilisé en entrée.

Abstract

Urban terrestrial imagery is widely used through online viewers of street-level images. The MATIS of the French National Geographical and Forester Data Institute (IGN) has developed its own mobile-mapping vehicle, Stereopolis, dedicated to research purposes. In this thesis, we develop a physically-based method to retrieve the reflectance of urban materials from a set of images shot by a mobile-mapping vehicle.

This method uses a 3D model of the scene (segmented in areas of homogeneous reflectance, modeled by a parametric formula) and a set of georeferenced and radiometrically corrected images. We present a method for the estimation of the reflectances of the materials by minimizing the difference between real acquired images and simulated images from the same point of view.

A modelisation of the physical phenomena leading to the formation of optical images is presented. A code using ray-tracing algorithm is used to compute the radiance at the sensor level. This is the direct problem for our estimation of reflectances.

The illumination of the scene must be an input of this simulation tool ; now, in a typical urban mobile-mapping acquisition neither atmospheric nor radiometric measurements are performed, that could be used to determine the illumination with a radiative transfer code. We propose an estimation of the illumination using directly the sky pixels in the acquired images. The direct solar irradiance cannot be estimated from the images because of overexposure, but we can use a shadows casted on a dedicated reference plate placed on top of the vehicle.

The reflectances estimation is performed by minimizing a cost function ; this cost function is the pixel-wise difference between simulated images (with current reflectances parameters) and acquired images. This leads to numerous ray-tracing simulations as the algorithm is iterative due to interreflections between the objects of the scene, that are computed using initial parameters. In order to prevent these costly ray-tracing simulations, we propose a symbolic ray-tracing algorithm that computes the radiance as a symbolic function of the reflectances parameters instead of a numerical value. Then, each iteration of the minimization algorithm is only an evaluation of a symbolic function.

Results are shown on synthetic scenes to perform a first validation the estimation method. Using this method on real Stereopolis images remains difficult, mainly due to the radiometric calibration of cameras and the segmentation on the 3D model.

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée en codirection entre l'IGN et l'ONERA, et m'a ainsi permis de travailler avec des photogrammètres et télédéTECTEURS mais aussi avec des physiciens et opticiens.

Je tiens à remercier tout d'abord mes directeurs de thèse Nicolas Paparoditis et Xavier Briottet pour leur suivi, leurs relectures et le partage de leur expérience, ainsi que mon encadrant Mathieu Brédif pour ses explications patientes tout au long de cette thèse, ses bonnes idées et ses conseils.

Je remercie chaleureusement les membres de mon jury de soutenance de thèse : Nicole Vincent (présidente), Fabrice Heitz et Henri Maître (rapporteurs), et Bruno Raffin (examinateur).

Merci au personnel de l'ONERA/DOA de Toulouse avec qui j'ai pu communiquer et qui m'a accueilli pendant une semaine, notamment Stéphanie Doz, Karine Adeline et Thomas Ristorcelli, ainsi que Nicolas Rivière et Romain Ceoloato qui m'ont initié aux difficultés de la mesure de BRDF.

La Ville de Paris nous a ouvert les portes de son dépôt de Bonneuil où nous avons pu récupérer divers échantillons de matériaux urbains, et je leur suis très reconnaissant pour cela.

Je tiens bien sûr à remercier tous les collègues du MATIS et de l'IGN : Olivier Tournaire (maître C++), Jean-Pierre Papelard et Nicolas David sans qui les données Stereopolis resteraient du domaine de la légende urbaine, François Boyero pour son aide logistique, et tous les autres pour ces agréables années passées en leur compagnie. J'adresse mes remerciements particuliers aux sportifs du MATIS (Adrien, Alexandre H., Alexis, Bruno, Jean-Pascal, Jérôme, Marc, Mathieu, Narut) grâce à qui j'ai effectué mon premier semi-marathon et mon premier triathlon.

Je remercie enfin Marie à qui je dois mon bonheur, ainsi qu'Arthur et Colin, arrivés tous deux au cours de cette thèse.

Table des matières

1	Introduction	19
1.1	Contexte	19
1.1.1	L'image numérique comme mesure de la luminance	19
1.1.2	Chaîne typique d'acquisition par véhicule de cartographie mobile	19
1.1.3	Applications envisagées	21
1.1.4	Difficultés	21
1.2	Formulation du problème	22
1.2.1	La luminance dépend de l'illumination	22
1.2.2	Spécificités de l'imagerie terrestre	23
1.2.3	Problématique : estimation de la réflectance	23
1.3	Méthodologie	23
1.3.1	Principe général	23
1.3.2	Contributions originales	25
1.4	Plan du manuscrit	25
2	Modélisation du signal image en milieu urbain	27
2.1	Rappels de radiométrie : définitions et notations	27
2.1.1	Grandeurs énergétiques du rayonnement	27
2.1.2	Propriétés optiques	27
2.1.2.1	Réflectance des matériaux	27
2.1.2.2	Gaz et aérosols	28
2.2	État de l'art : modélisation du signal image	29
2.3	Modélisation du signal image	30
2.3.1	Approche phénoménologique globale	30
2.3.1.1	Les différents phénomènes	30
2.3.1.2	Expression analytique	33
2.3.2	Approche par suivi du trajet des rayons lumineux	35
2.3.2.1	Équations locales du rendu	35
2.3.2.2	Classification des rayons	36
2.3.3	Analogie entre l'approche phénoménologique et l'approche par suivi des rayons	37
2.3.4	Ordres de grandeur	37
2.3.4.1	Mesures de BRDF de matériaux urbains	37
2.3.4.2	Les différents termes du bilan radiométrique	37
2.4	Conclusion	42

3	Simulation d'images de luminance	43
3.1	Pourquoi simuler le signal lumineux	43
3.2	État de l'art des techniques de simulation d'images	43
3.2.1	Méthodes adaptées à l'imagerie aérienne ou spatiale moyenne résolution	43
3.2.1.1	Codes de transfert radiatif	43
3.2.1.2	Correction radiométrique des images	44
3.2.1.3	Méthodes adaptées au milieu urbain	44
3.2.2	Méthodes de simulation du signal adaptées à l'imagerie terrestre	45
3.2.2.1	Radiosité par calcul des coefficients angulaires	45
3.2.2.2	Synthèse d'images par lancer de rayon	45
3.2.3	Comparaison des techniques	45
3.2.4	Conclusion	48
3.3	Choix d'un code de simulation	48
3.4	Calcul de la luminance par lancer de rayon	48
3.4.1	Principe général	49
3.4.1.1	Données en entrée	49
3.4.1.2	Intégration de Monte-Carlo	49
3.4.2	Algorithme de lancer de rayon	49
3.4.2.1	Génération du premier rayon issu de la caméra	49
3.4.2.2	Interaction avec la surface rencontrée	51
3.4.2.3	Calcul de la transmittance le long des rayons	52
3.4.2.4	Critère d'arrêt	52
3.4.2.5	Estimation de la luminance directe en un point dans une direction	53
3.4.2.6	Luminance portée par une contribution	53
3.4.2.7	Valeur en luminance d'un pixel	53
3.4.2.8	Intégration spectrale	54
3.4.3	Implémentation efficace	54
3.4.3.1	<i>Path tracing</i>	54
3.4.3.2	Échantillonnage préférentiel	54
3.5	Simulation des différents termes avec IRSUTE	55
3.5.1	Soleil	55
3.5.2	Intégration volumique	55
3.5.3	Méthode indirecte : rajout de sources	56
3.5.3.1	Prise en compte de la diffusion atmosphérique par carte d'environnement	56
3.5.3.2	Luminance parasite	57
3.6	Validation	58
3.6.1	Convergence	58
3.6.2	Validation sur des scènes simples	58
3.6.2.1	Marche séparant deux plateaux	58
3.6.2.2	Canyon	61
3.6.3	Validation sur des scènes complexes par comparaison avec AMARTIS v2	62
3.6.4	Conclusion	63
4	Estimation de l'illumination	67
4.1	État de l'art	67
4.2	Problématique	67
4.2.1	Limites des codes de transfert radiatif	68
4.2.2	Utilisation de l'information des images voyant le ciel	68

4.3	Dispositif pour l'estimation de l'éclairement solaire direct	69
4.3.1	Méthode ombre/soleil	69
4.3.2	Utilisation d'une plaque lambertienne de référence	70
4.4	Estimation de la luminance du ciel	72
4.4.1	Données en entrée : prétraitement et défauts	72
4.4.1.1	Défauts radiométriques	72
4.4.1.2	Correction de flat-field	74
4.4.2	Détection des pixels de ciel	76
4.4.2.1	Seuillage sur les valeurs des pixels	76
4.4.2.2	Utilisation d'un modèle 3D	77
4.4.3	Aggrégation des pixels de ciel	78
4.4.4	Estimation d'un modèle paramétrique	81
4.4.5	Utilisation du modèle paramétrique pour correction de la carte d'environnement	81
4.4.6	Résultats	81
4.4.7	Influence de la carte d'environnement sur la simulation	85
4.5	Conclusion	86
5	Méthode d'estimation des réflectances	87
5.1	Introduction	87
5.1.1	Problématique	87
5.1.2	État de l'art	87
5.2	Cas simple : scène lambertienne, illumination connue	88
5.2.1	Inversion explicite	88
5.2.2	Exemple sur une scène synthétique	89
5.3	Lancer de rayon formel	90
5.3.1	Principe et intérêt	90
5.3.2	Expression de la luminance formelle	90
5.3.2.1	Exemple : cas lambertien	91
5.3.3	Complexité et stockage	94
5.3.3.1	Cas lambertien	94
5.3.3.2	Cas d'un modèle paramétrique de BRDF	94
5.3.3.3	Modèles de BRDF à noyaux	95
5.3.3.4	Nombre de termes de la fonction coût	96
5.3.3.5	Stocker l'image formelle ou la fonction coût ?	96
5.3.4	Implémentation du lancer de rayons formel	97
5.3.4.1	Intégration à l'outil de simulation	97
5.3.4.2	Structure de données du lancer de rayon formel	97
5.3.4.3	Performance	97
5.4	Inversion : estimation des paramètres de réflectance	99
5.4.1	Algorithme de minimisation	99
5.4.2	Implémentation de la minimisation	99
5.4.2.1	Utilisation de GSL	99
5.4.2.2	Minimisation de polynômes multivariés : essai avec Gloptipoly	99
5.4.3	Validation sur scènes synthétiques	100
5.4.3.1	Matériaux lambertiens	100
5.4.3.2	Modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire	100
5.4.3.3	Gain en temps de calcul	105
5.5	Conclusion	105

6	Bilan et perspectives	107
6.1	Contributions	107
6.1.1	Un outil de simulation physique générique	107
6.1.2	Une méthode d'estimation de la réflectance par lancer de rayon formel	108
6.2	Perspectives : vers un traitement des images urbaines	108
6.2.1	Utilisation radiométrique des images terrestres urbaines	108
6.2.2	Segmentation du modèle 3D de la scène	108
6.2.2.1	Problématique	108
6.2.2.2	Quelques pistes	108
6.2.3	Application aux données Stereopolis	109
6.2.4	Campagnes d'acquisition réalisées	109
6.2.4.1	Acquisitions Stereopolis spécifiques	109
6.2.5	Utilisation d'une carte d'environnement dans le cas d'une acquisition panoramique	110
6.2.5.1	Illumination distante	110
6.2.5.2	Algorithme utilisant le modèle 3D	110
6.2.5.3	Conclusion	112
6.2.6	Amélioration et/ou simplification de la méthode d'inversion	112
6.2.6.1	Campagne UMBRA	112
6.3	Conclusion générale	113
A	Annexes	121
A.1	Modélisation du système caméra	121
A.1.1	Les phénomènes	121
A.1.1.1	Réponse spectrale	121
A.1.1.2	Atténuation optique	121
A.1.1.3	Vignettage	123
A.1.1.4	Réponse des photosites et système électronique	123
A.1.1.5	Variations locales	123
A.1.1.6	Bruit	123
A.1.2	Modélisation de la valeur des pixels	125
A.1.2.1	Cas général	125
A.1.2.2	<i>Flat-field</i>	125
A.2	La pénombre	127
A.2.1	Modélisation de la taille de la pénombre	127
A.2.2	Comparaison des modèles de taille de pénombre	128
A.2.3	Expression dans un cas simple	128
A.2.4	Profil d'atténuation	128
A.3	Les équations du <i>path tracing</i>	131
A.3.1	Interaction avec une surface	131
A.3.2	Optimisation du critère d'arrêt	132
A.3.3	Valeur en luminance d'un pixel	132
A.3.4	Path tracing bidirectionnel	132
A.4	Publications	133

Table des figures

1.1	Description de la chaîne typique d'acquisition et traitement des données avec un véhicule de cartographie mobile.	20
1.2	Illustration du ré-éclairage par Troccoli and Allen (2005) : on veut transformer l'image de gauche en l'image de droite (faire abstraction du scanner sur le trépied).	21
1.3	Forts contrastes dans l'illumination d'une scène urbaine entre les façades éclairées ou non (image Stereopolis).	22
1.4	Exemple de conditions d'éclairage et de visée rasantes en milieu urbain.	23
1.5	Schéma général de la méthode proposée pour l'estimation des réflectances des matériaux d'une scène urbaine imagée par un système de numérisation mobile.	24
2.1	Angles utilisés pour la définition de la BRDF. θ désigne les angles zénithaux, ϕ les angles azimutaux, i indique un rayon incident (source), r indique un rayon réfléchi (visée). Illustration de Boldo (2002).	28
2.2	Décomposition de la luminance directe en entrée du capteur.	31
2.3	Luminance parasite en entrée du capteur.	32
2.4	La luminance renvoyée par un point est l'intégrale des luminances reçues pondérées par la BRDF.	35
2.5	Les différentes composantes du signal image en fonction des interactions possibles pour un rayon.	38
2.6	Réflectance directionnelle-hémisphérique ρ_{dh} mesurée sur le spectromètre Lambda 900 de l'ONERA pour différents matériaux urbains. L'angle d'incidence est de 0°	39
2.7	Réflectance ρ_{dd} mesurée sur le banc Melopee de l'ONERA pour quelques matériaux urbains, avec un angle d'incidence de 0°	40
2.8	Ordres de grandeur de différents termes du bilan radiométrique sur une scène de canyon urbain, pour les trois canaux rouge (R), vert (V) et bleu (B) correspondant aux bandes spectrales de la caméra aérienne numérique IGN (Martinoty, 2005).	41
3.1	Trajet d'une contribution issue de la caméra, subissant trois réflexions en I_1 , I_2 et I_3 avant d'atteindre une source de lumière.	50
3.2	Dernier point intersecté par un rayon avant arrêt.	52
3.3	Intégration volumique approchée implémentée dans LuxRender.	56
3.4	Exemple de carte d'environnement, à la longueur d'onde 550 nm.	57
3.5	Vitesse de convergence du lancer de rayon. Croix et courbes noires : temps de calcul mesurés. Courbe rouge : courbe paramétrique estimée à partir des mesures.	59

3.6	Schéma de la scène de la marche.	59
3.7	Image d'éclairement direct de la marche simulée avec IRSUTE.	60
3.8	Profils théorique (en rouge) et simulé (en bleu) avec IRSUTE sur la scène de la marche.	60
3.9	Schéma de la scène du canyon.	61
3.10	Image d'éclairement direct du canyon simulée avec IRSUTE.	61
3.11	Profils théorique (en rouge) et simulé (en bleu) par IRSUTE sur la scène du canyon.	62
3.12	Scène de carrefour urbain, utilisée pour la comparaison de notre outil de simulation avec AMARTIS v2. Visualisation avec le logiciel Blender.	63
3.13	Comparaison de l'éclairement total au sol entre les simulations AMARTIS et IRSUTE. L'échelle de représentation des valeurs en niveau de gris est différente sur l'image des différences. Les valeurs des images sont en $W.m^{-2}$	64
3.14	Écart relatif entre les simulations IRSUTE et AMARTIS. Les pixels présentant un fort écart sont en rouge. Les valeurs sont sans dimension.	65
3.15	Simulation avec notre outil sur une scène comportant des bâtiments complexes. À gauche : modèle 3D visualisé avec Blender. À droite : image simulée avec IRSUTE.	65
4.1	Illustration de la méthode ombre/soleil ; le bord d'ombre est ici généré par le haut d'un bâtiment.	69
4.2	Dispositif pour l'estimation de l'éclairement solaire direct : une plaque de référence est placée sur le toit de Stereopolis, surplombée d'un cache alternant parties pleines et trous pour créer des bords d'ombre. La plaque est imagée par une caméra dédiée. Cette photo a été prise lors de la campagne UMBRA (cf. la section 6.2.6.1)	72
4.3	Exemple d'images utilisées pour l'estimation de l'illumination céleste (images des caméras gauche et droite de la tête panoramique d'acquisition, pour 6 stations du véhicule, avec les mêmes réglages d'affichage).	73
4.4	Extrait d'une image avec des artefacts visibles : effet de <i>bloom</i> , saturation et distortion colorimétrique.	74
4.5	Image affectée par une forte coulée verticale, accentuée par l'usure du capteur.	75
4.6	Exemple d'artefact rose apparaissant lors d'une correction de flat-field sans traitement préalable des pixels ayant au moins un canal saturé.	76
4.7	Résultats de la détection de ciel (b) et de ciel bleu (c), à partir d'une image Stereopolis (a).	77
4.8	Modèle BATI-3D [®] sur la ville de Saint-Mandé.	78
4.9	Résultats de la détection de ciel par utilisation d'un modèle BATI-3D [®] , avec 4 images de la tête panoramique.	79
4.10	Résultats de la détection de ciel par seuillages en utilisant le masque calculé avec le modèle BATI-3D [®] (cf. figure 4.9)	80
4.11	Image originale (en haut) et différence $D_{Perez\ fiable-ciel\ bleu}$ entre le modèle de Perez estimé et les pixels détectés comme ciel bleu. Un faible voile nuageux est mis en évidence. Les zones blanches homogènes sont celles où il n'y a pas de pixels de ciel bleu détectés. Les paramètres d'affichage sont choisis pour optimiser le contraste visuel.	82
4.12	Les étapes de la méthode d'estimation de l'illumination céleste.	83
4.13	Cartes d'environnement extraites des images. La déviation vers le rouge des artefacts est visible sur l'image différence d).	84
4.14	Comparaison de l'éclairement simulé avec différentes cartes d'environnement.	86

TABLE DES FIGURES

5.1	Algorithme d'inversion pour une scène lambertienne.	89
5.2	Inversion sur une scène synthétique lambertienne.	90
5.3	Algorithme d'inversion avec un lancer de rayon numérique.	91
5.4	Algorithme d'inversion avec un lancer de rayons formel.	92
5.5	Exemple de lancer de rayon sur une scène lambertienne	93
5.6	Diagramme UML simplifié expliquant les principales structures de données dans le code de lancer de rayon formel basé sur LuxRender.	98
5.7	Images simulées sur la scène du carrefour (les niveaux de gris ne sont pas comparables entre les deux modèles, les paramètres d'affichage étant différents pour éviter les zones saturées ou trop sombres)	101
5.8	Estimations itératives successives des paramètres de réflectance dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène de carrefour urbain.	103
5.9	Estimations itératives successives des paramètres de réflectance dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène avec bâtiments complexes.	104
5.10	Comparaison des temps de calcul des réflectances avec l'algorithme d'inversion en utilisant le lancer de rayon formel ou non.	105
6.1	Non validité de l'hypothèse d'illumination distante pour une scène de canyon urbain.	111
6.2	Illustration de l'algorithme de simulation de la lumière avec une carte d'environnement issue de la tête panoramique.	111
6.3	Mesures de luminance à l'aide d'un spectroradiomètre ASD sur une cible en vinyle dont les propriétés de réflectance sont par ailleurs mesurées en laboratoire. Site d'Amiens, campagne UMBRA.	113
A.1	Réponse spectrale des filtres colorés (a), des photosites (b), et réponse spectrale de la caméra (c)=(a)·(b). Caméra numérique IGN (destinée aux missions aéroportées, montrée ici à titre d'exemple) (Martinoty, 2005).	122
A.2	Effet d'une poussière sur l'optique pour une image aérienne, bien visible au niveau du cours d'eau. Caméra argentique, IGN.	124
A.3	Exemple de pixel chaud : un des pixels centraux renvoie une forte valeur sur ces trois images, indépendamment de la luminance en entrée du capteur.	124
A.4	Exemple de <i>flat-field</i> d'une caméra terrestre (sans correction de la balance des blancs).	126
A.5	Caractéristiques géométriques d'une zone de pénombre.	127
A.6	Comparaison de la taille de la pénombre (en m) sur une surface horizontale avec la formule approchée (A.6) (en rouge) et avec la formule proposée par Dare (2005) (en bleu), en fonction de l'angle d'élévation solaire (en radians). Calcul effectué avec un bâtiment masquant d'une hauteur de 10 m.	129
A.7	Atténuation (grandeur sans dimension entre 0 et 1) de l'éclairement solaire direct dans une zone de pénombre de demi-taille arbitraire $\Delta x_s = 1$	129

Liste des tableaux

2.1	Évolution annuelle de l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère (E_{TOA}) et de l'angle apparent du soleil (Jacquemoud, 2007).	40
3.1	Comparaison des méthodes de simulation dans différents travaux antérieurs.	47
4.1	Résultats de l'estimation de l'éclairement solaire direct par la méthode ombre-soleil sur des images de la plaque de référence. Les grandeurs notées L sont des valeurs numériques de pixels; les grandeurs E_{direct} sont donc également des valeurs numériques sans unité.	71
5.1	Nombre de termes maximal pour exprimer la luminance d'un pixel, dans le cas lambertien	95
5.2	Nombre de pixels au-delà duquel le stockage des images formelles complètes est plus volumineux que le stockage de la fonction coût	96
5.3	Résultats numériques de l'inversion dans le cas lambertien.	100
5.4	Résultats numériques de l'inversion dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène de carrefour urbain.	102
5.5	Résultats numériques de l'inversion dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène avec bâtiments complexes.	102

Introduction

1.1 Contexte

L'acquisition d'images terrestres à l'aide de véhicules de cartographie mobile est une technologie récente mais qui a déjà permis la production de nombreuses données utilisables, notamment dans des navigateurs immersifs (de type *street-view*). Ces images représentent de grands volumes de données qui posent encore certains problèmes scientifiques : le géoréférencement de grands blocs d'images, la fusion des informations de différents capteurs (caméras, LiDAR, GNSS, centrale à inertie, odomètre), mais également l'utilisation de la radiométrie des images. En effet, pour améliorer la lisibilité de ces images, en extraire le maximum d'information possible, et les afficher avec un rendu agréable à l'œil, il est nécessaire de comprendre l'information radiométrique qu'elles contiennent pour pouvoir l'exploiter.

1.1.1 L'image numérique comme mesure de la luminance

L'apparition des caméras numériques dans les années 90 a permis l'exploitation de l'information radiométrique (luminance) que contiennent les images acquises ([Honkavaara et al., 2009](#)). En effet, ceci était auparavant difficile à cause de la réponse non linéaire des films argentiques, et surtout à cause de la déformation colorimétrique difficilement modélisable introduite par le processus de développement de ces films ([Kasser and Egels, 2001](#)). Cela permet donc d'utiliser la caméra numérique comme un appareil de mesure de la luminance reçue dans son champ de vision, moyennant un pré-traitement (cf. l'annexe [A.1](#)).

1.1.2 Chaîne typique d'acquisition par véhicule de cartographie mobile

L'acquisition d'images par un véhicule de cartographie mobile nécessite un traitement spécifique détaillé sur la figure [1.1](#) ([Paparoditis et al., 2012](#)). Les images brutes issues des caméras sont orientées (on dit également géoréférencées) grâce aux données de trajectographie issues du ou des récepteurs GNSS et de la centrale inertielle (INS), et à l'orientation relative des caméras par rapport au reste du système, étalonnée au préalable. Cette étape fournit pour chaque image sa formule image, permettant de transformer des coordonnées 3D dans le repère terrain en coordonnées 2D dans l'image.

Les images géoréférencées sont ensuite traitées radiométriquement grâce aux données issues de l'étalonnage radiométrique. Au minimum une correction de *flat-field* est réalisée, au mieux les images sont transformées en valeurs de luminance absolue (cf. l'annexe [A.1](#)). Ces images finales peuvent ensuite être utilisées pour diverses applications, notamment :

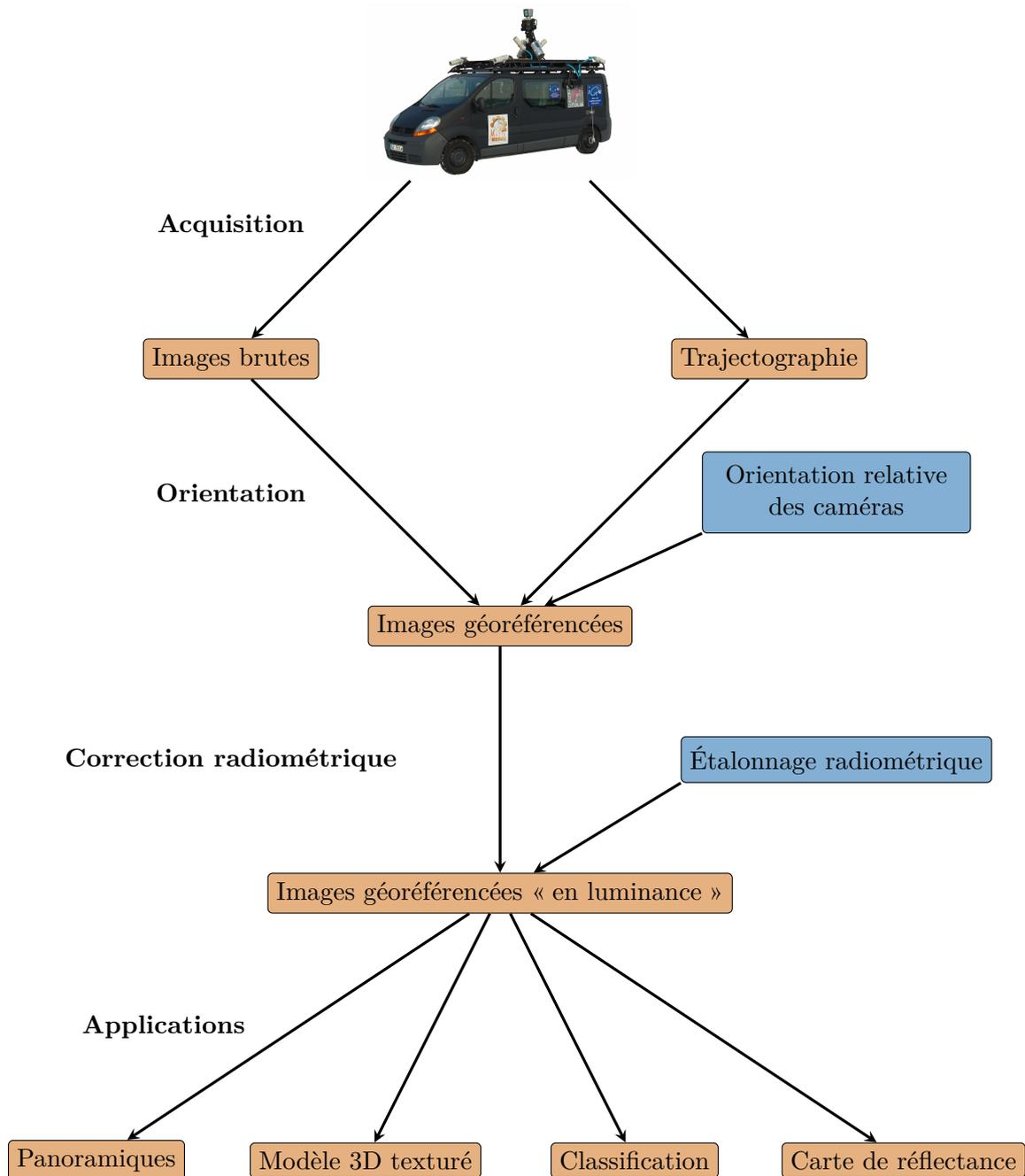


FIGURE 1.1 – Description de la chaîne typique d’acquisition et traitement des données avec un véhicule de cartographie mobile.

1.1. CONTEXTE



FIGURE 1.2 – Illustration du ré-éclairage par Troccoli and Allen (2005) : on veut transformer l'image de gauche en l'image de droite (faire abstraction du scanner sur le trépied).

- la production d'images panoramiques pour une visualisation avec navigation fluide entre les images ;
- la texturation de modèles 3D par projection de l'information des pixels sur un modèle 3D ;
- la classification des matériaux sur critères radiométriques ;
- l'estimation de cartes de réflectance pour un ré-éclairage de la scène avec une illumination quelconque : c'est l'objectif de cette thèse.

1.1.3 Applications envisagées

La maîtrise de la radiométrie des images terrestres permettrait des applications à valeur ajoutée pour augmenter l'attrait d'un visualisateur d'images terrestres en ligne de type *street-view*, comme par exemple celui proposé par Devaux et al. (2012). Dans ce cadre, une application majeure est le ré-éclairage de la scène sous des conditions d'éclairage (saison, heure, météo) souhaitées par l'utilisateur (voir la figure 1.2 pour un exemple par Troccoli and Allen (2005)). D'autres applications possibles sont l'égalisation radiométrique d'une mosaïque d'images, la correction des ombres, la classification (répartition des pixels d'une image dans des classes homogènes) sur critères indépendants de l'illumination.

1.1.4 Difficultés

L'information radiométrique contenue dans ces images est difficile à exploiter, pour plusieurs raisons :

- les scènes présentent de fortes variations d'illumination, notamment en zone urbaine. Par exemple, les zones soumises à l'éclairage direct du soleil (façades orientées au sud) et les zones situées à l'ombre du soleil (façades orientées au nord) présentent de forts contrastes (cf. figure 1.3) . Même si la qualité des caméras actuelles permet de disposer d'images à grande dynamique (typiquement 12 bits pour l'acquisition), il est souvent difficile de capter correctement tous les niveaux de luminance d'une scène (phénomène de saturation pour les fortes valeurs et de bruit pour les faibles valeurs). De plus, l'illumination n'est pas constante dans le temps : le soleil bouge, les conditions météorologiques changent.



FIGURE 1.3 – Forts contrastes dans l’illumination d’une scène urbaine entre les façades éclairées ou non (image Stereopolis).

- l’étalonnage radiométrique des caméras permettant de transformer les comptes numériques des pixel en valeur physique de luminance est complexe car différents phénomènes au sein de la caméra le rendent dépendant de la scène (voir l’annexe A.1).
- dans le cas général, la réflectance d’un matériau dépend des angles d’incidence et de réflexion, i.e. un point de la scène ne donnera pas la même valeur de pixel dans deux images ayant des points de vue différents ou n’étant pas acquises avec la même illumination.

1.2 Formulation du problème

1.2.1 La luminance dépend de l’illumination

Les images utilisées pour la texturation d’une base de données 3D sont généralement issues de plusieurs acquisitions différentes, donc prises avec un horaire et des conditions météorologiques différentes. De plus, en raison des masquages et de la configuration panoramique des caméras, l’information utilisée sera issue de points de vue et d’angles d’incidence différents. On a donc des données multi-dates, et multi-vues.

La luminance captée par une caméra, issue d’un objet de la scène, dépend :

- de l’illumination de la scène (soleil et ciel pour les scènes extérieures de jour), qui varie grandement en fonction du temps et des conditions météorologiques de la prise de vue,
- des propriétés de réflectance des matériaux, modélisées par la BRDF (cf. la section 2.1.2.1), qui sont constantes dans le temps si le matériau ne subit pas de changement.

On veut s’affranchir de l’influence de l’illumination pour retrouver la réflectance, qui est une grandeur intrinsèque au matériau.

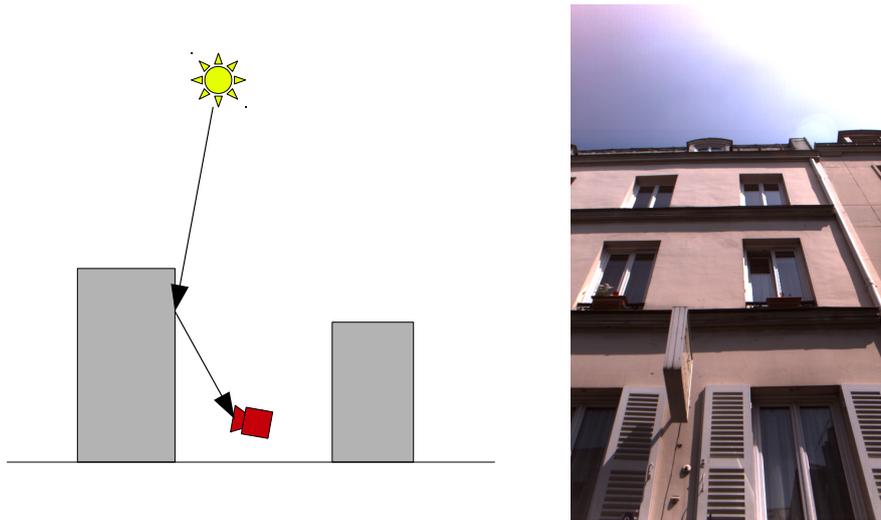


FIGURE 1.4 – Exemple de conditions d'éclairage et de visée rasantes en milieu urbain.

1.2.2 Spécificités de l'imagerie terrestre

L'imagerie urbaine terrestre à haute résolution (pixel de l'ordre du cm sur les façades proches) présente des caractéristiques particulières du fait de la non-validité des hypothèses simplificatrices utilisées habituellement en télédétection spatiale. Ainsi, une hypothèse de sol plat, si elle peut être utilisée en imagerie spatiale basse résolution, ne pourra plus l'être ici, où l'objet d'intérêt est justement le « relief » urbain : les bâtiments. Cela implique que la lumière réfléchie entre les différents objets de la scène n'est pas négligeable, ce qui complique beaucoup la résolution du problème inverse (cf. chapitre 5). De même, du fait de la géométrie de visée particulière aux acquisitions terrestres, les angles de visée et d'éclairage peuvent être très rasants (cf. figure 1.4). On appelle angle rasant un angle supérieur à 60° entre le rayon lumineux considéré et la normale à la surface imagée. Ainsi, des effets directionnels particuliers, rares en télédétection aéroportée ou spatiale, peuvent apparaître en imagerie terrestre, notamment pour les vitres des bâtiments.

La chaîne de traitement développée doit donc être adaptée à ces contraintes.

1.2.3 Problématique : estimation de la réflectance

On se propose d'estimer, à partir d'images terrestres urbaines, les propriétés de réflectance des matériaux de la scène, par inversion du modèle radiométrique de formation des images (modèle qui représente le problème direct).

Dans ce travail, on choisit a priori d'utiliser une modélisation physique des phénomènes mis en jeu, et non une méthode purement basée image, afin d'explorer le potentiel de méthodes physiques. On suppose que la géométrie de la scène est parfaitement connue et que les images sont corrigées de façon à donner la luminance en entrée du capteur.

1.3 Méthodologie

1.3.1 Principe général

La méthode développée au cours de cette thèse est résumée dans la figure 1.5.

L'acquisition et le traitement géométrique des données images et LiDAR ne seront pas traités ici (voir [Paparoditis et al. \(2012\)](#)). Ces données sont géoréférencées et peuvent servir

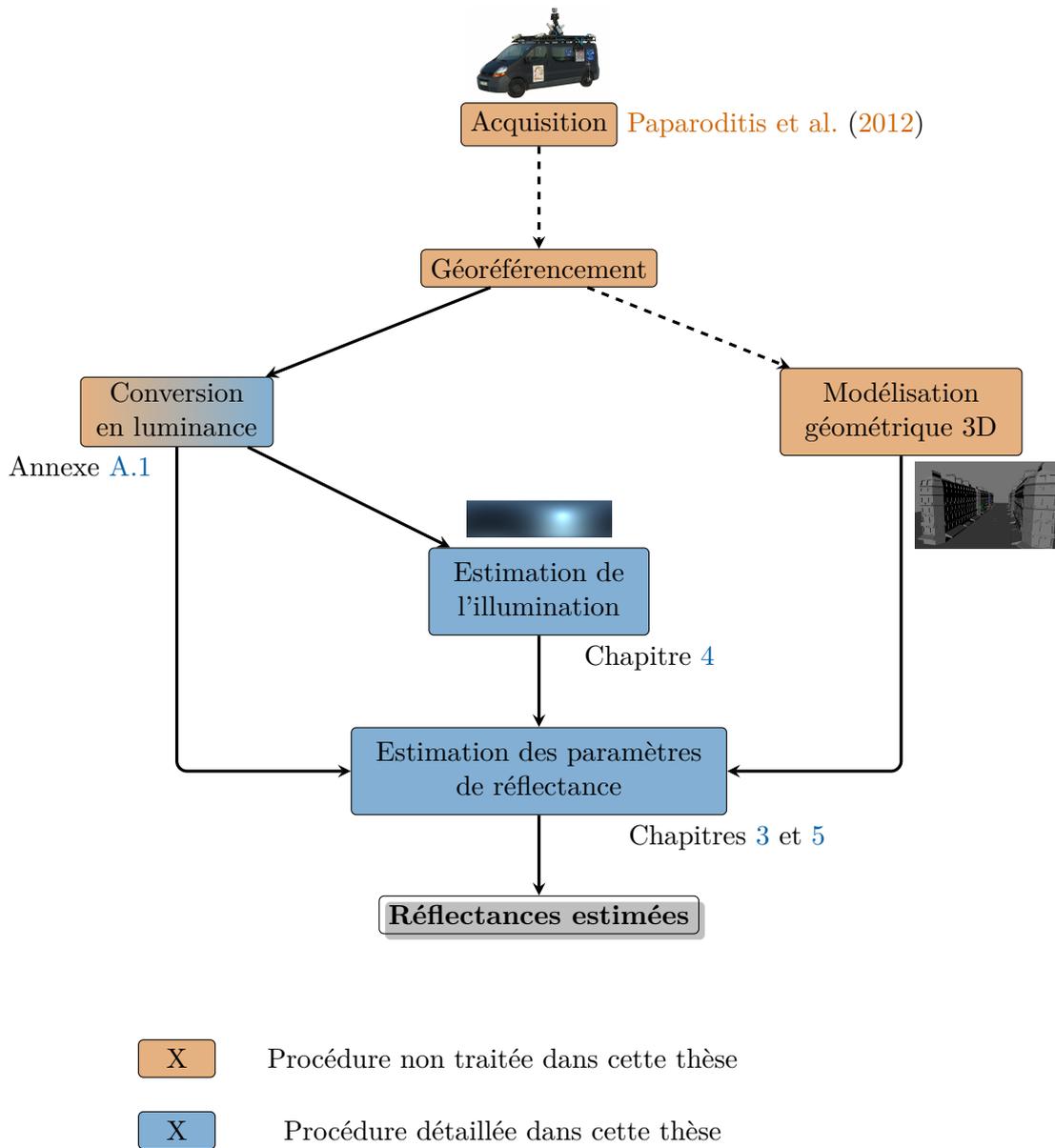


FIGURE 1.5 – Schéma général de la méthode proposée pour l’estimation des réflectances des matériaux d’une scène urbaine imagée par un système de numérisation mobile.

au calcul d'un modèle géométrique 3D de la scène (voir par exemple [Musialski et al. \(2012\)](#) pour un état de l'art), qui est une donnée d'entrée de notre algorithme d'estimation des réflectances. Les images sont corrigées radiométriquement de manière à représenter la luminance en entrée du capteur (cf. l'annexe [A.1](#)), éventuellement à un facteur près (le gain absolu de la caméra, permettant de passer d'un compte numérique corrigé à une valeur de luminance en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$).

Ces images en luminance sont utilisées pour modéliser l'illumination de la scène (cf. le chapitre [4](#)), en utilisant les pixels de ciel des images panoramiques pour reconstituer une carte d'environnement de la scène, et en utilisant des points situés de part et d'autre d'une limite d'ombre pour estimer l'éclairement solaire.

Le modèle 3D et l'illumination servent à simuler des données en luminance avec des paramètres de réflectance arbitraires (cf. le chapitre [3](#)), en utilisant un code de lancer de rayon.

La simulation de la luminance est le cœur de l'algorithme d'estimation de la réflectance (cf. le chapitre [5](#)), qui consiste en la résolution d'un problème inverse dans lequel les pixels des images réelles acquises servent d'observations. Pour cela, nous proposons une simulation par un lancer de rayon formel calculant les valeurs de pixels comme des fonctions des paramètres de réflectance, simplifiant ainsi les itérations de l'algorithme de minimisation qui sert à résoudre le problème inverse.

1.3.2 Contributions originales

La principale contribution originale de ce travail réside dans le calcul formel de la luminance portée par les rayons, qui sont lancés lors de la simulation, afin de permettre une inversion du modèle de formation des images en ne réalisant qu'une seule simulation par lancer de rayon.

Une autre contribution est l'étude d'une chaîne complète de traitement physique d'un jeu d'images terrestres urbaines, sans utilisation de capteurs radiométriques autres que les caméras.

1.4 Plan du manuscrit

Après ce chapitre d'introduction (chapitre [1](#)), on présente une modélisation du signal image adaptée à l'imagerie urbaine terrestre (chapitre [2](#)), ainsi que les techniques de simulation de telles images : c'est le problème direct pour notre sujet (chapitre [3](#)). On présente ensuite une méthode d'estimation de l'illumination de la scène à partir des images (chapitre [4](#)), qui est une entrée du système. La méthode d'inversion du modèle radiométrique est ensuite présentée, utilisant la différence entre images paramétriques simulées et images réelles acquises pour estimer les paramètres de réflectance des matériaux de la scène (chapitre [5](#)). Un bilan global et des pistes pour le traitement de données réelles issues du véhicule de cartographie mobile Stereopolis sont ensuite discutées, avant d'établir les perspectives de ce travail (chapitre [6](#)).

Modélisation du signal image en milieu urbain

Le problème inverse qu'est l'estimation de la réflectance à partir d'images nécessite la connaissance des mécanismes de formation de ces images, qui constitue le problème direct. Nous rappelons donc dans ce chapitre une modélisation du signal image adaptée au milieu urbain et aux images à très haute résolution. Deux formalismes seront présentés puis mis en relation : celui de la télédétection physique et celui de l'informatique graphique.

2.1 Rappels de radiométrie : définitions et notations

2.1.1 Grandeurs énergétiques du rayonnement

Le rayonnement lumineux porte une énergie qui est exprimée par des grandeurs spécifiques. On note qu'il s'agit bien des grandeurs énergétiques, et non des grandeurs visuelles (dites photométriques) liées à la sensibilité de l'œil humain.

- le flux F est l'énergie par unité de temps. Il s'agit donc d'une puissance, exprimée en W ;
- l'éclairement (en anglais *irradiance*) est le flux par unité de surface, noté E , en $W.m^{-2}$;
- la luminance (en anglais *radiance*) est le flux par unité de surface et par unité d'angle solide, noté L , en $W.m^{-2}.sr^{-1}$. **La luminance d'un rayon lumineux se conserve lors de sa propagation dans le vide** (Meyzonnette and Lépine, 1999).

Ces grandeurs peuvent être exprimées pour une longueur d'onde donnée : on parle alors de grandeurs spectrales ou monochromatiques.

2.1.2 Propriétés optiques

2.1.2.1 Réflectance des matériaux

Les matériaux absorbent une partie de la lumière et réfléchissent le reste dans l'hémisphère surplombant leur surface. La BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), introduite par Nicodemus (1977) est le rapport de la luminance dL_r réfléchie dans la direction (θ_r, ϕ_r) par un élément de surface, sur l'éclairement dE_i reçu par cet élément de surface dans

une certaine direction d'incidence (θ_i, ϕ_i) et un angle solide élémentaire $d\omega_i$ (cf. figure 2.1) .

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos(\theta_i) d\omega_i} \text{ en } sr^{-1} \quad (2.1)$$

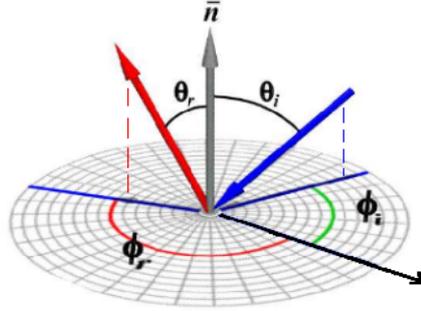


FIGURE 2.1 – Angles utilisés pour la définition de la BRDF. θ désigne les angles zénithaux, ϕ les angles azimutaux, i indique un rayon incident (source), r indique un rayon réfléchi (visée). Illustration de Boldo (2002).

Le terme réflectance bidirectionnelle désigne la BRDF multipliée par π :

$$\rho^{dd}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \pi \cdot BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \text{ (sans unité)} \quad (2.2)$$

La réflectance directionnelle-hémisphérique ρ_{dh} est définie par :

$$\rho_{dh}(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} \rho^{dd}(\theta_i, \phi_i, \theta, \phi, \lambda) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.3)$$

Lorsque la réflectance ne dépend ni de la direction d'incidence ni de la direction de visée, on parle de réflectance lambertienne ρ :

$$\forall(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r), BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \quad (2.4)$$

Ainsi, dans le cas général d'un matériau non lambertien, la réflectance en un point donné de la surface est décrite par une fonction à quatre paramètres pour une longueur d'onde donnée. Sa modélisation est indispensable pour la simulation des images, et elle a été étudiée dans de nombreux travaux : Montes Soldado and Ureña Almagro (2012) et Doz (2011) proposent un état de l'art très complet, Jacques (2002) propose une étude de l'adéquation de différents modèles pour les milieux urbains.

2.1.2.2 Gaz et aérosols

La composante de la lumière qui est transmise le long de la direction d'incidence lors de la traversée d'un milieu transparent homogène, comme par exemple l'atmosphère, est définie par plusieurs grandeurs (qui dépendent de la longueur d'onde).

- le coefficient d'extinction σ_e d'un milieu, exprimé en m^{-1} , définit l'atténuation de l'énergie transmise en ligne droite dans la direction de propagation x , selon :

$$dF(x) = -\sigma_e F(x) dx \quad (2.5)$$

Cette extinction est due à l'absorption et à la diffusion par les particules : $\sigma_e = \sigma_a + \sigma_d$ où σ_a est le coefficient d'absorption et σ_d est le coefficient de diffusion. L'intégration de l'équation (2.5) sur le trajet rectiligne de x_1 à x_2 donne la loi de Beer-Lambert :

$$F(x_2) = F(x_1) \cdot \exp\left(-\int_{x_1}^{x_2} \sigma_e dx\right) \quad (2.6)$$

- l'épaisseur optique est la quantité sans dimension $\tau = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_e dx$;
- la transmittance ou transmission est la quantité sans dimension $T = \exp(-\tau)$. Il s'agit du rapport du flux sortant sur le flux entrant sur le trajet considéré. Par exemple, on note T^\downarrow la transmittance sur une traversée verticale du haut de l'atmosphère au sol, T^\uparrow la transmittance sur le trajet entre la cible et la caméra.

La traversée d'un milieu transparent non vide donne également lieu à la diffusion, qui est une déviation d'une partie de la lumière incidente dans toutes les directions. La théorie de Mie décrit cette diffusion pour les grosses particules (de taille de l'ordre de grandeur supérieur ou égal à la longueur d'onde, typiquement les aérosols et les météores), tandis que la théorie de Rayleigh décrit le comportement des petites particules (typiquement les molécules de gaz) (Thomas, 2010).

Un paramètre global et facilement observable sert parfois à définir l'atmosphère : la visibilité, utilisée principalement en aéronautique. Il s'agit de la distance horizontale V maximale au-delà de laquelle on ne distingue plus une certaine cible standard. Elle est liée empiriquement au coefficient d'extinction par : $e^{-\sigma_e V} = 2\%$. Elle est utilisable par exemple dans le code de transfert radiatif 6S (Vermote et al., 1997).

2.2 État de l'art : modélisation du signal image

La simulation physique d'images de luminance nécessite la connaissance des phénomènes de propagation de la lumière dans la scène, depuis les sources de lumière jusqu'au capteur. Ces phénomènes complexes nécessitent la mise en œuvre de techniques particulières pour résoudre les intégrales mises en jeu. Ces techniques sont principalement étudiées par deux communautés, avec un cadre et des objectifs différents :

L'informatique graphique (*computer graphics en anglais*) cherche à simuler des images à grande résolution (à taille humaine, avec une taille terrain des pixels de l'ordre du centimètre), sur des scènes complexes en intérieur et en extérieur. Les longueurs d'onde considérées sont celles du spectre visible. Le photo-réalisme est un critère de qualité très important, les applications étant principalement esthétiques (jeux vidéo, cinéma, publicité, etc). Le temps de calcul est un autre critère important : les jeux vidéo nécessitent avant tout une simulation en temps réel, alors que la production d'images statiques n'est pas soumise à cette contrainte. Ainsi, certaines méthodes ne sont pas physiquement correctes, tandis que d'autres, généralement plus lentes, se basent sur les lois de la physique (Dutre et al., 2006). On ne s'intéresse ici qu'aux méthodes physiques, car elles seules peuvent apporter une cohérence entre images simulées et images réelles, indispensable dans un contexte d'inversion et non uniquement de simulation (cf. le chapitre 5).

La télédétection utilise les images (principalement aériennes et spatiales) pour estimer certaines propriétés physiques de la surface terrestre et de l'atmosphère. Les méthodes de télédétection privilégient la précision du résultat : il ne s'agit pas de générer des images photo-réalistes mais de calculer un rayonnement, pour une très large gamme de longueur d'onde (en fonction des applications). Ces méthodes nécessitent en entrée des données

sur la composition atmosphérique, qui ne sont pas triviales à mesurer (appareils spécifiques de mesure). Plus récemment sont apparues des images spatiales et aériennes à haute résolution (pixel au sol de taille ~ 3 m pour SPOT 6 et 7, jusqu'à 70 cm pour Pléiades (Cantou et al., 2006), jusqu'à 10 cm pour certaines missions aériennes spécifiques de l'IGN). Cela a apporté la nécessité de prendre en compte la rugosité de la scène (les bâtiments et leur interrélaxions pour les scènes urbaines), ce qui complexifie les méthodes de traitement de la radiométrie.

On peut noter que les phénomènes à modéliser varient en fonction du type de scène à traiter et de la résolution de l'image. Par exemple, les images de zones forestières nécessitent de connaître la propagation du rayonnement au sein du feuillage (Gascon, 2001), et les zones plates ou à faible rugosité par rapport à la résolution auront une modélisation simplifiée (voir par exemple Vermote et al. (1997)).

Les premières images numériques en télédétection spatiale se caractérisent par leur faible résolution spatiale permettant une modélisation radiométrique simple, en considérant le sol comme ayant des variations d'altitude de basse fréquence spatiale (voire un sol plat) ; cf. les méthodes présentées dans la section 3.2.1. Avec l'apparition d'images aériennes et d'images spatiales à très haute résolution (pixel au sol < 10 cm), les hypothèses de cette modélisation simple ne sont plus valables. En effet, la forte variabilité de la rugosité et les discontinuités du relief devenant importantes devant la résolution (surtout en zone urbaine), une modélisation plus fine du rayonnement au sein de la scène est requise (le rayonnement réfléchi sur les bâtiments doit être pris en compte) ; voir la section 3.2.1.3 pour les méthodes correspondantes.

De plus, la modélisation de la réflectance des objets change également avec la résolution. En effet, une image de basse résolution contient généralement des pixels mixtes englobant plusieurs matériaux et des facettes de normales différentes. En revanche, une image de très haute résolution contient des pixels qui voient des variations de la réflectance à haute fréquence spatiale de la réflectance. La BRDF est donc une notion qui dépend de l'échelle d'observation, car la limite entre rugosité et relief de la surface dépend de cette échelle.

2.3 Modélisation du signal image

En télédétection physique, on étudie principalement le signal acquis par un capteur aéroporté ou satellitaire, situé loin de la scène, à des résolutions allant jusqu'à l'ordre du mètre. Le but est généralement de modéliser les phénomènes affectant les images pour les corriger ou en tirer une information. En informatique graphique, les scènes peuvent être plus complexes (scènes d'intérieur, comprenant de nombreux objets, matériaux opaques ou translucides, fumées, etc), et on se concentre sur la rapidité des algorithmes permettant d'obtenir des images photo-réalistes. On présente donc ici les deux approches, avant de montrer l'équivalence entre les deux. On souhaite conserver le formalisme de la télédétection physique afin de garder la compréhension des grandeurs manipulées, tout en utilisant les méthodes de l'informatique graphique, performantes et adaptées aux scènes urbaines à haute résolution.

2.3.1 Approche phénoménologique globale

La télédétection adopte une modélisation par décomposition de la luminance et des éclaircissements en fonction des différents phénomènes physiques entrant en jeu.

2.3.1.1 Les différents phénomènes

Luminance directe La lumière issue du soleil arrive en haut de l'atmosphère avec un éclaircissement qui ne dépend quasiment que de la date (Paltridge and Platt, 1976), noté E_{TOA}

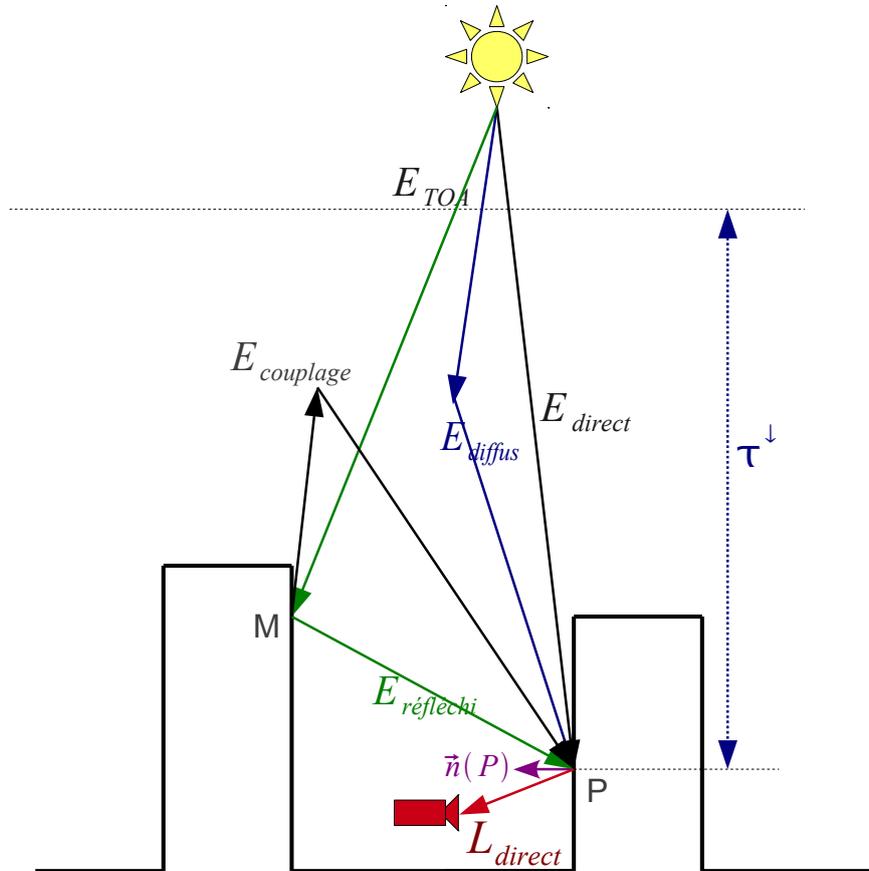


FIGURE 2.2 – Décomposition de la luminance directe en entrée du capteur.

(TOA pour *Top of Atmosphere*). Le long du trajet défini par la direction soleil vers pixel au sol, cet éclairement est atténué par l'absorption et la diffusion par les particules présentes (gaz et aérosols). La proportion de lumière atteignant le pixel sol forme l'éclairement direct E_{direct} . L'éclairement au sol issu de la diffusion est noté E_{diffus} ; pour un point de la scène, E_{diffus} est l'intégrale de la luminance diffusée par le ciel dans toutes les directions de l'angle solide de vue du ciel Ω_{ciel} .

La lumière arrivant sur la scène est réfléchi par les différents matériaux suivant leurs propriétés de réflectance. Une partie de cette lumière réfléchi atteint d'autres points de la scène, qui à leur tour réfléchissent une partie de la lumière : un point reçoit donc du reste de la scène un éclairement réfléchi noté $E_{réfléchi}$ (réflexion d'ordre 1), un éclairement de doubles réflexions $E_{double\ réflexion}$ (ordre 2), un éclairement $E_{réflexions >2}$ (réflexions à des ordres supérieurs à 2). Une autre partie (en fonction de la configuration géométrique) repart vers l'atmosphère, où elle sera en partie diffusée vers le sol. Ce processus est bien sûr itératif, et génère au sol un éclairement de couplage entre le sol et l'atmosphère, noté $E_{couplage}$.

Ces différents éclairements forment l'éclairement total au sol, dont une partie est réfléchi vers le capteur : la luminance directe en entrée du capteur, notée L_{direct} (cf. figure 2.2). Quand on s'intéresse à la réflectance des matériaux, cette luminance directe est la partie « utile » du signal capté, qui porte l'information sur les matériaux.

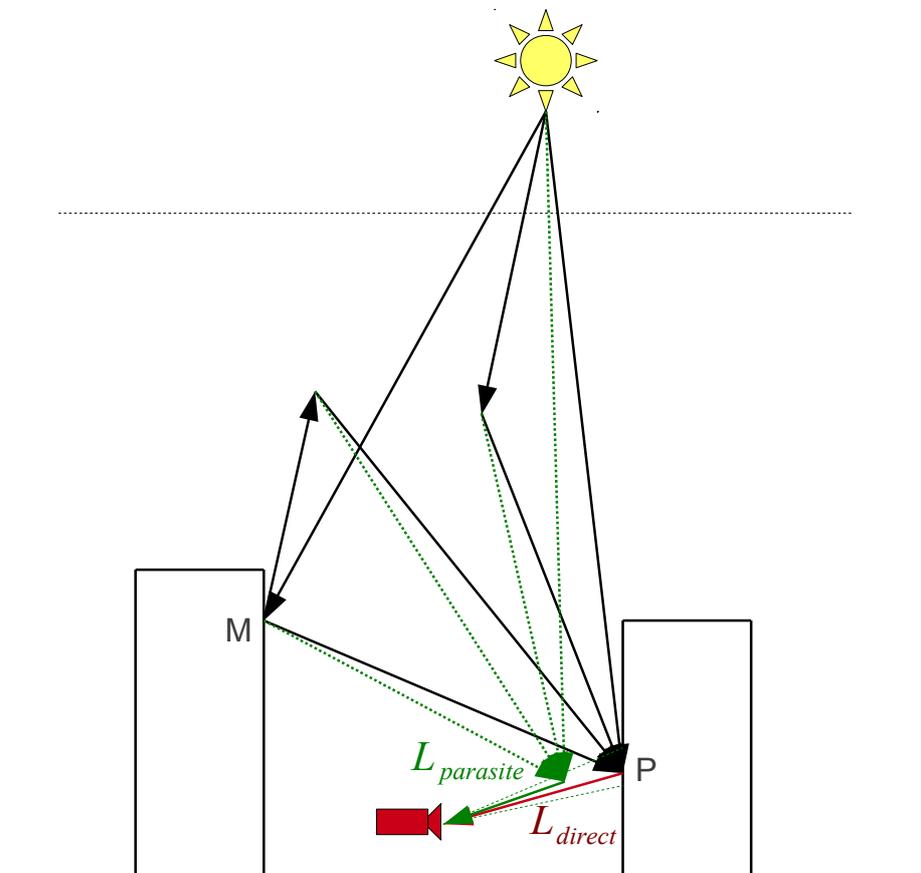


FIGURE 2.3 – Luminance parasite en entrée du capteur.

Luminance parasite La luminance en entrée du capteur ne provient pas que du point imagé (cible), mais provient également de la lumière diffusée par les particules atmosphériques situées sur le trajet entre la cible et le capteur (cf. figure 2.3). Cette luminance parasite $L_{parasite}$, également appelée luminance d'environnement, est considérée comme un signal à éliminer pour accéder à l'information recherchée sur les matériaux (elle pourrait être un signal utile si l'on s'intéressait à la caractérisation des propriétés de l'atmosphère). Elle est composée de :

- la luminance directement réfléchiée par les particules atmosphériques vers la caméra (sans interaction avec la scène), notée luminance atmosphérique ;
- la luminance issue de la scène puis diffusée vers la caméra, nommée luminance diffuse montante pour les acquisitions aéroportées ou spatiales (car il s'agit de la lumière qui remonte vers le capteur).

2.3.1.2 Expression analytique

Une expression analytique pour chaque terme de l'éclairement au sol et de la luminance au capteur est présentée par Doz (2011) ou Miesch (1999). Ces expressions ne sont pas toujours simples à mettre en œuvre dans la simulation, ne sont parfois valides que sous certaines hypothèses simplificatrices. Même si ces expressions ne sont pas directement utilisées dans notre travail, on en rappelle les grandes lignes pour illustrer les différents phénomènes présentés à la section 2.3.1.1.

Éclairement au sol De manière générale, on a :

$$E(P) = E_{direct}(P) + E_{diffus}(P) + E_{réfléchi}(P) + E_{réflexions \geq 2}(P) + E_{couplage}(P) \quad (2.7)$$

Pour un point au soleil, l'éclairement solaire direct E_{direct} arrivant sur la cible P est :

$$E_{direct}(P) = E_{TOA} \cdot T^\downarrow(P) \cdot (\vec{n}(P) \cdot \vec{u}_s) \quad (2.8)$$

où

- $T^\downarrow(P)$ est la transmittance sur une traversée de l'atmosphère sur le trajet soleil - point P ;
- $\vec{n}(P)$ est la normale à la surface en P (vecteur unitaire) ;
- \vec{u}_s est la direction du soleil par rapport à la scène (vecteur unitaire). Du fait de la petite taille de la scène devant la distance Terre-Soleil, \vec{u}_s est considéré comme constant sur toute la scène.
- E_{TOA} est l'éclairement en haut de l'atmosphère, qui ne dépend que de la date de prise de vue, et peut-être calculé par des formules empiriques (par exemple celle de Paltridge and Platt (1976)). Le tableau 2.1 de la section 2.3.4 donne la variation annuelle de E_{TOA} .

Pour un point à l'ombre, l'éclairement direct solaire est bien sûr nul. Pour la zone de pénombre qui borde toute zone d'ombre d'une source étendue comme le soleil, un facteur est à appliquer à l'équation (2.8) pour rendre compte du masquage partiel du soleil ; une modélisation de ce facteur est détaillée dans l'annexe A.2.

E_{diffus} est l'éclairement solaire diffusé par l'atmosphère vers la cible.

$$E_{diffus}(P) = \int_{\omega \in \Omega_{ciel}(P)} L_{diffus\ solaire}(\omega) \cdot \cos(\theta_\omega) \cdot d\omega \quad (2.9)$$

$L_{diffus\ solaire}$ est la luminance diffuse du ciel au niveau du sol, calculée par transfert radiatif dans l'atmosphère (à partir de données de composition atmosphérique), ou par un modèle de ciel (par exemple le modèle de Perez ou un modèle CIE (Chain, 2004)), sous certaines hypothèses.

$E_{réfléchi}$ est l'éclairement issu de la réflexion simple sur l'environnement de la cible (montagnes, bâtiments, etc). Il peut être issu de l'éclairement direct solaire ou de l'éclairement diffus :

$$E_{réfléchi}(P) = E_{direct\ réfléchi}(P) + E_{diffus\ réfléchi}(P) \quad (2.10)$$

$$E_{direct\ réfléchi}(P) = \int_{\omega_P \in \Omega_P} E_{direct}(M) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \rho_{dd}(\vec{u}_s, \overrightarrow{MP}) \cdot d\omega_P \quad (2.11)$$

$$E_{diffus\ réfléchi}(P) = \int_{\omega_P \in \Omega_P} \int_{\omega_M \in \Omega_M} L_{diffus\ solaire}(\omega_M) \cdot \rho_{dd}(\vec{u}(\omega_M), \overrightarrow{MP}) \cdot d\omega_M \cdot d\omega_P \quad (2.12)$$

avec

- ρ_{dd} désigne la réflectance bidirectionnelle du matériau au point M ;
- Ω_P est l'angle solide de l'hémisphère surplombant P ;
- Ω_M est l'angle solide de l'hémisphère surplombant M ;
- $\vec{u}(\omega_M)$ est le vecteur indiquant la direction de l'angle solide ω_M .

L'éclairement réfléchi aux ordres supérieurs $E_{réflexions \geq 2}$ s'exprime également, de la même manière, comme des intégrales multiples.

$E_{couplage}$ est l'éclairement issu de la lumière réfléchie du sol vers le ciel, diffusée par l'atmosphère vers la cible. Son calcul complet nécessite d'utiliser une méthode numérique. On peut cependant obtenir une expression simple dans le cas d'un sol plat homogène et lambertien d'albédo ρ :

$$E_{couplage}(P) = \frac{\rho \cdot s}{1 - \rho \cdot s} \cdot (E_{direct} + E_{diffus}) \quad (2.13)$$

où s représente l'albédo sphérique du ciel Tanre et al. (1981).

Dans le cas d'un milieu urbain, Lachérade (2006) ont adapté l'équation (2.13) en pondérant l'éclairement de couplage ainsi estimé par le facteur de vue du ciel .

Luminance en entrée du capteur La luminance $L_{capteur}$ arrivant en entrée du capteur se décompose en deux parties :

$$L_{capteur} = L_{direct} + L_{parasite} \quad (2.14)$$

L_{direct} est la luminance renvoyée directement par la zone imagée. Soit un point M de la scène imagé par le capteur C (cf. figure 2.4) . La luminance renvoyée par M vers C s'exprime de la façon suivante :

$$L_{direct}(\overrightarrow{MC}) = \int_{\omega_M \in \Omega_M} L(M, \omega_M) \cdot \rho_{dd}(\vec{u}(\omega_M), \overrightarrow{MC}) \cdot d\omega_M \quad (2.15)$$

où

- C est le point (en coordonnées terrain) correspondant à l'emplacement du capteur (centre optique par exemple pour une caméra perspective) ;

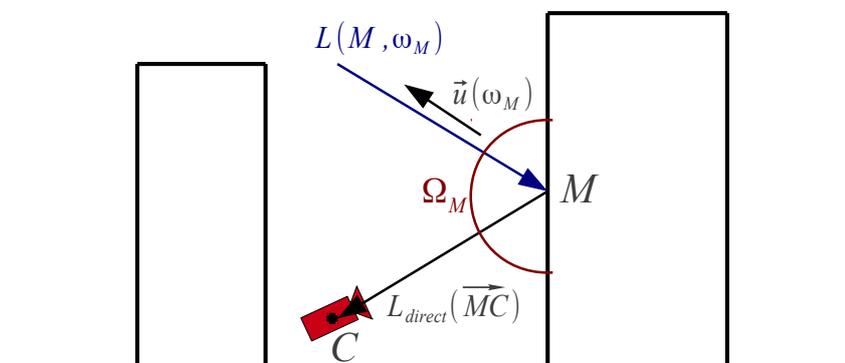


FIGURE 2.4 – La luminance renvoyée par un point est l'intégrale des luminances reçues pondérées par la BRDF.

- Ω_M est l'angle solide de l'hémiphère surplombant M ;
- $L(M, \omega_M)$ est la luminance totale incidente en M depuis la direction ω_M .

La luminance parasite peut être décomposée en deux termes : la luminance diffuse montante et la luminance atmosphérique.

$$L_{\text{parasite}} = L_{\text{atmosphère}} + L_{\text{diffus-montant}} \quad (2.16)$$

Dans le cas d'une prise de vue aéroportée ou spatiale, ce terme peut être modélisé et estimé par des modèles de voile (prenant en compte le phénomène de *hot spot*) (Martinoty, 2005).

La luminance issue du signal réfléchi sur les points environnants la cible et diffusé vers la caméra, $L_{\text{diffus-montant}}$, dépend de la composition atmosphérique, mais aussi des réflectances des matériaux de la scène. On peut cependant l'exprimer en fonction des réflectances de la scène, en modélisant la diffusion par une transmittance diffuse montante $T_{\text{diff}}^{\uparrow}$. Pour un pixel i du capteur :

$$L_{\text{diffus-montant}}(i) = \int_{M \in \text{scène}} \int_{\omega_M \in \Omega_M} T_{\text{diff}}^{\uparrow}(M, C) \cdot L(M, \omega_M) \cdot \rho_{dd}(\vec{u}(\omega_M), \vec{MC}) \cdot d\omega_M \cdot dM \quad (2.17)$$

Dans un milieu homogène, la transmittance $T_{\text{diff}}^{\uparrow}$ peut être modélisée comme une fonction exponentielle décroissante de la distance du point M à la caméra (Vermote et al., 1997).

$L_{\text{atmosphère}}$ est la luminance issue de la diffusion vers la caméra de la lumière solaire par l'atmosphère. Comme pour E_{diffus} , il n'y a pas de formulation analytique simple.

2.3.2 Approche par suivi du trajet des rayons lumineux

2.3.2.1 Équations locales du rendu

Le formalisme de l'informatique graphique est intéressant pour décrire un outil de simulation par lancer de rayon. L'équation locale décrivant l'interaction d'un rayon avec une surface ou une

particule est alors utilisée. Dans le domaine visible (émission propre négligeable), la luminance émise par un point dans une direction donnée définie par l'angle solide ω se déduit du principe de conservation de l'énergie (Kajiya, 1986) :

$$L(M, \omega, \lambda) = \int_{\omega_i \in \text{Sphère}} f(M, \omega, \omega_i, \lambda) \cdot L_{\text{incident}}(M, \omega_i, \lambda) \cdot d\omega_i \quad (2.18)$$

Lors d'une réflexion sur une surface, la BRDF permet de décrire la fonction f donnant la proportion de lumière renvoyée dans chaque direction (Nicodemus, 1977). De plus, l'intégration de la luminance incidente ne se fait que sur l'hémisphère au-dessus de la surface :

$$L(M, \omega, \lambda) = \int_{\omega_s \in \text{hémisphère}} \rho_{dd}(M, \omega, \omega_s, \lambda) \cdot L_{\text{incident}}(M, \omega_s, \lambda) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}_M, \omega_s}) \cdot d\omega_s \quad (2.19)$$

Dans le cas d'une interaction avec une particule du milieu traversé (l'atmosphère dans notre cas), la fonction f dépend de la fonction de phase de l'élément de volume. L'équation (2.18) devient alors une généralisation de l'équation du transfert radiatif (cf. par exemple Meyzonnette and Lépine (1999)), qui donne la proportion de lumière traversant un petit volume de particules situé au point Q , dans la direction $\vec{\omega}$:

$$L(Q + \delta\vec{\omega}, \vec{\omega}, \lambda) = L(Q, \vec{\omega}, \lambda) - \sigma_e (L(Q, \vec{\omega}, \lambda) - J(Q, \vec{\omega}, \lambda)) \delta \quad (2.20)$$

où $\delta\vec{\omega}$ est un petit déplacement de longueur δ dans la direction de $\vec{\omega}$, σ_e est le coefficient d'extinction du milieu traversé. J est la fonction source, qui prend en compte la diffusion multiple (dépendant de la fonction de phase de l'élément de volume).

2.3.2.2 Classification des rayons

Les rayons peuvent être classés en fonction de leur trajet depuis la source (en l'occurrence le soleil S) jusqu'à la caméra (C). Les deux types d'interactions possibles d'un rayon avec le système sont la diffusion (D) et la réflexion (R), régies par les lois décrites à la section 2.3.2.1.

On utilise la syntaxe des expressions régulières pour exprimer les différentes combinaisons d'interactions possibles pour un rayon lumineux issu de l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère.

- X^* : entre 0 et n interactions de type X ;
- X_+ : entre 1 et n interactions de type X ;
- $X|Y$: interaction de type X ou Y ;
- $X?$: 0 ou 1 interaction de type X.

On peut classer les différentes composantes du signal image en entrée du capteur en fonction des différentes interactions effectuées par un rayon, sous la forme d'un arbre (cf. figure 2.5) . Chaque rayon porte une luminance qui dépend de la puissance de la source lumineuse d'origine et des modifications apportées par les différentes interactions. Plus le nombre d'interactions augmente, plus la valeur de cette luminance diminue, car la diffusion et la réflexion s'accompagnent d'une perte d'énergie. La luminance en entrée du capteur pour un pixel i est donnée par l'intégration de la luminance des rayons arrivant dans le champ de vision de i .

2.3.3 Analogie entre l'approche phénoménologique et l'approche par suivi des rayons

La modélisation utilisée en informatique graphique est intéressante pour les méthodes de simulation performantes qu'elle permet de développer. Elle ne permet cependant pas d'identifier et de séparer les différents phénomènes physiques. On propose ici de faire ici le lien entre les deux approches afin de pouvoir se référer aux deux.

La modélisation par décomposition de la luminance en contributions des phénomènes observés (cf. la section 2.3.1), adoptée en télédétection, est équivalente à la modélisation par trajet des rayons lumineux présentée dans la section 2.3.2. En effet, chaque rayon, en fonction de son trajet, contribue à un terme spécifique de la luminance.

La correspondance est donnée sur la figure 2.5. Pour chaque feuille de l'arbre, on précise à quel type de luminance correspond le rayon selon le formalisme adopté en télédétection, dont les principales composantes sont présentées sur les figures 2.2 et 2.3.

2.3.4 Ordres de grandeur

2.3.4.1 Mesures de BRDF de matériaux urbains

Des mesures de BRDF (cf. la section 2.1.2.1) ont été effectuées à l'ONERA sur des matériaux urbains acquis grâce à la Direction de la Voirie et des Déplacements de la Ville de Paris. Il s'agit de deux types de mesures :

- des mesures de réflectance directionnelle-hémisphérique ρ_{dh} effectuées à l'aide d'un spectromètre Lambda 900, sur une plage de longueur d'onde allant de 250 nm à 2500 nm, avec un pas de 2 nm ;
- des mesures de réflectance bidirectionnelle ρ_{dd} effectuées sur le banc hyperspectral Me-lopee de l'ONERA (Ceolato and Riviere, 2010). Ces mesures sont effectuées dans le plan d'incidence, à 8 longueurs d'onde différentes (de 486.68 nm 815.71 nm), et échantillonnent la BRDF pour trois angles d'incidence au maximum (0° , 30° et 60°) avec un pas de 1° pour l'angle de visée θ_r .

Quelques résultats de ces mesures sont présentés sur les figures 2.6 et 2.7. Le Spectralon est utilisé comme référence quasi-lambertienne. On constate que la réflectance des matériaux de façade peut être élevée ; l'éclairement réfléchi par ces façades peut donc être fort. En revanche, on peut voir que les matériaux de construction tels que le béton, la pierre, le marbre ont un comportement plutôt lambertien. Seuls les vitres et quelques objets de mobilier urbain (par exemple les panneaux de signalisation) présentent un fort comportement spéculaire ou rétro-spéculaire. Cependant, cela peut changer avec l'état de surface des matériaux ; par exemple, le marbre rose sera d'autant plus spéculaire qu'il est propre et poli.

2.3.4.2 Les différents termes du bilan radiométrique

Les variations d'éclairement en haut de l'atmosphère au cours de l'année sont décrites par exemple par Paltridge and Platt (1976) (voir le tableau 2.1).

Pour les ordres de grandeurs des différents termes d'éclairement dans une scène urbaine, Martinoty (2005) et Lachéradé (2006) présentent une étude intéressante, qui montre notamment que l'éclairement réfléchi peut être le terme prépondérant pour les façades ombragées. On rappelle sur la figure 2.8 les résultats proposés par Martinoty (2005) sur une scène de canyon urbain.

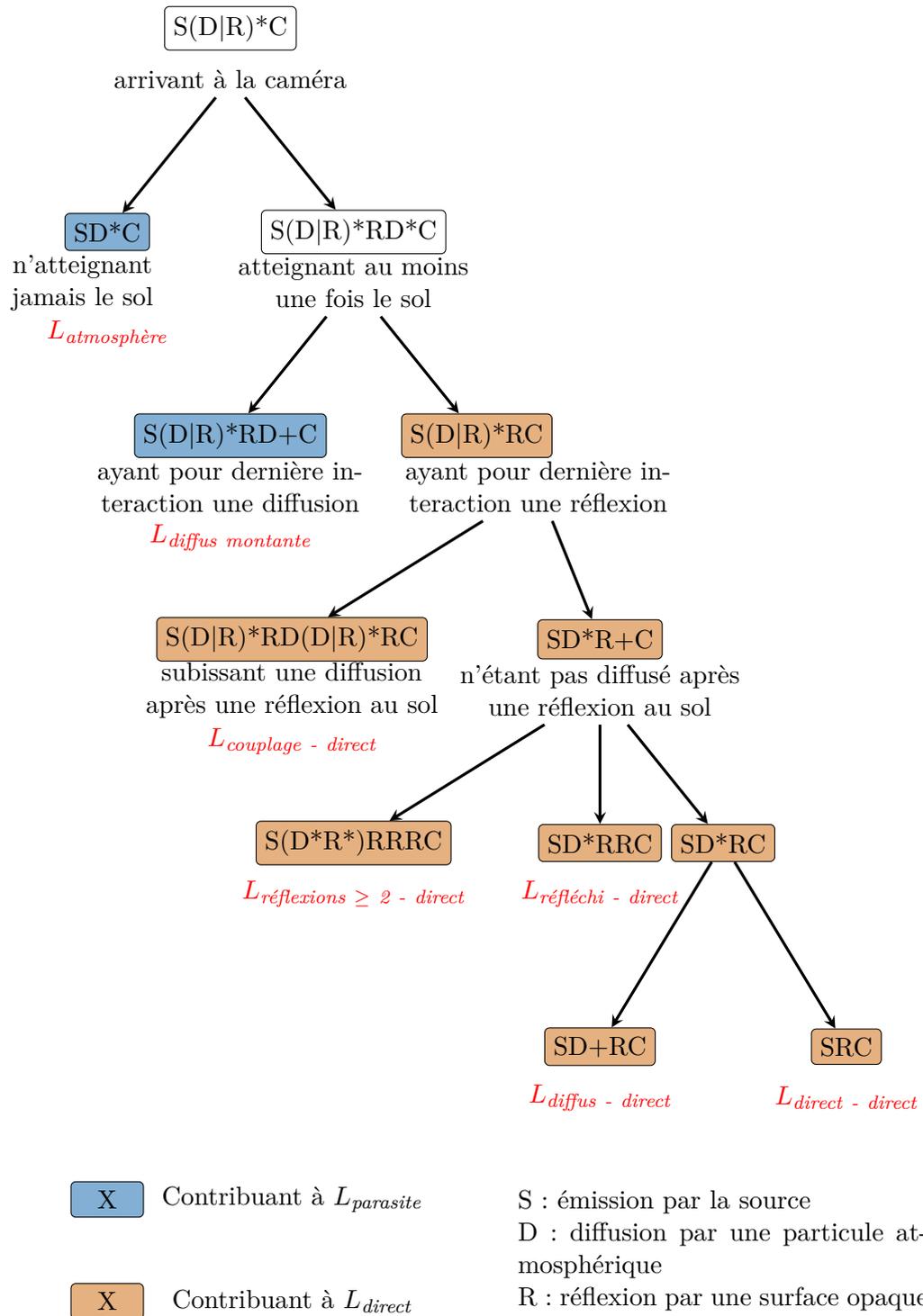


FIGURE 2.5 – Les différentes composantes du signal image en fonction des interactions possibles pour un rayon.

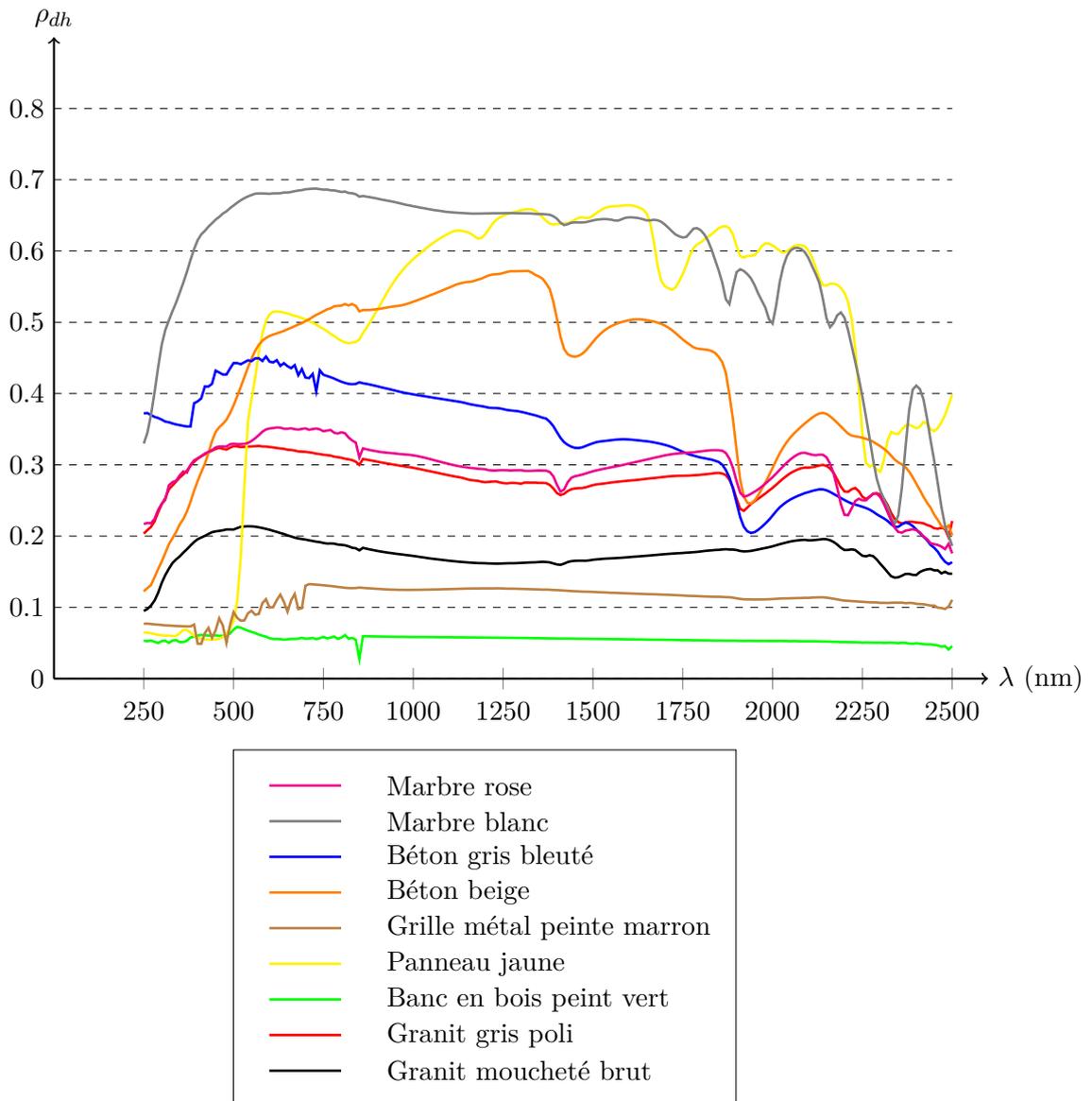


FIGURE 2.6 – Réflectance directionnelle-hémisphérique ρ_{dh} mesurée sur le spectromètre Lambda 900 de l'ONERA pour différents matériaux urbains. L'angle d'incidence est de 0° .

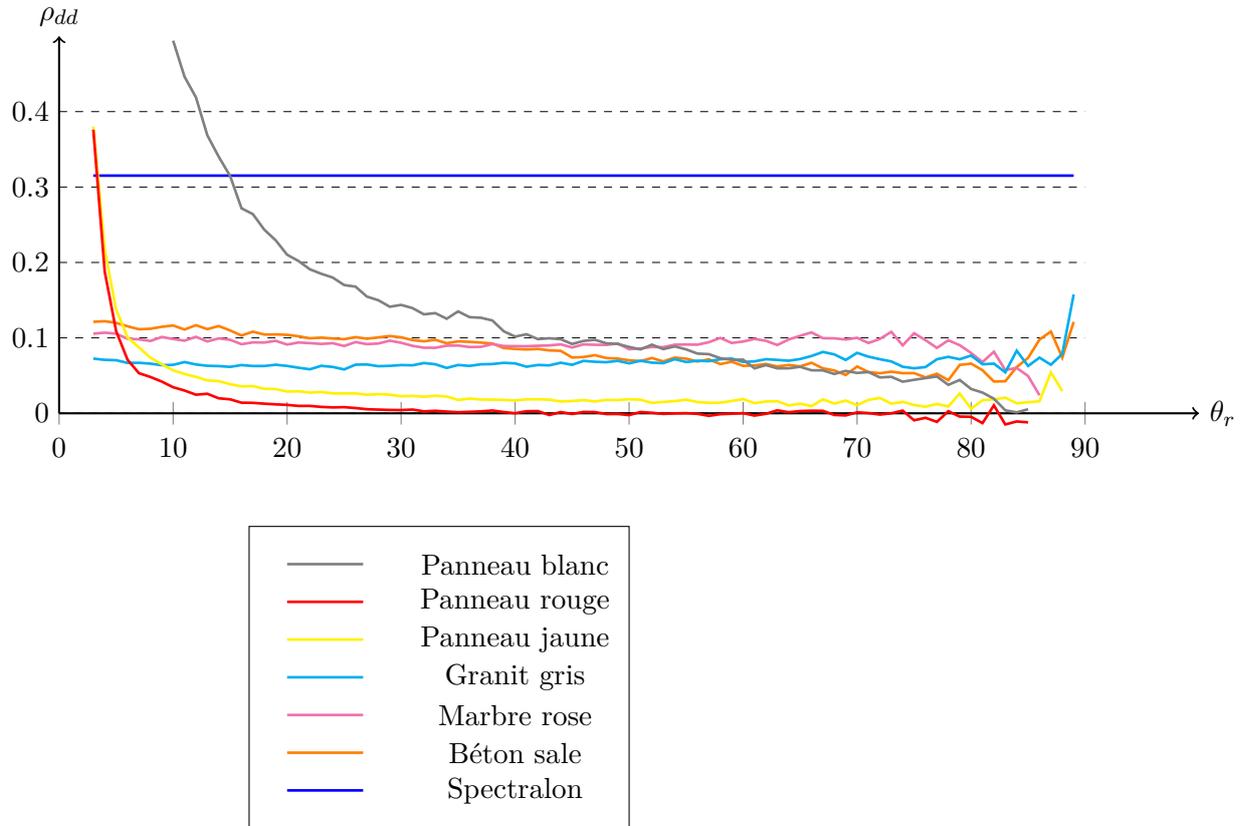


FIGURE 2.7 – Réflectance ρ_{dd} mesurée sur le banc Melopee de l'ONERA pour quelques matériaux urbains, avec un angle d'incidence de 0° .

Date	E_{TOA} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	α_s
22/01	1 435,5	$0,5419^\circ$
22/02	1 419,6	$0,5386^\circ$
22/03	1 393,4	$0,5342^\circ$
22/04	1 372,6	$0,5297^\circ$
22/05	1 352,0	$0,5264^\circ$
22/06	1 346,8	$0,5250^\circ$
22/07	1 352,0	$0,5267^\circ$
22/08	1 372,6	$0,5297^\circ$
22/09	1 393,4	$0,5342^\circ$
22/10	1 419,6	$0,5386^\circ$
22/11	1 435,5	$0,5419^\circ$
22/12	1 440,8	$0,5431^\circ$

TABLE 2.1 – Évolution annuelle de l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère (E_{TOA}) et de l'angle apparent du soleil (Jacquemoud, 2007).

2.3. MODÉLISATION DU SIGNAL IMAGE

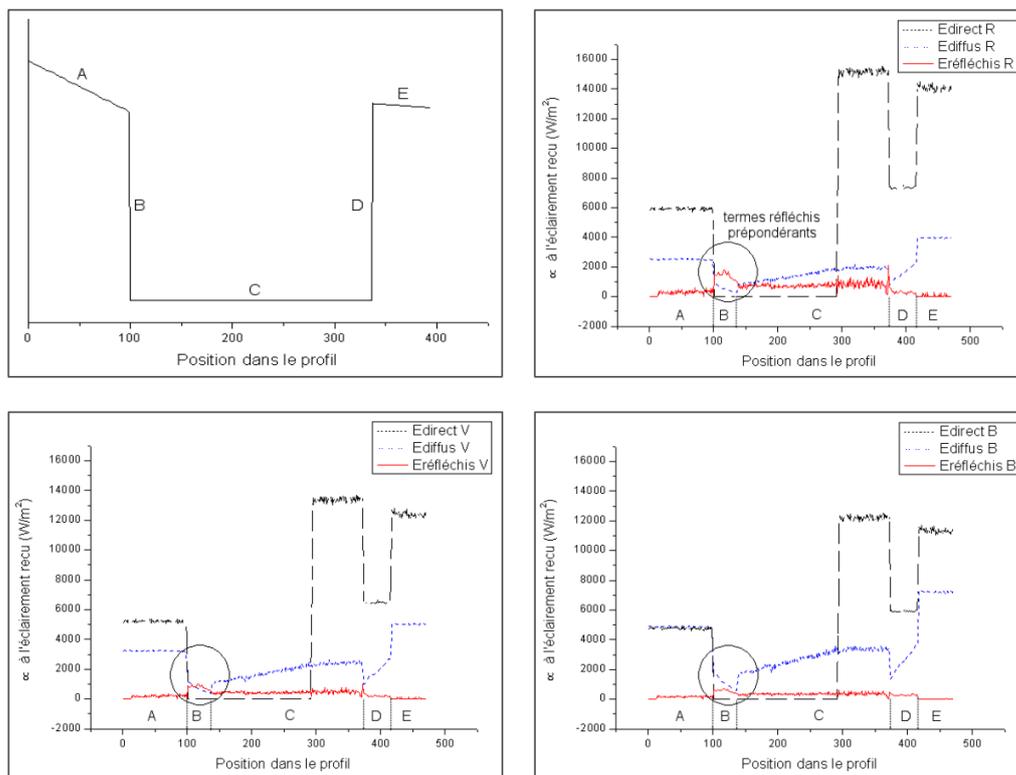


FIGURE 2.8 – Ordres de grandeur de différents termes du bilan radiométrique sur une scène de canyon urbain, pour les trois canaux rouge (R), vert (V) et bleu (B) correspondant aux bandes spectrales de la caméra aérienne numérique IGN (Martiny, 2005).

2.4 Conclusion

La modélisation radiométrique d'une scène urbaine a été présentée. Étant donnée la très haute résolution des images, cette modélisation est complexe car elle doit permettre de prendre en compte une géométrie 3D complexe et des réflectances non lambertiennes pour les matériaux. La luminance en entrée du capteur ne peut pas être calculée analytiquement ; il faut donc utiliser pour cela des méthodes numériques. Le chapitre suivant présente un code adapté à ce problème.

Simulation d'images de luminance acquises par un système terrestre

3.1 Pourquoi simuler le signal lumineux

La luminance en entrée du capteur est le résultat de la propagation de la lumière au sein de la scène, notamment des réflexions sur les différentes surfaces de la scène, possédant des propriétés de réflectance inconnues. Une caméra n'observe pas directement la réflectance des matériaux, paramètre intrinsèque aux matériaux que l'on cherche à estimer, mais un signal dépendant à la fois des réflectances, des sources de lumière, des propriétés du milieu de propagation (l'atmosphère dans notre cas).

On est donc face à un problème inverse, qui nécessite pour sa résolution la capacité à simuler le problème direct, c'est-à-dire simuler la luminance qui arrive au capteur (cf. la section 5). On se limite dans ce travail au domaine spectral visible, pour lequel l'émission propre des matériaux est négligeable aux températures terrestres usuelles. Le code réalisant l'inversion a été baptisé IRSUTE (Inversion Radiométrique de Scènes Urbaines TERrestres). Ce chapitre présente la partie réalisant la simulation d'images en luminance.

3.2 État de l'art des techniques de simulation d'images

3.2.1 Méthodes adaptées à l'imagerie aérienne ou spatiale moyenne résolution

3.2.1.1 Codes de transfert radiatif

Le transfert radiatif modélise le parcours du rayonnement solaire au sein de l'atmosphère, notamment les phénomènes de diffusion et d'atténuation, qui dépendent de la longueur d'onde, et dont l'importance varie avec la composition atmosphérique. [Mezonnante and Lépine \(1999\)](#) présentent les principes du transfert radiatif, qui sont issus de la physique du rayonnement électromagnétique. Les méthodes associées calculent explicitement les termes d'éclairement direct, diffus ainsi que la luminance parasite (cf. la section 2.3). Elles sont valides pour une atmosphère, une géométrie et une réflectance du sol suffisamment simples : typiquement, avec une hypothèse de sol plat lambertien, et en utilisant l'approximation plan-parallèle (atmosphère composée de couches horizontales planes et homogènes ([Schanda, 1986](#))). L'éclairement direct solaire au sol se calcule analytiquement ; en revanche, la diffusion multiple entre les particules atmosphériques, à prendre en compte pour les autres termes, se résout par des méthodes numériques approchées, comme les ordres successifs de diffusion ou les ordonnées discrètes

(Lenoble, 1985). C'est souvent le cas pour les méthodes dédiées à l'imagerie spatiale à moyenne résolution, comme par exemple 6S (Vermote et al., 1997) ou MODTRAN (Berk et al., 2006); on parle pour ces méthodes de codes de transfert radiatif. Les données en entrée de ces codes sont des paramètres de description plus ou moins fine de l'atmosphère, depuis la visibilité jusqu'à des profils verticaux de concentration en particules.

3.2.1.2 Correction radiométrique des images

En télédétection, la simulation du signal lumineux a été développée pour permettre de corriger ou d'exploiter les effets atmosphériques sur les images spatiales, qui sont généralement de plus basse résolution (par exemple un pixel au sol de 30 m pour Landsat). Les objectifs sont généralement la transformation des images brutes en cartes de réflectance (voir par exemple Masek et al. (2006) pour Landsat), et/ou l'étude de la composition atmosphérique pour des applications de climatologie (Hufty, 2001). Une autre application est l'égalisation radiométrique d'une mosaïque d'images acquises par un capteur matriciel (pour lequel le phénomène de *hot spot* est très présent). Par exemple, Richter and Schläpfer (2002) présentent le modèle ATCOR4 utilisant une table précalculée (LUT) sous hypothèse lambertienne, et nécessitant des données météorologiques. Alternativement, une méthode basée sur un modèle physique a été développée par Chandelier and Martinoty (2009), utilisant le recouvrement entre les images pour estimer un modèle paramétrique du voile atmosphérique.

3.2.1.3 Méthodes adaptées au milieu urbain

Le code DART (Gascon, 2001), initialement destiné à la végétation mais adapté également aux scènes urbaines, utilise une méthode numérique de suivi des rayons lumineux dans une scène découpée en cellules ayant chacune des propriétés de transmittance/diffusion ou réflectance.

Miesch (1999) propose une modélisation des différents termes formant la luminance en entrée du capteur, qui est utilisée pour développer le code de simulation AMARTIS. Ce code utilise une expression analytique pour les termes simples d'ordre faible (correspondant à des trajets de la lumière de seulement quelques interactions) et des méthodes numériques de Monte-Carlo pour les termes complexes. AMARTIS est validé sur des profils 2D, par comparaison avec un code de référence par lancer de photons : il s'agit d'une méthode de Monte-Carlo dans laquelle on lance un très grand nombre de photons depuis le haut de l'atmosphère, en suivant leur trajet dans la scène, déterminé par tirage aléatoire. Le rapport du nombre de photons reçus sur le nombre total de photons lancés, pondéré par l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère E_{TOA} , donne une estimation de la luminance. Cette méthode diffère du lancer de rayon car les rayons portent une luminance qui est modifiée au cours des interactions avec la scène; le lancer de photons est très peu efficace et très long en temps de calcul, car il ne porte pas d'information de luminance (seul leur comptage apporte cette grandeur), et de plus une grande partie des photons lancés sont perdus hors de la scène.

Martinoty (2005) utilise la même modélisation pour réaliser une classification des pixels sur des images aériennes urbaines (ayant trois canaux RVB à bande spectrale large), en appariant les pixels sur critère de similarité des paramètres de réflectance estimés. Lachérade (2006) réalise l'inversion de ce modèle radiométrique dans le cas lambertien avec des données hyperspectrales, estimant ainsi l'albédo des matériaux (code ICARE). Enfin, Doz et al. (2008) présentent AMARTIS v2, qui simule des images sur des scènes 3D (triangulées en facettes homogènes) en prenant en compte la bidirectionnalité de la réflectance; les temps de calcul sont néanmoins relativement longs. Cela est utilisé pour estimer une BRDF en utilisant des données multi-vues (code ICARE v2). Une application envisagée est la simulation d'images spatiales à partir d'acquisitions aériennes.

3.2.2 Méthodes de simulation du signal adaptées à l'imagerie terrestre

La simulation d'images au niveau du sol, en extérieur comme en intérieur, est développée pour la production d'images de synthèse photo-réalistes, la réalité augmentée (Dutre et al., 2006). La modélisation fine des phénomènes atmosphériques n'est donc pas une priorité, puisque l'on cherche avant tout à rendre la complexité géométrique et l'inhomogénéité des phénomènes naturels observables à l'échelle humaine sur des scènes réelles.

3.2.2.1 Radiosité par calcul des coefficients angulaires

Dans le cas d'une scène composée de matériaux lambertiens, l'influence radiative d'une facette sur une autre peut être calculée a priori par un facteur nommé coefficient angulaire. La matrice de facteurs ainsi formée permet une rapide estimation de l'éclairement parvenant sur chaque facette (Goral et al., 1984) (Spencer, 1993). Cette technique présente l'inconvénient de contraindre la géométrie à être représentée par des surfaces maillées, et de ne pas prendre en compte la diffusion par le milieu entre les objets ; de plus, la prise en compte de la spécularité des matériaux n'est pas aisée. Elle peut être accélérée par l'utilisation d'hémicubes, au détriment de la précision radiométrique (Cohen and Greenberg, 1985).

3.2.2.2 Synthèse d'images par lancer de rayon

La simulation réaliste d'images est souvent réalisée par lancer de rayon. Il s'agit d'une méthode stochastique qui consiste à lancer un grand nombre de rayons lumineux depuis la caméra vers la scène, et de suivre leur parcours, choisi aléatoirement à chaque interaction, à travers la scène, jusqu'à une source lumineuse. L'interaction d'un rayon avec une surface est régie par l'équation du rendu (Kajiya, 1986) qui traduit le bilan radiatif en un point (cf. équation (2.18)). Les nombreux rayons lancés sont sommés pour réaliser l'intégration de Monte-Carlo permettant d'estimer la luminance en entrée du capteur (Veach, 1997). L'algorithme est détaillé dans la section 3.4. Un exemple de logiciel utilisant les lois de la physique pour simuler des images par lancer de rayon est LuxRender (LuxRender, 2012) ; il s'agit d'une extension de PBRT (Physically Based Rendering (Pharr and Humphreys, 2012)), dont le fonctionnement est décrit par Pharr and Humphreys (2004). Le lancer de rayon a peu de limites en ce qui concerne la scène et les hypothèses à prendre en compte :

- d'un point de vue géométrique, la scène peut être très complexe : il suffit de pouvoir calculer l'intersection d'un rayon avec une surface, et le cas échéant de connaître la normale à la surface au point d'intersection (cf. figure 3.15) ;
- en ce qui concerne la réflectance, il est possible de prendre en compte une BRDF complexe, sous forme paramétrique ou tabulée ;
- la diffusion dans un milieu participatif (i.e. non vide) peut être prise en compte directement (mais cela est coûteux en temps de calcul et souvent fait avec des méthodes approchées) ;
- les sources de lumière peuvent être ponctuelles ou étendues, proches ou à l'infini.

Le résultat est en revanche affecté par un bruit stochastique décroissant lentement (Veach, 1997).

3.2.3 Comparaison des techniques

Afin de situer la méthode de simulation d'IRSUTE, on réalise une comparaison avec d'autres méthodes de simulation. Les deux principaux types de méthodes utilisées pour la simulation

sont l'intégration de Monte-Carlo, méthode stochastique sans biais, et le calcul analytique, après simplification et discrétisation des intégrales. Le tableau 3.1 récapitule les méthodes employées dans les travaux antérieurs (notamment à l'ONERA et à l'IGN, dans un cadre et avec des objectifs proches de ceux de cette thèse), ainsi que pour la méthode adoptée par IRSUTE, qui passe par l'utilisation du logiciel de lancer de rayon LuxRender (cf. 3).

La méthode de lancer de rayon, implémentée par LuxRender (Pharr and Humphreys, 2004), et la méthode de lancer de photons, implémentée par Miesch (1999), utilisent l'équation locale du rendu (Kajiya, 1986) à chaque interaction, et non la décomposition de la luminance totale en entrée du capteur 2.3.1.2. Ces deux méthodes présentent l'inconvénient de générer un bruit stochastique dans leur résultat, qui diminue avec le temps de calcul (cf. la section 3.6.1). Ainsi, il faut fixer un nombre maximal de réflexions N_{max} pas trop grand pour éviter de trop longs temps de calcul.

Si l'absorption est traitée facilement par un facteur (ou un arrêt stochastique du photon pour le lancer de photons de Miesch (1999)), la diffusion par les particules atmosphériques est prise en compte de différentes manières. Le calcul complet de la diffusion (jusqu'à un certain ordre) est possible par lancer de rayon, mais il est en pratique trop lourd en temps de calcul. De plus, la diffusion multiple n'est pas implémentée par LuxRender ni AMARTIS, qui ne calculent que la diffusion simple. 6S, le lancer de photons de Miesch (1999) et AMARTIS calcule l'éclairement diffus du ciel par résolution de l'équation de transfert, en faisant l'hypothèse plan-parallèle (HPP : l'atmosphère est modélisée par des couches horizontales homogènes, en négligeant la courbure de la Terre) (Schanda, 1986). C'est pour ces raisons que la plupart des méthodes présentées modélisent la luminance descendante du ciel par un dôme émetteur surplombant la scène. Cela revient à considérer la scène comme quasi-ponctuelle et/ou la luminance diffuse comme spatialement homogène. Ce genre d'hémisphère est utilisée dans un contexte différent en informatique graphique pour éclairer une scène intérieure ou extérieure à partir d'images réelles ; on parle alors de carte d'environnement (*environment map* en anglais).

L'indication sur le temps de calcul T_{calc} est qualitative puisque les méthodes ne peuvent pas être comparées simplement, en raison des hypothèses différentes qu'elles font. Il s'agit donc d'une comparaison relative en fonction des indications données par les auteurs ou des tests réalisés (pour 6S, LuxRender et IRSUTE). Ainsi, 6S donne un résultat en quelques secondes, mais pour des cas simples. Le lancer de photons est très lourd en temps de calcul, pour une scène décrite par un simple profil 2D. Martinoty (2005) annonce plus d'une semaine de calcul pour l'éclairement réfléchi. LuxRender donne un résultat peu bruité en quelques heures sur des scènes complexes

Nom	Référence	Type	Diffusion	Scène	BRDF	N_{max}	T_{calc}
6S	Vermote et al. (1997)	analyt.	Volum., multiple, HPP	sol plat	11 modèles	1	++
Lancer de photons	Miesch (1999)	stoch.	Volum., multiple, HPP	profil 2D	tout type	n	--
AMARTIS	Miesch (1999)	mixte	Volum., simple, HPP	profil 2D	tout type	2	-
Martinoty (2005)	Martinoty (2005)	mixte	Dôme, 6S	3D vecteur	tout type	2	--
ICARE (simul.)	Lachérade (2006)	analyt.	Dôme, 6S	3D vect. triang.	lambertien	3	+
AMARTIS v2	Doz et al. (2008)	mixte	Dôme, 6S	3D vect. triang.	tout type	3	+
LuxRender	Pharr and Humphreys (2004)	stoch.	Volum., simple ou carte d'env.	3D vecteur	tout type	n	++
IRSUTE (simul.)	section 3.5	stoch.	Volum., simple ou carte d'env.	3D vecteur	tout type	n	+

HPP : hypothèse plan-parallèle

T_{calc} : indication sur la longueur des temps de calcul

Volum. : calcul de la diffusion en considérant directement les propriétés volumiques optiques de l'atmosphère

N_{max} : nombre maximal de réflexions autorisées par la méthode ;

1 correspond à la prise en compte de l'éclairement direct, 2 à l'éclairement réfléchi, 3 à l'éclairement de double réflexion, etc

n : nombre maximal de réflexions autorisées par l'utilisateur, sachant que le temps de calcul croît fortement avec n

TABLE 3.1 – Comparaison des méthodes de simulation dans différents travaux antérieurs.

3.2.4 Conclusion

Les méthodes de simulation utilisées en télédétection, bien que physiquement rigoureuse, ne sont généralement pas adaptées à l'imagerie terrestre urbaine à haute résolution. En effet, celles-ci ne sont valides que sous certaines hypothèses (matériaux lambertiens, sol plat, atmosphère plan-parallèle), ou sont limitées dans la description géométrique de la scène, et/ou nécessitent des temps de calcul trop longs dans le contexte de l'inversion globale de l'équation radiométrique (cf. la section 5.3).

Les méthodes développées en informatique graphique sont généralement performantes en temps de calcul. Elles sont suffisamment génériques pour ne pas nécessiter d'hypothèses contraignantes, même si dans la pratique, il vaut mieux simplifier les données quand cela est possible (cf. la section 3.5). Néanmoins, elles sont développées principalement pour la production d'images de synthèse et doivent être utilisées avec précaution pour effectuer une simulation physique.

Nous proposons donc d'utiliser la technique numérique du lancer de rayon afin de rester le plus générique possible, tout en utilisant la modélisation phénoménologique de la télédétection afin de garder un contrôle sur la validité physique des calculs réalisés.

3.3 Choix d'un code de simulation

Comme souligné à la section 2.3.1.2, le calcul analytique complet est impossible dans le cas général ; on utilise donc une méthode numérique. Si la radiosité par coefficients angulaires est intéressante pour son temps de calcul réduit, elle est limitée en terme de modèles de BRDF exploitables et nécessite une triangulation du modèle 3D. On préfère donc utiliser une méthode de lancer de rayon.

Certaines méthodes de lancer de rayon comme l'*irradiance caching* ou le *photon mapping*, orientés vers la rapidité de calcul, sont biaisées (Pharr and Humphreys, 2004), i.e ils ne convergent pas vers la valeur physique (à la finesse de la modélisation près) quand le nombre de rayons lancés tend vers l'infini. Ces méthodes ne peuvent donc pas être utilisées dans le cadre de cette thèse, où le temps de calcul doit seulement être raisonnable, mais où la précision physique des grandeurs estimées devra être validée.

D'autre part, pour des raisons pratiques, il est nécessaire de travailler avec un logiciel *open source* afin de comprendre le fonctionnement des différents modules de calcul, et de pouvoir apporter des modifications au code. La possibilité de pouvoir importer des modèles 3D dans les formats standards (VRML, Collada) est également appréciable.

LuxRender est un logiciel de simulation d'images par lancer de rayon. Il utilise comme cœur le code PBRT, qui est fondé sur les lois physiques du rayonnement (Pharr and Humphreys, 2004). Il est distribué sous licence GPL, et possède une interface utilisateur ergonomique. Il offre la possibilité de paralléliser les calculs. De plus, il est possible d'exporter des modèles 3D à partir du logiciel de modélisation 3D *open source* Blender, grâce au *plug-in* LuxBlend, fourni avec LuxRender. Pour toutes ces raisons, notre choix s'est donc porté sur le code LuxRender pour développer l'outil de simulation d'IRSUTE.

3.4 Calcul de la luminance par lancer de rayon

Dans cette section, on présente les équations de l'algorithme de lancer de rayon tel qu'il est implémenté dans LuxRender.

3.4.1 Principe général

3.4.1.1 Données en entrée

La description de la scène se compose :

- d'une géométrie des surfaces, i.e d'une liste de coordonnées dans le repère terrain et d'instructions permettant de construire les objets formant la scène ;
- d'une description des réflectances des matériaux associés aux surfaces des objets, paramétrées selon un modèle de BRDF ;
- d'une caméra ayant pour caractéristiques principales une position, une orientation, une focale, un champ et une réponse spectrale par canal ;
- d'une éventuelle géométrie des volumes, i.e les caractéristiques (fonction de phase, coefficients de diffusion et d'absorption) de chaque région dans laquelle évoluent les rayons lumineux. Celle-ci n'est pas utilisée dans notre outil de simulation (cf. sections 3.5.3 et 3.5.3.2).

3.4.1.2 Intégration de Monte-Carlo

On désigne par contribution un objet doté d'un chemin composé d'un ensemble de rayons rectilignes, mais doté également d'une atténuation le long du chemin, ainsi que d'une luminance portée ce chemin. Le calcul de la luminance en chaque point I_0 de la caméra s'effectue par intégration de Monte-Carlo sur un grand nombre de contributions simulées entre la caméra et les sources primaires de lumière.

Nous rappelons que dans le cas d'un point I_n à la surface d'un objet opaque sans émission propre à la longueur d'onde λ , l'équation radiométrique locale (2.18) devient :

$$L(I_n, \omega, \lambda) = \int_{\omega_s \in \text{hémisphère}} \rho_{dd}(I_n, \omega, \omega_s, \lambda) \cdot L_{\text{incident}}(I_n, \omega_s, \lambda) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}_{I_n}, \omega_s}) \cdot d\omega_s \quad (3.1)$$

Il s'agit donc d'évaluer la luminance renvoyée par tous les points M vus par la caméra, dans la direction de la caméra.

Pour cela, on dispose, pour chaque pixel (i, j) de l'image à simuler, d'un nombre N grand de contributions. Les chemins de ces contributions vont des sources de lumière au point du capteur correspondant au pixel (i, j) . Chaque contribution k porte la luminance $L(k)$ apportée au pixel (i, j) par un chemin possible $C(k)$ de la lumière dans la scène, choisi aléatoirement selon une certaine densité de probabilité $pdf(C(k))$. Le tirage aléatoire se fait par échantillonnage préférentiel, selon une densité de probabilité qui dépend de la distribution spatiale de la BRDF et de celle des sources (cf. la section 3.4.3.2) .

La somme $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{L(k)}{pdf(C(k))}$ est donc l'estimateur de Monte-Carlo de la luminance reçue au pixel (i, j) , intégrée sur tous les chemins possibles depuis les sources.

En pratique, à partir de $N = 100$ contributions par pixel, on obtient une image dans laquelle le bruit est négligeable.

3.4.2 Algorithme de lancer de rayon

3.4.2.1 Génération du premier rayon issu de la caméra

Lancer les rayons lumineux depuis les sources de lumière serait peu efficace, puisque qu'ils n'ont qu'une très faible probabilité d'atteindre la caméra, et donc la majeure partie des rayons

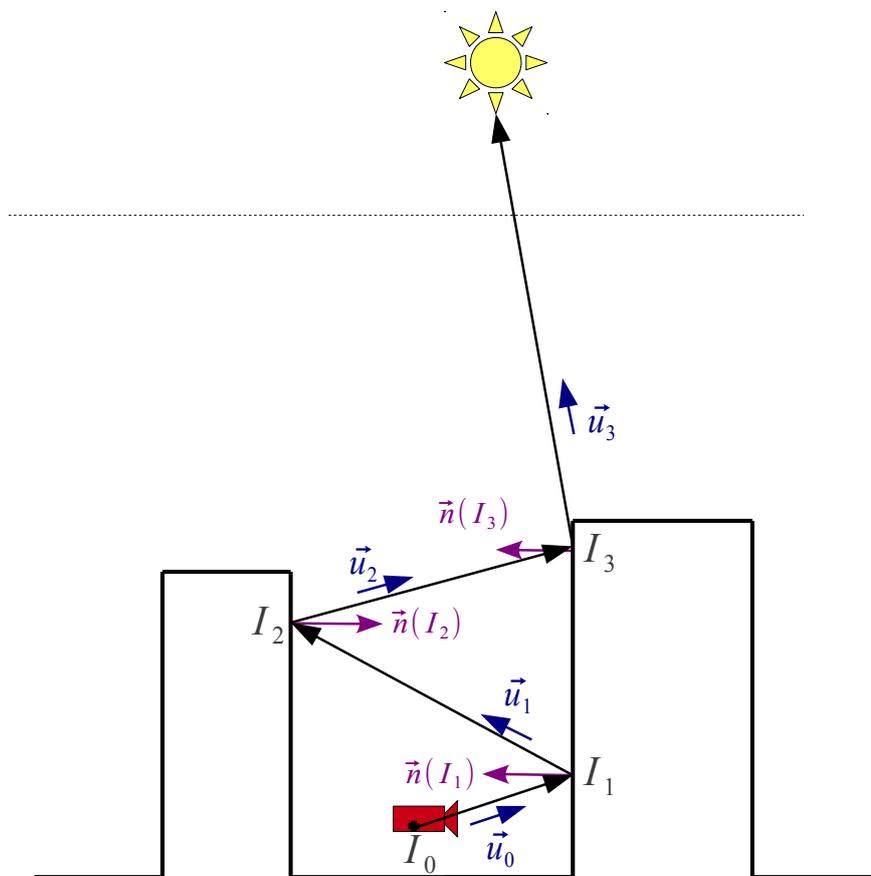


FIGURE 3.1 – Trajet d'une contribution issue de la caméra, subissant trois réflexions en I_1 , I_2 et I_3 avant d'atteindre une source de lumière.

lancés serait perdue. On utilise donc le principe de réciprocité de Helmholtz (retour inverse de la lumière) : les rayons sont lancés depuis le capteur vers les sources de lumière.

Différentes stratégies existent pour échantillonner les coordonnées réelles (x, y) (dans le repère image) du point du capteur sur lequel on veut lancer un rayon. Ces stratégies visent à minimiser l'*aliasing* (apparition d'artefacts liés à un repliement de spectre) par un échantillonnage non uniforme ou adaptatif.

La direction du rayon après n interactions est décrite par un point origine I_n et un vecteur unitaire \vec{u}_n .

La transformation inverse (repère image \rightarrow repère terrain) de la caméra sert à générer la direction (I_0, \vec{u}_0) du premier rayon sortant de la caméra, en coordonnées terrain (cf. figure 3.1).

3.4.2.2 Interaction avec la surface rencontrée

A l'itération $n \geq 0$, on calcule le point d'intersection I_{n+1} du rayon de direction (I_n, \vec{u}_n) avec les objets de la scène (cf. figure 3.1). Le calcul de cette intersection peut être fait de multiples façons, la plus basique étant un parcours de toutes les surfaces composant le modèle. Cependant, afin de minimiser le temps de calcul, des techniques d'accélération géométrique sont utilisées, par exemple un *kd-tree*. On suppose ici que cette intersection I_{n+1} existe et ne se fait pas avec une source de lumière, et qu'aucun autre critère d'arrêt n'est vérifié.

La transmittance totale T^n sur le chemin de la contribution à l'itération n est égale à la transmittance T^{n-1} multipliée par la transmittance $T_{n,n+1}$ sur le chemin $I_n I_{n+1}$ (cf. la section 2.1.2.2).

Le matériau de la surface où se situe I_n est affecté d'une fonction de réflectance bidirectionnelle $\rho_{dd}(I_n, \phi_i, \theta_i, \phi_r, \theta_r)$. L'atténuation par réflexions le long du trajet (due à l'absorption d'énergie par les matériaux rencontrés par le rayon) R^n est égale à l'atténuation par réflexions R^{n-1} multipliée par la réflectance en I_n .

L'atténuation géométrique G^n sur le chemin de la contribution à l'itération n est égale à G^{n-1} multipliée par le cosinus de l'angle d'incidence θ_i . Cette atténuation géométrique est l'atténuation de la puissance fournie par un rayonnement arrivant sur une surface avec un angle θ_i par rapport à la normale. L'éclairement incident considéré par la BRDF doit déjà prendre en compte cette atténuation.

La probabilité du chemin de longueur n courant P^n est égale à la probabilité P^{n-1} multipliée par la probabilité de la direction (I_n, \vec{u}_n) .

Cela fait donc pour le chemin une probabilité du chemin P^n et une atténuation totale F^n égale à :

$$F^n = G^n \cdot T^n \cdot R^n \quad (3.2)$$

avec

$$G^n = G^{n-1} \cdot (\vec{n}_{I_n} \cdot \vec{u}_n)$$

$$T^n = T^{n-1} \cdot T_{n,n+1}$$

$$R^n = R^{n-1} \cdot \rho_{dd}(I_n, \vec{u}_{n-1}, \vec{u}_n)$$

$$\text{et une probabilité } P^n = P^{n-1} \cdot P((I_n, \vec{u}_n))$$

Le matériau de la surface où se situe I_{n+1} est affecté d'une fonction de réflectance bidirectionnelle $\rho_{dd}(I_{n+1}, \phi_i, \theta_i, \phi_r, \theta_r)$. Le tirage de la direction de réflexion du rayon se fait de manière aléatoire (cf. la section 3.4.3.2) ; on obtient alors une nouvelle direction (I_{n+1}, \vec{u}_{n+1}) pour décrire le rayon repartant de I_{n+1} .

3.4.2.3 Calcul de la transmittance le long des rayons

Dans le cas où l'on a défini des propriétés volumiques pour l'atmosphère de la scène, la transmittance est calculée sur chaque rayon $I_n I_{n+1}$. Les méthodes permettant d'effectuer ce calcul sont appelées intégrateurs volumiques. Dans le cas où l'on n'a pas défini de propriétés volumiques, la transmittance est égale à 1 sur chaque portion rectiligne du chemin : c'est le choix réalisé dans notre travail sur les scènes urbaines en raison des faibles distances parcourues par les rayons au sein de la scène (cf. sections 3.5.3 et 3.5.3.2).

3.4.2.4 Critère d'arrêt

Le chemin de la contribution peut être arrêté de deux façons : soit le rayon n'intersecte ni objet ni source, soit le rayon intersecte une source.

On rappelle que (x, y) sont les coordonnées dans le repère image de l'intersection de la direction (I_0, \vec{u}_0) avec la matrice du capteur. On note par la suite $N_{int}(x, y)$ le nombre d'intersections avec des objets (autres que des sources) qui ont eu lieu avant l'arrêt du rayon. $I_{N_{int}(x, y)}$ est donc le dernier point sur une surface de la scène atteint par le chemin de la contribution, avant une intersection avec une source de lumière.

Une fois le critère d'arrêt vérifié, on calcule la luminance directe issue des sources lumineuses $L_{dir. sources}$ au point $I_{N_{int}(x, y)}$ dans la direction $-\vec{u}_{N_{int}(x, y)-1}$ (cf. figure 3.2).

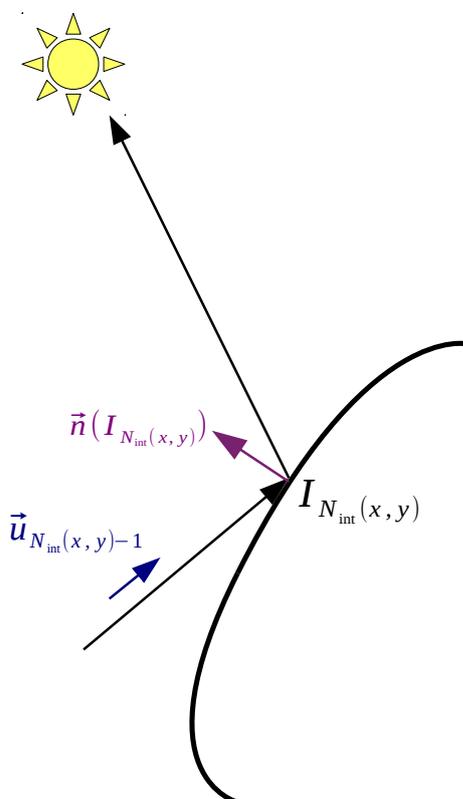


FIGURE 3.2 – Dernier point intersecté par un rayon avant arrêt.

3.4.2.5 Estimation de la luminance directe en un point dans une direction

La luminance renvoyée au point $I_{N_{int}(x,y)}$ dans la direction d'incidence $-\vec{u}_{N_{int}(x,y)-1}$ du rayon est donnée par l'intégration des contributions des rayons issus des sources occupant l'ensemble d'angles solides tirés aléatoirement $\Omega_{sources}$ dans l'hémisphère au-dessus de $I_{N_{int}(x,y)}$:

$$L_{dir. sources}(I_{N_{int}(x,y)}, -\vec{u}_{N_{int}(x,y)-1}) = \int_{\omega_s \in \Omega_{sources}} \rho_{dd}(I_{N_{int}(x,y)}, \omega_s, -\vec{u}_{N_{int}(x,y)-1}) \cdot L_{sources}(-\omega_s) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}_{I_{N_{int}(x,y)}}, \omega_s}) \cdot d\omega_s \quad (3.3)$$

L'estimation de cette intégrale se fait par intégration de Monte-Carlo sur un ensemble discret d'angles solides ω_j dans $\Omega_{sources}$:

$$L_{dir. sources}(I_{N_{int}(x,y)}, -\vec{u}_{N_{int}(x,y)-1}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\rho_{dd}(I_{N_{int}(x,y)}, \omega_j, -\vec{u}_{N_{int}(x,y)-1}) \cdot L_{sources}(-\omega_j) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}_{I_{N_{int}(x,y)}}, \omega_j})}{pdf(\omega_j)} \quad (3.4)$$

où $pdf(\omega_j)$ est la densité de probabilité de l'angle solide ω_j qui a servi au tirage aléatoire (cf. la section 3.4.3.2) .

3.4.2.6 Luminance portée par une contribution

On rappelle que $N_{int}(x,y)$ est le nombre total d'intersections avec des surfaces rencontrées par le chemin avant qu'il ne s'arrête (quand le critère d'arrêt est vérifié). La luminance portée par une contribution après l'arrêt des itérations est alors la luminance directe au dernier point multipliée par l'atténuation totale $F^{N_{int}(x,y)}$:

$$L_{contribution}(x,y) = G^{N_{int}(x,y)} \cdot R^{N_{int}(x,y)} \cdot T^{N_{int}(x,y)} \cdot L_{dir. sources}(I_{N_{int}(x,y)}, -\vec{u}_{N_{int}(x,y)-1}) \quad (3.5)$$

La probabilité du chemin de cette contribution est $P^{N_{int}(x,y)}$.

3.4.2.7 Valeur en luminance d'un pixel

En lançant un grand nombre de rayons depuis la caméra, on obtient donc, pour un certain ensemble de points images repérés par des coordonnées en flottants (x,y) , une valeur de la luminance portée par une contribution issue de (x,y) et ayant suivi un chemin particulier. Pour calculer la valeur de la luminance venant de la scène sur un pixel, défini par des coordonnées entières (i,j) dans le repère image, on somme les contributions des $N_{contributions}$ contributions parvenues dans la cellule entourant le point de coordonnées (i,j) . Cette somme peut être pondérée par la PSF du système optique. Dans le cas où la PSF est une fonction porte :

$$L(i,j) = \frac{1}{N_{contributions}} \sum_{k=1}^{N_{contributions}} \frac{L_{contribution}(x^k, y^k)}{P_k^{N(x^k, y^k)}} \quad (3.6)$$

Cette somme est bien l'estimation de Monte-Carlo de la quantité à estimer :

$$L(i,j) = \text{Estimation de Monte-Carlo de } \int_{C \in \text{Chemins possibles}} L(i,j,C) dC \quad (3.7)$$

On a donc, avec une variance diminuant en $\frac{1}{\sqrt{N_{contributions}}}$:

$$L(i,j) = L_{direct}(i,j) \quad (3.8)$$

où L_{direct} est la luminance directe arrivant sur le pixel (i,j) .

Dans le cas général, le voisinage de (i,j) utilisé pour la sommation est le support de la PSF du système optique. La PSF est généralement décrite par une fonction passe-bas : fonction porte, sinus cardinal, gaussienne, etc, qui permet de décrire la réalité physique de l'optique mais également de limiter l'*aliasing*. Dans le cas où cette PSF est spatialement invariante, l'équation (3.6) devient la convolution suivante :

$$L(i,j) = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_{contributions}} PSF(i - x^k, j - y^k)} \sum_{k=1}^{N_{contributions}} \frac{L_{contribution}(x^k, y^k) \cdot PSF(i - x^k, j - y^k)}{P_k^{N(x^k, y^k)}} \quad (3.9)$$

Une PSF spatialement variable, issue par exemple d'un étalonnage, peut également être utilisée.

3.4.2.8 Intégration spectrale

On a présenté ici l'algorithme dans le cas monochromatique. Pour travailler sur un domaine spectral donné, il ne s'agit que de rajouter une dimension supplémentaire à l'intégration Monte-Carlo. A chaque tirage d'un rayon, celui-ci se voit affecté une longueur d'onde λ avec une probabilité $pdf(\lambda)$ correspondant à la description du domaine spectral. La luminance d'une contribution $L_{contribution}(x,y)$ explicitée précédemment est simplement divisée par $pdf(\lambda)$. La somme effectuée lors du calcul de la luminance d'un pixel $L(i,j)$ (équation (3.6)) réalise donc l'intégration spectrale en plus de l'intégration sur les chemins possibles de la lumière.

3.4.3 Implémentation efficace

3.4.3.1 Path tracing

Il existe plusieurs méthodes implémentées pour générer l'ensemble d'intégration, i.e l'ensemble des contributions portant la luminance d'un chemin. Les méthodes permettant de générer des rayons et de calculer leur luminance sont appelées intégrateurs. Ces méthodes s'efforcent d'augmenter la vitesse de convergence en limitant les calculs redondants et en échantillonnant de façon optimale les directions des portions de chemin.

Cependant, certains intégrateurs introduisent des biais dans l'estimation de Monte-Carlo, et ne peuvent donc pas être utilisés pour simuler des images physiquement réalistes. C'est le cas de la méthode d'*irradiance caching* ou celle du *photon mapping*.

Les intégrateurs non biaisés utilisés dans LuxRender sont le *path tracing* (voir l'annexe A.3 pour plus de détails) et sa variante le *path tracing* bidirectionnel. On utilise dans la suite des travaux le *path tracing* car il est plus simple, plus aisé à prendre en main, et tout à fait adapté aux scènes extérieures.

3.4.3.2 Échantillonnage préférentiel

La densité de probabilité utilisée pour le tirage aléatoire de la direction du prochain rayon influe grandement sur l'efficacité du rendu. L'idée de base est que les rayons dont la contribution en luminance est faible influent peu sur le signal total arrivant sur un pixel ; il vaut donc mieux échantillonner plus fortement les zones angulaires qui permettent d'obtenir un fort signal. Une méthode fréquemment utilisée pour cela est l'échantillonnage préférentiel multiple (*multiple importance sampling* en anglais), qui utilise la valeur de la BRDF et l'étendue des sources comme critère d'importance, afin d'accélérer la convergence en réduisant la variance de l'estimateur.

3.5 Simulation des différents termes avec IRSUTE dans le cas d'une scène urbaine

La simulation d'images extérieures de luminance avec notre outil basé sur LuxRender (dont le principe est expliqué précédemment en 3.4), nécessite la prise en compte de tous les termes intervenant dans l'équation radiométrique. Il faut notamment simuler le soleil et l'effet de la diffusion dans l'atmosphère.

3.5.1 Soleil

On peut modéliser le soleil par une source ponctuelle située à l'infini. Cependant, cela ne permet pas de prendre en compte les zones de pénombre faisant la transition entre les zones au soleil et les zones à l'ombre, dont l'influence n'est pas négligeable (cf. A.2).

La prise en compte de la pénombre lors du lancer de rayon peut être intégrée à la carte d'environnement, par le biais d'une source étendue pour modéliser le soleil ; mais cela entraînerait alors des problèmes d'échantillonnage, du fait de la faible étendue apparente du soleil sur l'espace sphérique (λ, ϕ) . Une méthode est proposée dans LuxRender, en jouant directement sur la méthode d'intersection des rayons avec la source solaire.

Pour la transmittance, on fait l'hypothèse que les épaisseurs optiques sur les trajets au sein de la scène sont faibles devant l'épaisseur optique d'une traversée complète de l'atmosphère. On peut donc se contenter de pondérer la puissance du soleil par la transmittance d'une traversée complète moyenne de l'atmosphère.

Cette modélisation du soleil permet de calculer les interactions de type SR+C, i.e les luminances $L_{direct - direct}$ et $L_{direct - réfléchi n fois - direct}$ (voir la section 2.3.2.2 pour les notations).

3.5.2 Intégration volumique

Une solution permise par LuxRender pour prendre en compte la diffusion est la définition de propriétés volumiques pour l'atmosphère. En effet, il est possible de définir dans le modèle 3D des volumes ayant certaines propriétés optiques, caractérisées par un coefficient d'absorption, un coefficient de diffusion et une fonction de phase. L'effet de ces volumes non neutres est pris en compte par un intégrateur volumique lors du lancer de rayon sur les chemins entre deux interactions avec un objet. Il suffit donc uniquement de définir l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère.

Les interactions de type SR+C, i.e les luminances $L_{direct - direct}$ et $L_{direct - réfléchi n fois - direct}$, sont alors modélisées par l'intégration sur les objets surfaciques. Les interactions de type S(D|R)*D(D|R)*C, i.e les luminances $L_{atmosphérique}$, $L_{diffus montant}$, $L_{diffus - direct}$, $L_{diffus - réfléchi n fois - direct}$, $L_{couplage - direct}$, sont modélisées par l'intégration volumique éventuellement combinée avec l'intégration surfacique.

Cependant, cette solution nécessite une connaissance fine de l'atmosphère, que l'on ne sait généralement caractériser que par des grandeurs globales (telles l'épaisseur optique sur toute l'atmosphère ou la visibilité) et des modèles. Typiquement, pour caractériser l'atmosphère en entrée du code transfert radiatif 6S (Vermote et al., 1997), la donnée d'un modèle moléculaire, d'un modèle d'aérosol et d'une visibilité est suffisante.

Indépendamment de cette problématique des données disponibles, cette méthode est très coûteuse en temps de calcul. En effet, si la transmission n'est qu'un facteur à appliquer, la diffusion quant à elle change la direction du rayon, ce qui incrémente la taille n du chemin de la contribution à chaque interaction avec une particule. C'est pourquoi aucun des deux intégrateurs volumiques implémentés dans LuxRender n'effectue le transfert radiatif complet. Ces intégrateurs n'effectuent pas la déviation de la direction du rayon, mais se contentent de

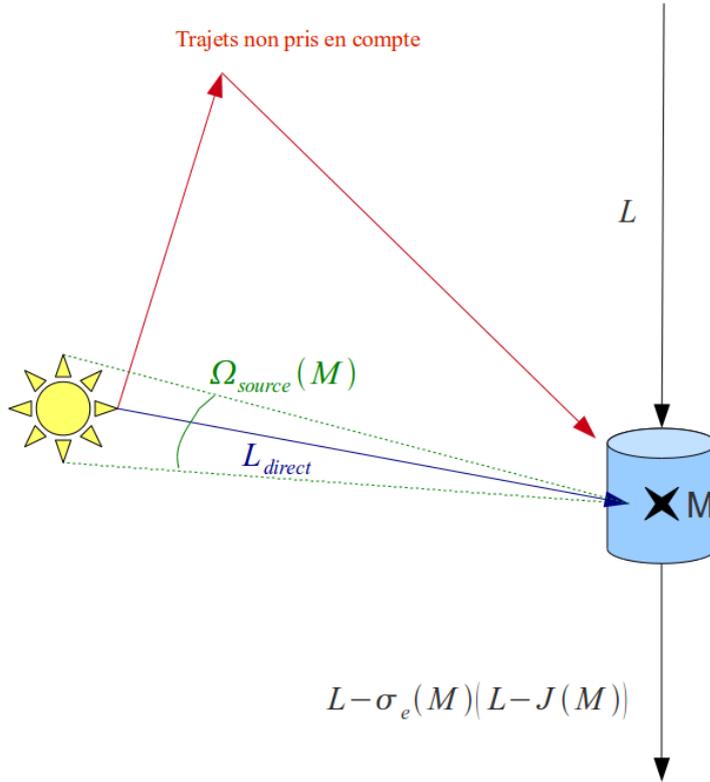


FIGURE 3.3 – Intégration volumique approchée implémentée dans LuxRender.

lui adjoindre un facteur prenant en compte la transmission, et une approximation de la diffusion multiple, qui n'est estimée qu'à partir de la luminance directe reçue en l'élément de volume (et non la luminance totale), au travers d'une fonction source J de la forme :

$$J(M) = \frac{\omega_{sd}(M)}{4\pi} \int_{\Omega_{sources}(M)} P(M, \omega) L_{direct}(M, \omega) d\omega \quad (3.10)$$

où ω_{sd} est l'albédo de simple diffusion, P est la fonction de phase du milieu.

Les interactions du type SD(RD)*R?C sont donc prises en compte. Il manque donc les photons ayant subi au moins deux diffusions consécutives sur leur trajet, i.e les interactions S(D|R)*DD(D|R)*C.

Cette solution, dont la figure 3.3 donne le schéma de principe, n'a donc pas été retenue.

3.5.3 Méthode indirecte : rajout de sources

3.5.3.1 Prise en compte de la diffusion atmosphérique par carte d'environnement

Pour pouvoir prendre en compte la diffusion en n'utilisant que les quelques paramètres atmosphériques utilisés ordinairement, et non une caractérisation volumique complète, on utilise une carte d'environnement (*environment map* en anglais). Il s'agit d'une LUT (*Look-up table*, tableau de valeurs précalculées) donnant pour chaque direction dans l'hémisphère au-dessus de la scène la valeur de la luminance descendante du ciel (la figure 3.4 donne un exemple

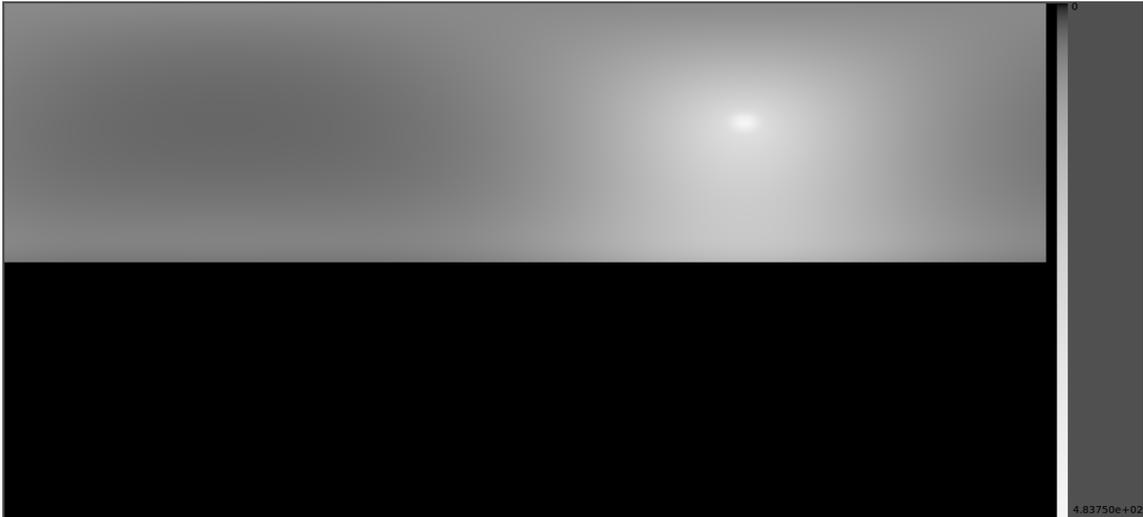


FIGURE 3.4 – Exemple de carte d'environnement, à la longueur d'onde 550 nm.

d'environnement map). On la définit par une image des luminances diffuses du ciel, où la coordonnée x représente l'azimut ($\phi \in [0^\circ, 360^\circ]$) et la coordonnée y représente l'angle zénithal ($\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$), avec dans notre cas des valeurs nulles pour $\theta > 90^\circ$).

On peut noter que la modélisation par carte d'environnement est équivalente à la modélisation par rajout d'un hémisphère émetteur entourant la scène, dans le cas où le rayon de cet hémisphère est infini, et sans nécessiter la définition de facettes sur cet hémisphère (Doz, 2011) (Martinoty, 2005). L'hypothèse physique faite lors de l'utilisation de cette carte d'environnement est que l'effet de l'atmosphère dans l'enveloppe de la scène est négligeable.

La carte d'environnement ainsi définie est utilisée comme toute autre source lors du lancer de rayon : quand un rayon l'atteint, la carte d'environnement renvoie la luminance émise dans la direction de ce rayon. De même, lors de l'intégration de Monte-Carlo de la luminance directe arrivant en un point ($L_{direct}(I_{n+1}, -\vec{u}_n)$), la carte d'environnement renvoie la luminance pour les directions $-\omega_j$ qui l'atteignent.

Cela permet donc de modéliser toutes les interactions se terminant par une diffusion suivie d'une réflexion puis d'un trajet direct vers la caméra, i.e. les interactions du type S(D|R)*DRC. On peut ainsi calculer la somme des luminances $L_{diffus - direct}$, $L_{diffus - réfléchi\ n\ fois - direct}$, et $L_{couplage - direct}$.

Les valeurs de la carte d'environnement peuvent être calculées par un code de transfert radiatif (par exemple 6S), qui donne alors la luminance descendante du ciel pour une direction (θ, ϕ) . Cependant, la prise en compte de l'éclairement de couplage est approchée en utilisant un albédo moyen du sol ; de plus, ces codes sont limités aux conditions de ciel sans nuages. Une autre solution consiste à utiliser directement l'information de luminance du ciel donnée par les pixels des images qui voient le ciel. Bien qu'elle permette d'obtenir une carte d'environnement correcte quelles que soient les conditions météorologiques, cette méthode est délicate à mettre en œuvre à cause de la sur-exposition de la caméra pour les pixels voyant le ciel (voir la section 4 qui traite de ce problème).

3.5.3.2 Luminance parasite

En ce qui concerne les luminances atmosphérique (interactions de type SD+C) et diffuse montante (interactions de type S(D|R)*RD+C où la dernière diffusion a lieu dans l'angle de vue d'un pixel imageant un objet de la scène), il n'est pas possible de les modéliser en jouant

sur les sources de lumière. Il faudrait donc utiliser une modélisation volumique pour les prendre en compte de façon exacte.

Pour ces deux termes, dans le cas d'une image terrestre, la géométrie de l'acquisition ne permet pas d'envisager une hypothèse de sol plat. Cependant, les faibles distances et donc le faible volume d'atmosphère intervenant entre la cible et la caméra permet de négliger la diffusion et l'absorption ayant lieu sur les trajets entre cible et capteur. Numériquement, pour une visibilité horizontale faible de 10 km (dans le domaine visible, et en-dehors des bandes d'absorption atmosphérique), la transmission entre le fond de la rue et un bâtiment de 30 m de haut est de 0,99. **On néglige ainsi cette atténuation dans IRSUTE.** Ceci implique de plus que, du fait de cette très faible atténuation, la diffusion atmosphérique restera également négligeable le long de ce trajet ; **c'est pourquoi la luminance parasite dans le canyon est également négligée.**

3.6 Validation

L'outil développé à partir du code de lancer de rayon LuxRender a été validé numériquement afin de permettre son utilisation dans une chaîne d'inversion radiométrique.

3.6.1 Convergence

On réalise un calcul de luminance sur une zone théoriquement homogène : la scène est un plan lambertien, éclairé par une carte d'environnement homogène, unitaire. La simulation est faite avec une caméra orthographique ; la luminance théorique est donc homogène sur toute l'image.

On mesure alors l'écart-type de l'image à différents temps de calcul. La convergence d'une méthode d'intégration de Monte-Carlo est théoriquement en $O(\frac{1}{\sqrt{N}})$, N étant le nombre de photons lancés, proportionnel au temps de calcul (Veach, 1997). Pour le vérifier, un modèle paramétrique de la forme $\sigma(t) = \beta \cdot t^{-\alpha}$ est estimé sur les mesures d'écart-type ; le résultat est montré sur le graphe suivant. Les croix noires représentent les mesures, et la courbe rouge représente le modèle estimé sur ces mesures. Les paramètres estimés sont : $\alpha_{estimé} = 0,4988$ et $\beta_{estimé} = 125,02$.

La convergence est donc bien en $O(\frac{1}{\sqrt{N}})$. Il s'agit d'une convergence lente : sur des scènes plus complexes, le bruit de calcul peut donc être non négligeable. Ce bruit sera d'autant plus fort que la zone est sombre, puisque la moyenne de Monte-Carlo se fait alors avec un plus petit nombre d'échantillons ; c'est le cas par exemple dans les ombres.

3.6.2 Validation sur des scènes simples

On considère l'éclairement direct reçu au sol provenant d'une source de lumière étendue (carte d'environnement constante). On utilise des scènes simples pour lesquelles on peut calculer analytiquement cet éclairement, et on le compare avec l'éclairement calculé par IRSUTE.

3.6.2.1 Marche séparant deux plateaux

Scène On suppose que la marche est de longueur infinie, de hauteur H . La discontinuité se situe en $x = 0$, la partie basse pour $x < 0$, la partie haute pour $x > 0$ (cf. figure 3.6) . On considère comme source de lumière une luminance diffuse du ciel constante sur l'hémisphère, égale à $1 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$.

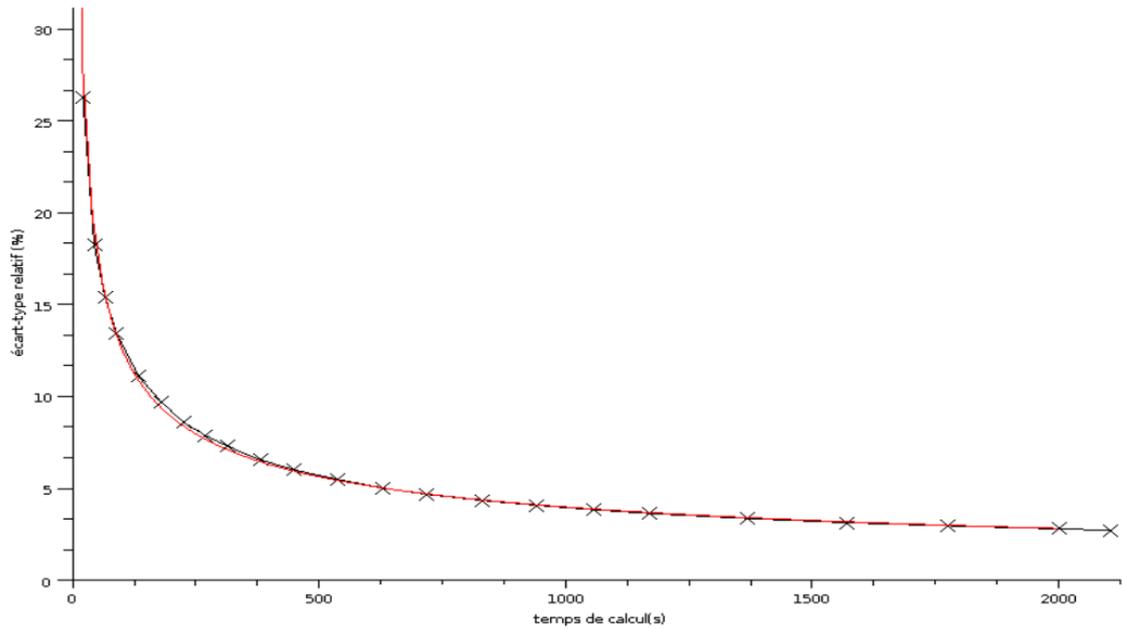


FIGURE 3.5 – Vitesse de convergence du lancer de rayon. Croix et courbes noires : temps de calcul mesurés. **Courbe rouge** : courbe paramétrique estimée à partir des mesures.

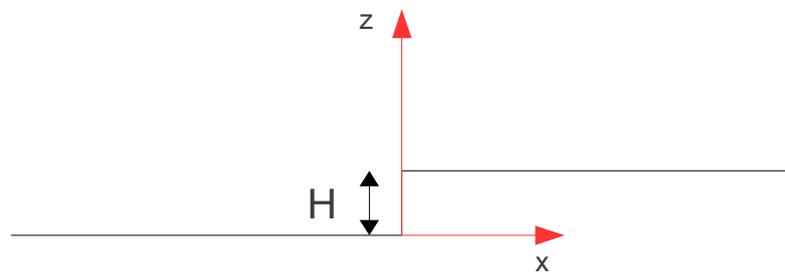


FIGURE 3.6 – Schéma de la scène de la marche.

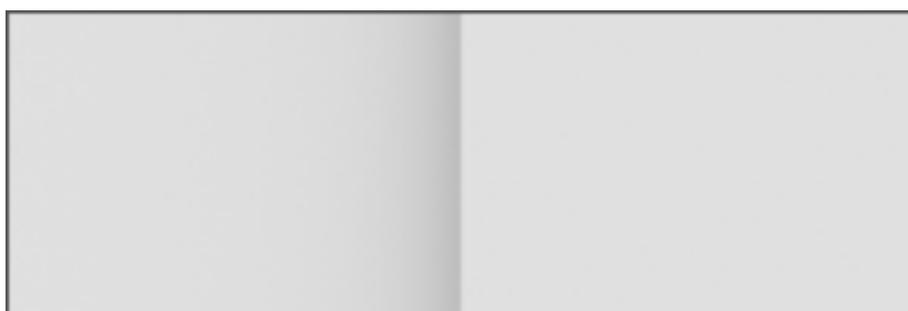


FIGURE 3.7 – Image d'éclairage direct de la marche simulée avec IRSUTE.

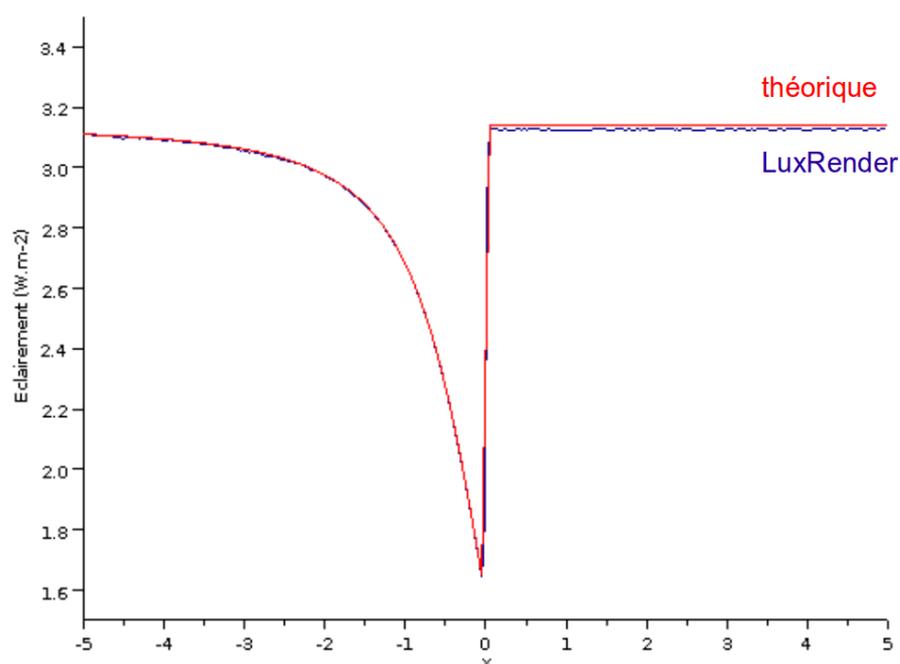


FIGURE 3.8 – Profils théorique (en rouge) et simulé (en bleu) avec IRSUTE sur la scène de la marche.

Profil théorique

$$E = \begin{cases} \pi L & \text{pour } x > 0 \\ \frac{\pi}{2} L + \int_{\phi=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\theta=0}^{\arctan \frac{x}{H \cdot |\cos(\phi)|}} L \cdot \cos(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi & \text{pour } x < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Ce profil est calculé numériquement avec Scilab.

Profil IRSUTE On modélise une scène avec une marche de grande longueur et une hauteur $H = 1$, éclairée par une carte d'environnement constante de valeur 1. L'éclairage reçu par cette scène est visible sur la figure 3.7.

Comparaison En comparant le profil calculé par Scilab et le profil simulé par IRSUTE, on observe une très bonne précision du résultat IRSUTE sur cette scène (cf. figure 3.8).

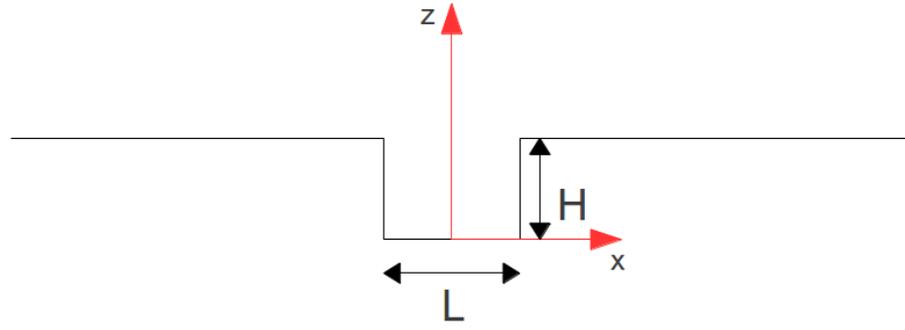


FIGURE 3.9 – Schéma de la scène du canyon.



FIGURE 3.10 – Image d'éclairage direct du canyon simulée avec IRSUTE.

3.6.2.2 Canyon

Scène On suppose que le canyon est de longueur infinie, de profondeur H , de largeur L . Le centre du canyon se situe en $x = 0$ (cf. figure 3.9). On considère comme source de lumière une luminance diffuse du ciel constante sur l'hémisphère, égale à $1 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$.

Profil théorique

$$E = \begin{cases} \pi L & \text{pour } x > \frac{L}{2} \text{ ou } x < -\frac{L}{2} \\ \int_{\phi=-\pi/2}^{\pi/2} \left(\int_{\theta=0}^A L \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta + \int_{\theta=0}^B L \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \right) \cdot d\phi & \text{pour } x \in \left[-\frac{L}{2}; \frac{L}{2}\right] \end{cases}$$

avec $A = \arctan \frac{(\frac{L}{2} - x)}{H \cdot |\cos \phi|}$
 et $B = \arctan \frac{(\frac{L}{2} + x)}{H \cdot |\cos(\phi)|}$

(3.12)

Ce profil est calculé numériquement avec Scilab.

Profil IRSUTE On modélise une scène avec un canyon de grande longueur, de hauteur $H = 1$, de largeur $L = 2$, éclairée par une carte d'environnement constante de valeur 1. L'éclairage reçu par cette scène est visible sur la figure 3.10.

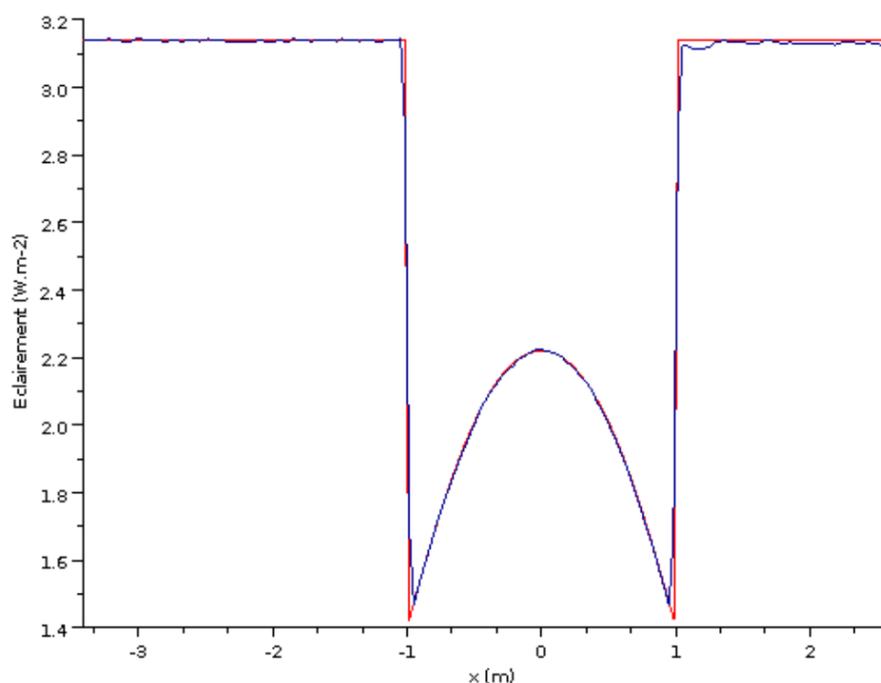


FIGURE 3.11 – Profils théorique (en rouge) et simulé (en bleu) par IRSUTE sur la scène du canyon.

Comparaison On observe également une très bonne précision de l'éclairement sur cette scène (cf. figure 3.11). L'erreur au pied des parois du canyon est en partie due à la pixellisation de l'image simulée.

3.6.3 Validation sur des scènes complexes par comparaison avec AMARTIS v2

Afin de valider les luminances calculées par IRSUTE sur des scènes plus complètes, une comparaison avec les résultats du code de simulation de l'ONERA, nommé AMARTIS (Doz et al., 2008), a été réalisée. On a pour cela utilisé une scène de carrefour entouré de bâtiments (cf. figure 3.12).

La simulation est réalisée à la longueur d'onde 550 nm. L'éclairement solaire en haut de l'atmosphère, la transmission atmosphérique et la luminance diffuse du ciel sont calculés par le code de transfert radiatif 6S. L'éclairement total au sol est calculé avec AMARTIS, et avec LuxRender. Les images d'éclairement résultantes ainsi que l'image de la différence entre les deux simulations sont visibles sur la figure 3.13.

Numériquement, cela correspond sur l'image des différences à un RMS d'environ 90 W.m^{-2} , soit environ 10%, l'éclairement au sol se trouvant en moyenne aux alentours de 1000 W.m^{-2} .

Ce RMS semble important, mais les forts écarts sont observés principalement au niveau des arêtes ; cela est dû à une gestion différente de la géométrie dans les deux codes de simulation (la triangulation en facettes dans AMARTIS de taille homogène entraîne un effet de discrétisation).

En effet, les pixels présentant les plus forts écarts sont ceux qui imagent les bords d'ombres projetées, cette projection présentant un effet crénelé sur les simulations AMARTIS (cf. figure 3.13). Cela est mis en avant sur la figure 3.14, qui montre l'image des écarts relatifs entre les deux simulations : $\frac{E_{AMARTIS} - E_{IRSUTE}}{E_{AMARTIS}}$. Soit μ la moyenne de cet écart sur l'ensemble de l'image, σ son écart-type. Les pixels ayant un fort écart relatif sont en rouge (écart n'appar-

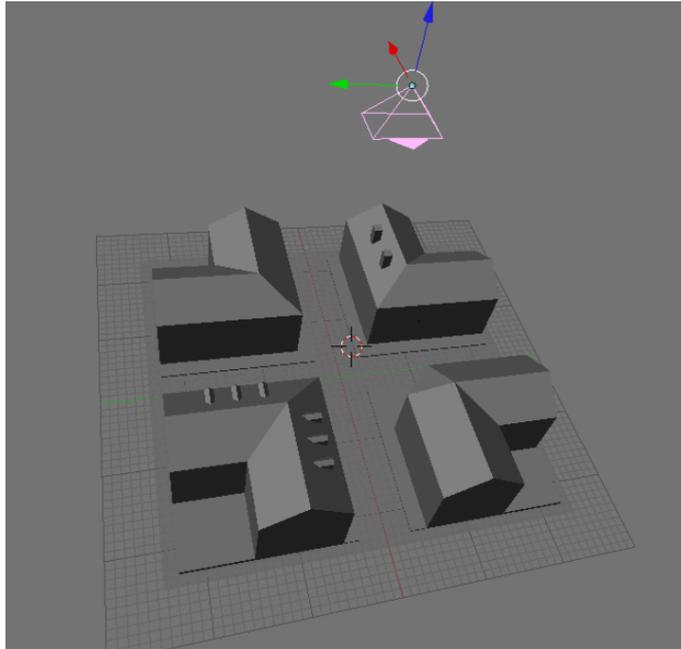


FIGURE 3.12 – Scène de carrefour urbain, utilisée pour la comparaison de notre outil de simulation avec AMARTIS v2. Visualisation avec le logiciel Blender.

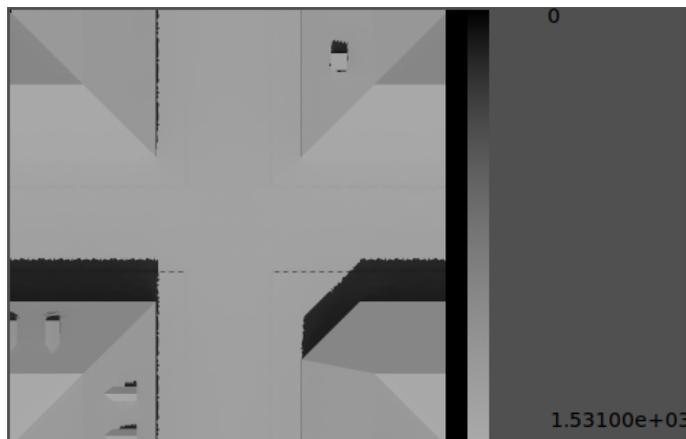
tenant pas à $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$); ces pixels représentent 1% du nombre total des pixels. Sans prendre en compte ces pixels rouges, l'EMQ, donnée par $\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$, est de 0.057, soit un écart de l'ordre de 6% entre les deux simulations.

3.6.4 Conclusion

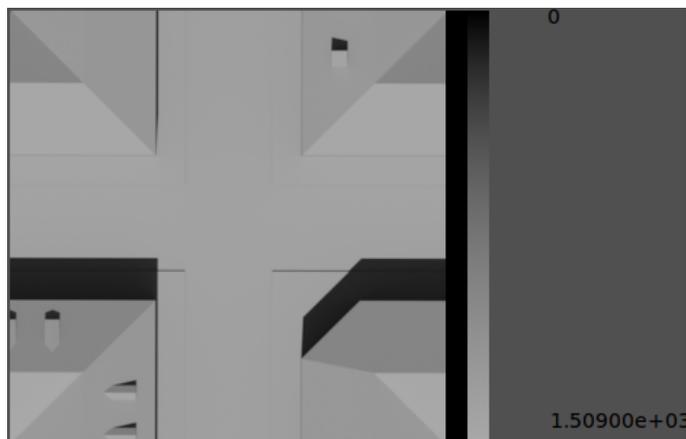
Sur une scène complexe illuminée par le soleil et une hémisphère céleste diffusante, l'EMQ de la différence entre les simulations AMARTIS et IRSUTE est non négligeable (de l'ordre de 6% sur l'éclairement total); une partie est due à une gestion différente de la géométrie dans les deux codes, qui se traduit par des discontinuités dans l'image AMARTIS. En effet, l'utilisation du lancer de rayon permet d'éviter une discrétisation par triangulation de la scène, permettant ainsi de réaliser des simulations sur des scènes géométriquement complexes (cf. figure 3.15).

Cependant, on n'observe pas de biais significatif : la moyenne de la différence est de 11 W.m^{-2} , soit environ 1% d'écart relatif. D'autre part, l'éclairement direct calculé sur des scènes simples par IRSUTE ne présente pas de biais par rapport à la valeur théorique.

On considère donc l'outil de simulation d'IRSUTE comme valide.



Éclairage total calculé avec AMARTIS



Éclairage total calculé avec IRSUTE



Différence entre les deux images d'éclairage précédentes

FIGURE 3.13 – Comparaison de l'éclairage total au sol entre les simulations AMARTIS et IRSUTE. L'échelle de représentation des valeurs en niveau de gris est différente sur l'image des différences. Les valeurs des images sont en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

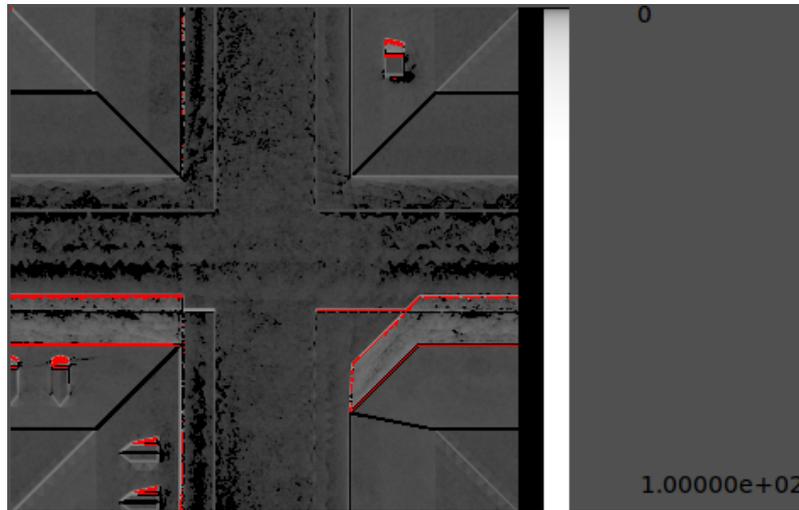


FIGURE 3.14 – Écart relatif entre les simulations IRSUTE et AMARTIS. Les pixels présentant un fort écart sont en rouge. Les valeurs sont sans dimension.

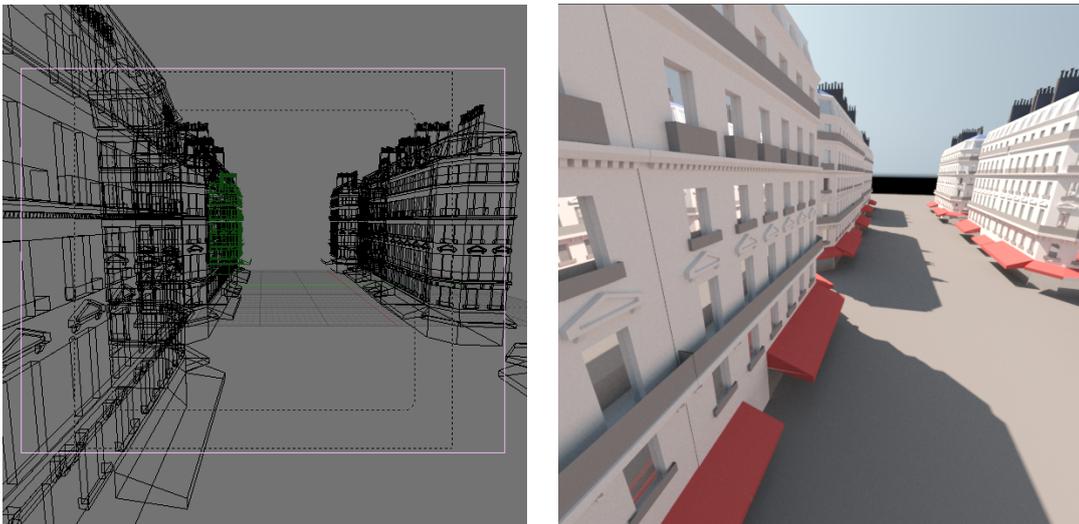


FIGURE 3.15 – Simulation avec notre outil sur une scène comportant des bâtiments complexes. À gauche : modèle 3D visualisé avec Blender. À droite : image simulée avec IRSUTE.

Estimation de l'illumination

4.1 État de l'art

L'illumination d'une scène terrestre réelle extérieure provient de la lumière du soleil, transmise et diffusée par l'atmosphère. Les codes de transfert radiatif tels que 6S permettent ainsi de calculer la luminance diffuse issue du ciel et la transmission descendante de l'atmosphère, à partir de données météorologiques, avec des limitations fortes sur la scène (cf. la section 3.2.1.1).

Des modèles paramétriques de la luminance de l'hémisphère céleste existent ; un état de l'art de ces modèles est proposé par Igawa et al. (2004). Le modèle le plus utilisé est le modèle de Perez et al. (1993), contenant 6 paramètres. Il est utilisé par exemple par Chain (2004) pour la caractérisation de la luminance du ciel à partir des mesures d'un spectrophotomètre réalisées sur une zone dégagée. On peut noter que ces modèles empiriques ne sont pas valides en présence de nuages.

Une méthode basée image (i.e. utilisant uniquement l'information contenue dans les pixels des images) est proposée par Debevec (1998), reconstruisant une carte d'environnement à partir de l'image d'une sphère miroir, pour des applications de réalité augmentée. Cependant, cette carte d'environnement comprend la luminance renvoyée par les objets environnants, considérés comme lointains, et non uniquement la luminance du ciel. Stumpfel et al. (2004) proposent l'utilisation d'une caméra à très large champ (*fish-eye*) sur une zone dégagée. L'utilisation de temps de pose différents (principe de l'imagerie HDR : *High Dynamic Range* (Reinhard, 2006)) et de filtres de densité (spectralement neutres) permet la mesure directe de la luminance solaire (sans sur-exposition).

4.2 Problématique

Comme évoqué dans la section 3.5.2, il est coûteux de prendre en compte la diffusion atmosphérique par la définition de propriétés volumiques et un lancer de rayon réalisant l'intégration volumique. Il est préférable, pour prendre en compte la diffusion atmosphérique, de modéliser toute la luminance issue du ciel (par diffusion simple, multiple, par couplage) par une carte d'environnement (cf. la section 3.5.3). Ainsi, on cherche à estimer la luminance du ciel pour toutes les directions (θ, ϕ) de l'hémisphère surplombant la scène.

Pour compléter le modèle d'illumination, il faut également estimer l'éclairement solaire direct au niveau du sol. Celui-ci pourrait être pris en compte directement sur la carte d'environnement, mais la discrétisation (par pixellisation) induite par cette carte n'est pas adaptée à la représentation d'un phénomène de très haute fréquence dans le domaine (θ, ϕ) . C'est

pourquoi l'éclairement solaire direct est modélisé par une source ponctuelle (ou peu étendue pour simuler les zones de pénombre) dont la puissance doit être déterminée.

4.2.1 Limites des codes de transfert radiatif

Il est possible d'estimer l'illumination avec un code de transfert radiatif, mais la mise en œuvre n'est pas aisée dans notre contexte. En effet, il faut avoir des observations météorologiques simultanées à l'acquisition, ce qui n'est pas le cas dans les procédures actuelles d'acquisition. De plus, il faut connaître la réponse spectrale et le gain absolu de notre caméra pour pouvoir calculer la luminance du ciel dans les bandes spectrales correspondant aux canaux de la caméra. Enfin, les codes de transfert radiatifs sont limités aux ciels clairs homogènes par couches horizontales (hypothèse plan-parallèle, non valide en présence de nuages). Pour ces raisons, une méthode entièrement basée image est choisie pour la suite.

4.2.2 Utilisation de l'information des images voyant le ciel

Afin de s'affranchir de toute mesure météorologique, une méthode basée image est préférée ici. Il s'agit d'utiliser les valeurs des pixels voyant le ciel dans les différentes images acquises comme des mesures directes de la luminance du ciel, et ainsi reconstituer une carte d'environnement. Les principales difficultés sont :

- la complétion des données sur l'hémisphère céleste, car les images urbaines présentent un fort masquage du ciel par les bâtiments. Il faut donc utiliser l'information issue de stations du véhicule pour pouvoir espérer atteindre cette complétion.
- la variabilité temporelle du ciel (déplacement des nuages, course du soleil), qui perturbe la cohérence de la carte d'environnement estimée avec des images prises à des moments différents (écarts temporels maximaux de l'ordre de quelques dizaines de minutes) ;
- la qualité radiométrique des images, en absolu pour obtenir une carte d'environnement précise, et en relatif entre les caméras pour assurer la cohérence des informations redondantes entre les différentes images. Cela demande un étalonnage radiométrique précis des caméras, mais également une influence limitée des différents artefacts présents : réflexions parasites dans l'objectif (effet de *flare* en anglais), bavement vertical (*vertical smearing* en anglais) d'un pixel à valeur élevée sur sa colonne, flou lumineux (*bloom* en anglais) autour d'une zone très lumineuse (par débordement d'électrons). La figure 4.4 présentent des exemples de ces artefacts.
- la sur-exposition des zones très lumineuses du ciel (halo solaire et nuages) est très présente (cf. figure 4.4) , car le temps d'exposition est réglé pour avoir la meilleure dynamique sur les façades. Cela entraîne une perte d'information : il est impossible de retrouver la luminance dans les zones saturées des images.

La sur-exposition entraîne également la nécessité d'estimer l'éclairement solaire direct par des moyens indirects, car il est impossible avec des caméras réglées pour l'acquisition urbaine d'obtenir une valeur (non saturée) pour les pixels voyant le soleil.

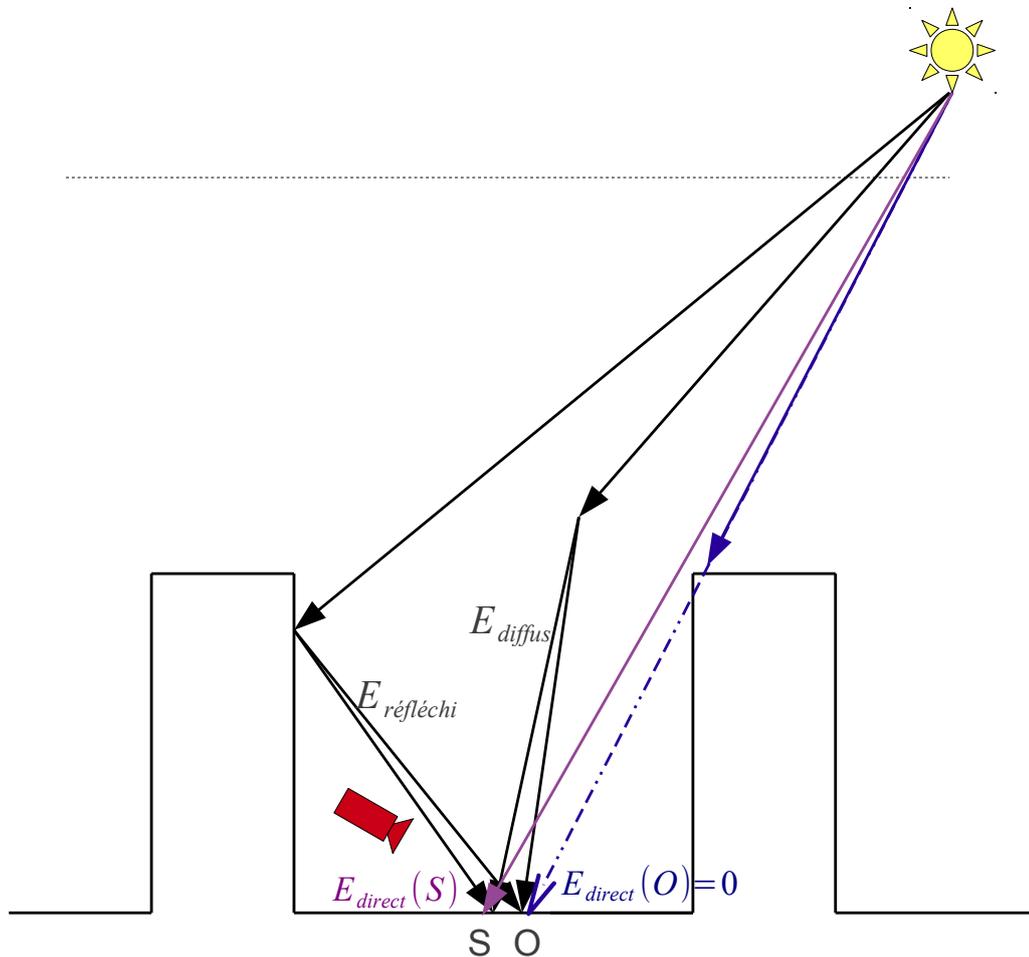


FIGURE 4.1 – Illustration de la méthode ombre/soleil; le bord d'ombre est ici généré par le haut d'un bâtiment.

4.3 Dispositif spécifique pour l'estimation de l'éclairement solaire direct

4.3.1 Méthode ombre/soleil

La mesure de cet éclairement direct par des instruments spécifiques (héliophotomètres) n'est pas envisagée dans ces travaux, car ce ne sont pas des instruments utilisés ordinairement lors d'acquisitions par un véhicule de cartographie mobile. De tels instruments ne sont d'ailleurs pas employés à l'IGN.

On propose donc de mesurer l'éclairement direct par une méthode ombre/soleil. Il s'agit d'utiliser des couples de points O (à l'ombre) et S (au soleil); ces points doivent être proches mais situés de part et d'autre d'un bord d'ombre, sur un matériau lambertien (cf. figure 4.1). Ces points doivent également ne pas se trouver dans la zone de pénombre située autour du bord d'ombre.

On décompose l'éclairement total en $E_{direct} + E_{autre}$. On a alors :

$$\begin{aligned} L(S) &= \frac{\rho}{\pi} (E_{direct}(S) + E_{autre}(S)) \\ L(O) &= \frac{\rho}{\pi} (0 + E_{autre}(O)) \end{aligned} \quad (4.1)$$

où $E_{direct}(M) = E_{TOA} \cdot \frac{T^\downarrow}{\cos(\theta_s)} \cdot (\vec{N}(M) \cdot \vec{\Theta}_s)$ On suppose alors, en raison du rapprochement géométrique, que les deux points d'un couple ombre/soleil

- sont sur des matériaux de même réflectance ρ ;
- reçoivent les mêmes éclaircements diffus, réfléchi à tous les ordres, et de couplage (i.e. $E_{autre}(S) = E_{autre}(O)$).

Si l'on connaît l'albédo ρ du matériau, l'éclairement direct peut donc être estimé par la différence entre la luminance du point à l'ombre et celle du point au soleil :

$$E_{direct} = \frac{\pi}{\rho} (L(S) - L(O)) \quad (4.2)$$

Si l'albédo est inconnu, on peut estimer le rapport entre l'éclairement direct et l'ensemble des autres composantes de l'éclairement :

$$\frac{E_{autre}}{E_{direct}} = \frac{L(S)}{L(O)} - 1 \quad (4.3)$$

4.3.2 Utilisation d'une plaque lambertienne de référence

Afin de pouvoir estimer l'éclairement solaire direct à partir de l'équation (4.2), on propose d'utiliser une plaque d'un matériau étalon (Spectralon[®]), quasi-lambertien et d'albédo connu. Celle-ci est placée sur le toit du véhicule d'acquisition, dans le champ d'une caméra dédiée. On force la création de zones d'ombre et de zones au soleil en installant un cache composé de bandes pleines et de trous au-dessus de la plaque (cf. figure 4.2) .

Ainsi, lors d'une acquisition, on obtient pour chaque station du véhicule une image contenant un grand nombre de couples de points ombre/soleil (si le toit du véhicule n'est pas tout entier dans une zone d'ombre).

Ces couples sont acquis manuellement dans les images, et l'éclairement solaire direct est estimé par la moyenne des estimations faites avec chacun de ces couples. La figure 4.1 présente les résultats sur deux images de la plaque de référence sur la ville de Saint-Mandé (cf. la section 6.2.4) . On note ici L la valeur numérique des pixels; il ne s'agit pas d'une mesure de luminance puisqu'il manque le coefficient d'étalonnage absolu permettant de convertir les comptes numériques en luminance. L'estimation n'est pas très précise, avec un écart-type relatif jusqu'à 10% ; cela est dû en partie à la qualité radiométrique des images liée d'une part à un étalonnage imparfait, et d'autre part au bruit de mesure de la luminance par la caméra.

4.3. DISPOSITIF POUR L'ESTIMATION DE L'ÉCLAIREMENT SOLAIRE DIRECT

Image 120327_0733-922-00002_0000245								
$L(S)$			$L(O)$			E_{direct}		
R	V	B	R	V	B	R	V	B
1986	1786	1753	339	316	343	1663,64	1484,85	1424,24
1985	1868	1896	266	279	304	1736,36	1605,05	1608,08
1925	1799	1803	375	298	344	1565,66	1516,16	1473,74
1933	1756	1785	300	271	306	1649,49	1500,00	1493,94
1952	1839	1846	262	282	333	1707,07	1572,73	1528,28
2037	1872	1939	260	268	351	1794,95	1620,20	1604,04
						<i>moyenne</i> (E_{direct})		
						1686,20	1549,83	1522,05
						σ (E_{direct})		
						110,67	89,84	72,21
						écart-type relatif		
						6,56%	5,80%	4,74%
Image 120327_0733-922-00002_0000564								
$L(S)$			$L(O)$			E_{direct}		
R	V	B	R	V	B	R	V	B
2043	1913	1954	436	438	474	1623,23	1489,90	1494,95
2372	2357	2566	818	918	1037	1569,70	1453,54	1544,44
2199	1946	2009	354	334	426	1863,64	1628,28	1598,99
2150	1949	2026	300	220	390	1868,69	1746,46	1652,53
						<i>moyenne</i> (E_{direct})		
						1731,31	1579,55	1572,73
						σ (E_{direct})		
						157,25	134,35	68,09
						écart-type relatif		
						9,08%	8,51%	4,33%

TABLE 4.1 – Résultats de l'estimation de l'éclairement solaire direct par la méthode ombre-soleil sur des images de la plaque de référence. Les grandeurs notées L sont des valeurs numériques de pixels ; les grandeurs E_{direct} sont donc également des valeurs numériques sans unité.

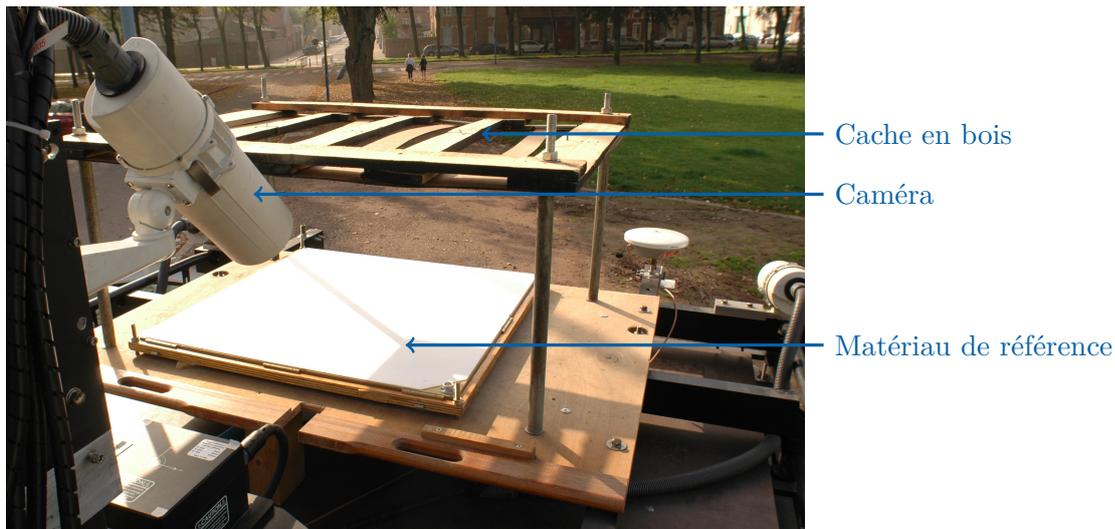


FIGURE 4.2 – Dispositif pour l'estimation de l'éclairage solaire direct : une plaque de référence est placée sur le toit de Stereopolis, surplombée d'un cache alternant parties pleines et trous pour créer des bords d'ombre. La plaque est imagée par une caméra dédiée. Cette photo a été prise lors de la campagne UMBRA (cf. la section 6.2.6.1).

4.4 Estimation de la luminance descendante du ciel à partir des images

4.4.1 Données en entrée : prétraitement et défauts

On utilise les images issues de Stereopolis, qui couvrent à chaque prise de vue la quasi-totalité de l'hémisphère au-dessus de la scène, et montrent ainsi une grande partie du ciel visible (cf. figure 4.3). Ces images, acquises avec une profondeur de 12 bits (i.e. 12 bits par valeur R, V ou B d'un pixel), sont géoréférencées et corrigées de la distortion géométrique.

On se limite à l'utilisation d'images ayant été prises dans un intervalle de l'ordre d'1 min pour reconstruire une carte d'environnement; on peut ainsi considérer qu'elles sont quasi simultanées.

4.4.1.1 Défauts radiométriques

Ces images sont affectées par différents effets inhérents aux limitations des capteurs CCD utilisés dans les caméras.

Les trop fortes valeurs de luminance en entrée du capteur L_{capteur} par rapport à la sensibilité et le temps de pose des capteurs mènent à une saturation des valeurs V de pixels :

$$V(i,j) = \min(\text{Max}_{12 \text{ bits}}, f(i,j, L_{\text{capteur}}(i,j))) \text{ avec } f \text{ la réponse de la caméra} \quad (4.4)$$

La valeur saturée ne représente alors plus la luminance que l'on cherche à mesurer dans l'image. Cette saturation apparaît fortement dans le halo solaire ou les nuages. En effet, le temps d'exposition est réglé de manière à maximiser la dynamique sur les bâtiments, généralement moins lumineux que les nuages blancs ou la zone entourant le soleil.

Des coulées verticales peuvent également affecter le signal : il s'agit d'une augmentation de la valeur des pixels sur l'ensemble d'une colonne de la matrice CDD quand un objet très lumineux s'y trouve. Ce phénomène s'accroît avec l'usure des caméras, et peut donc différer pour chaque caméra d'une tête panoramique (cf. figure 4.5). On peut également observer

4.4. ESTIMATION DE LA LUMINANCE DU CIEL

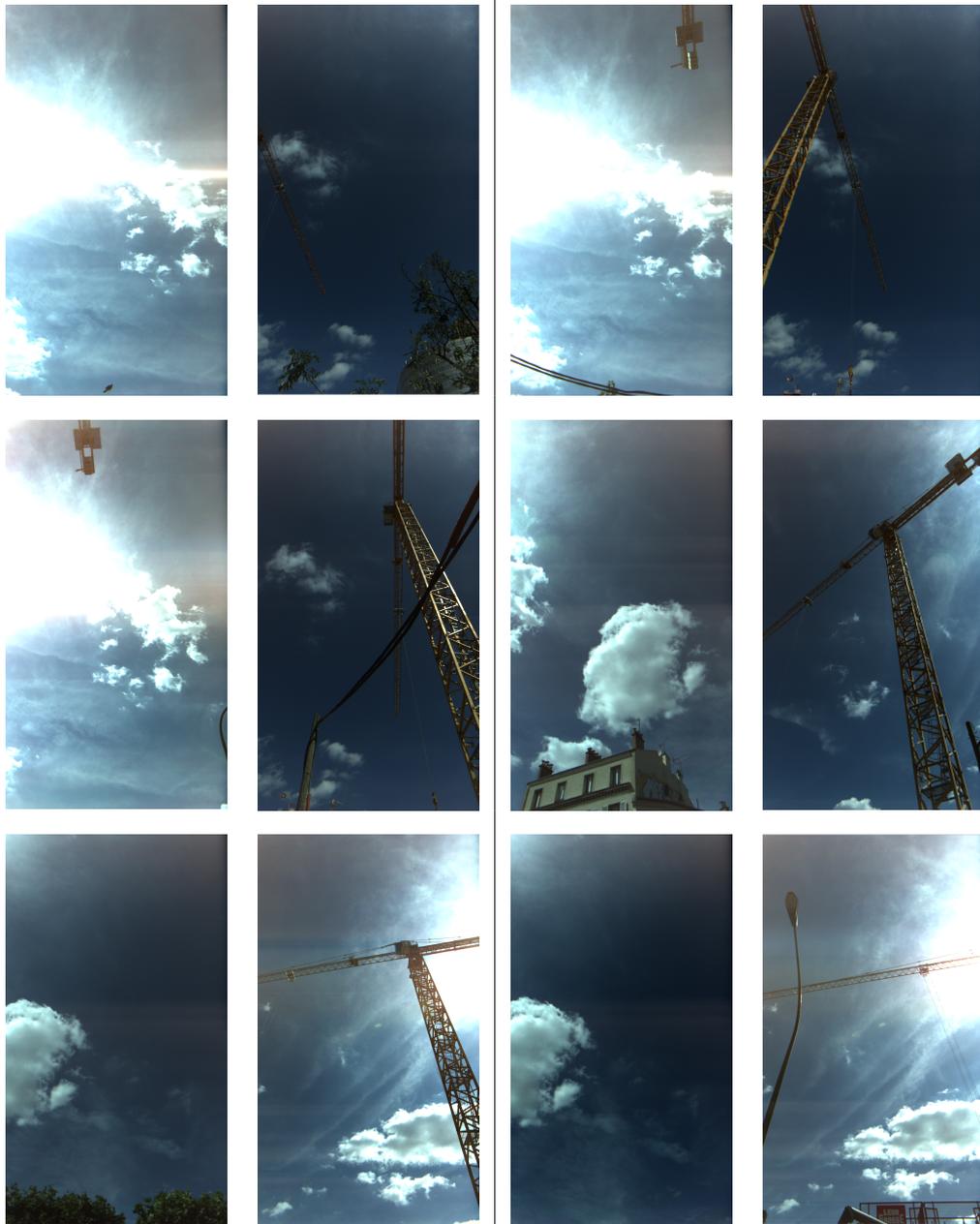


FIGURE 4.3 – Exemple d’images utilisées pour l’estimation de l’illumination céleste (images des caméras gauche et droite de la tête panoramique d’acquisition, pour 6 stations du véhicule, avec les mêmes réglages d’affichage).

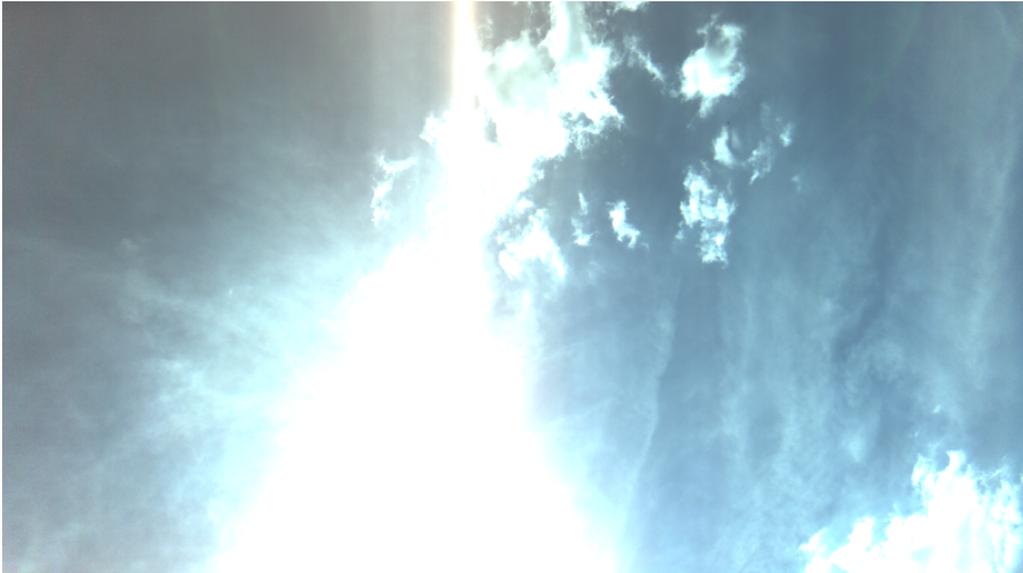


FIGURE 4.4 – Extrait d'une image avec des artefacts visibles : effet de *bloom*, saturation et distortion colorimétrique.

un phénomène de flou lumineux (effet de *bloom*) autour des objets lumineux, ainsi que des réflexions parasites dans l'objectif (effet de *flare*), qui apparaissent quand une source lumineuse forte (le soleil dans notre cas) se trouve hors du champ de la caméra mais tout de même proche de ce champ (cf. Kingslake (1992) pour une explication de ce phénomène, ou Raskar et al. (2008) pour une méthode d'atténuation dans les images).

Ces effets sont complexes à modéliser, et encore plus à corriger. Ils peuvent cependant affecter fortement la mesure physique de la lumière réalisée par le capteur, et induisent des discontinuités dans la carte d'environnement lors de la juxtaposition des pixels issus d'images différentes.

4.4.1.2 Correction de flat-field

Une correction radiométrique à l'aide d'un flat-field (cf. l'annexe A.1) doit également être effectuée. Elle doit être précédée par une détection des pixels saturés (pixels ayant au moins une valeur d'un canal égale ou proche de la valeur maximale). En effet, la valeur des pixels est codé sur 12 bits en sortie de la caméra. La correction de flat-field consistant en une division par un nombre inférieur à 1, les valeurs de l'image corrigée sont stockées sur 16 bits. Il n'est alors plus possible de savoir si un pixel est saturé sur l'image originale ou non : un pixel non saturé sur les bords de l'image peut avoir une valeur corrigée sur 16 bits supérieure à la valeur d'un pixel saturé au centre de l'image (dont la valeur reste alors $Max_{12 \text{ bits}} = 4095$).

Les pixels pour lesquels les trois canaux R, V et B sont tous trois saturés apparaissent blancs et n'apportent donc pas d'information sur la luminance arrivant à la caméra. De plus, pour les pixels de ciel bleu, on a $B > V > R$; il existe donc des zones où un canal est saturé alors qu'un ou deux autres ne le sont pas, entraînant une distortion colorimétrique. On peut voir par exemple sur la figure 4.4 qu'une zone turquoise apparaît autour de la zone centrale qui est saturée dans tous les canaux.

D'autre part, une correction grossière de la balance des blancs est appliquée, afin de compenser la plus faible sensibilité des capteurs dans le canal rouge. Ainsi, les valeurs R des pixels sont mutipliées par 1.3. Si l'on ne traite pas les pixels avant cette correction, cela entraîne une



FIGURE 4.5 – Image affectée par une forte coulée verticale, accentuée par l'usure du capteur.

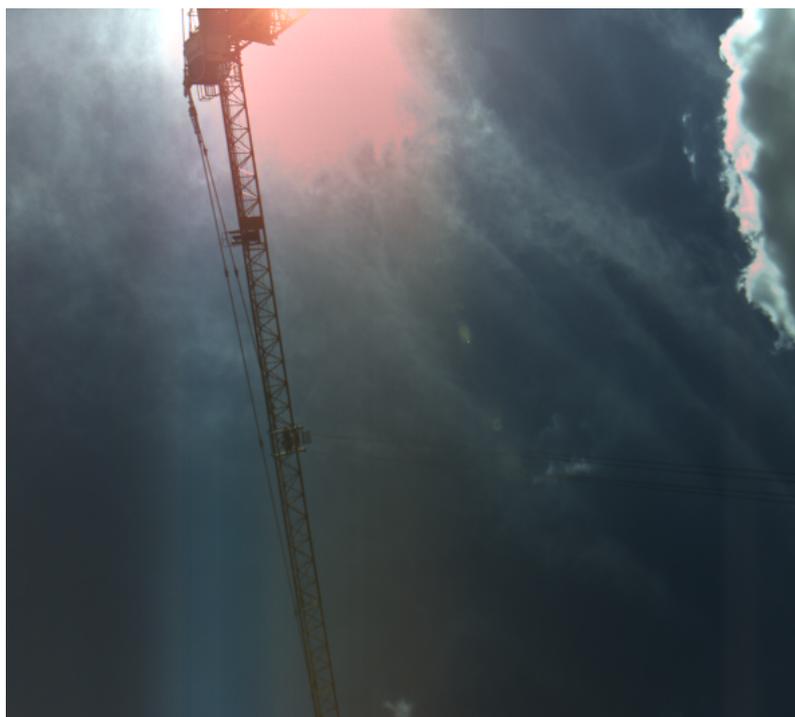


FIGURE 4.6 – Exemple d’artefact rose apparaissant lors d’une correction de flat-field sans traitement préalable des pixels ayant au moins un canal saturé.

déviations vers le rouge dans les zones où les trois canaux sont saturés (cf. figure 4.6).

Pour ces différentes raisons, il est indispensable de détecter les pixels ayant une valeur saturée dans l’image brute en leur affectant la valeur $max_{16 \text{ bits}} = 65535$.

4.4.2 Détection des pixels de ciel

Il est nécessaire de pouvoir détecter les pixels de ciel pour les séparer des pixels imageant la végétation ou les bâtiments.

4.4.2.1 Seuillage sur les valeurs des pixels

Un seuillage sur les valeurs RVB peut être utilisé, les seuils étant fixés manuellement pour chaque campagne d’acquisition. Un compromis doit être fait pour rejeter les pixels des bâtiments clairs fortement illuminés, mais accepter les pixels de nuages. Les seuillages utilisés sont définis comme suit :

$$\frac{R - B}{max_{(R,V,B)} - min_{(R,V,B)}} < c_b \quad \text{et} \quad max_{(R,V,B)} > c_{min} \quad (4.5)$$

avec c_{min} fixé en fonction de la réponse de la caméra ainsi que du codage informatique des valeurs (8, 12, 16 bits).

Les réflexions issues des objets au sol (principalement des voitures) ne sont pas un problème car les pixels situés sous la ligne d’horizon ne sont pas acceptés. Un filtrage morphologique (fermeture) (Serra, 2013) est appliqué sur le masque binaire des pixels détectés comme ciel, afin d’éliminer les fausses détections de petite surface, typiquement sur les façades de bâtiments.

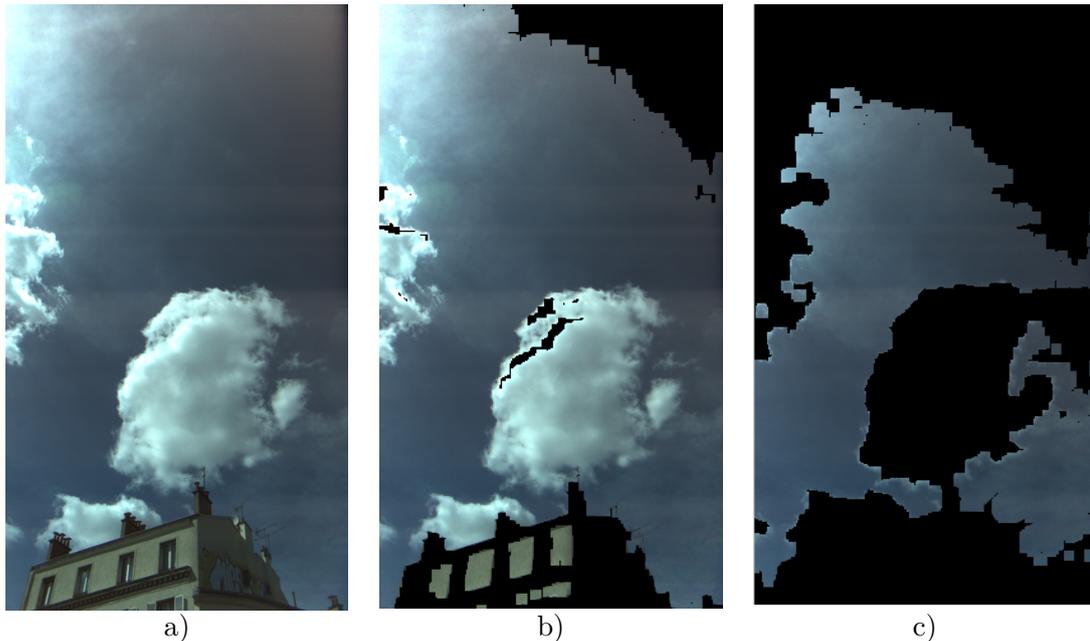


FIGURE 4.7 – Résultats de la détection de ciel (b) et de ciel bleu (c), à partir d'une image Stereopolis (a).

Les principales erreurs de détection restantes se situent au niveau des larges fenêtres et des murs clairs fortement illuminés qui sont situés au-dessus de l'horizon. Les nuages sombres sont également problématiques puisqu'ils ne sont pas détectés comme ciel.

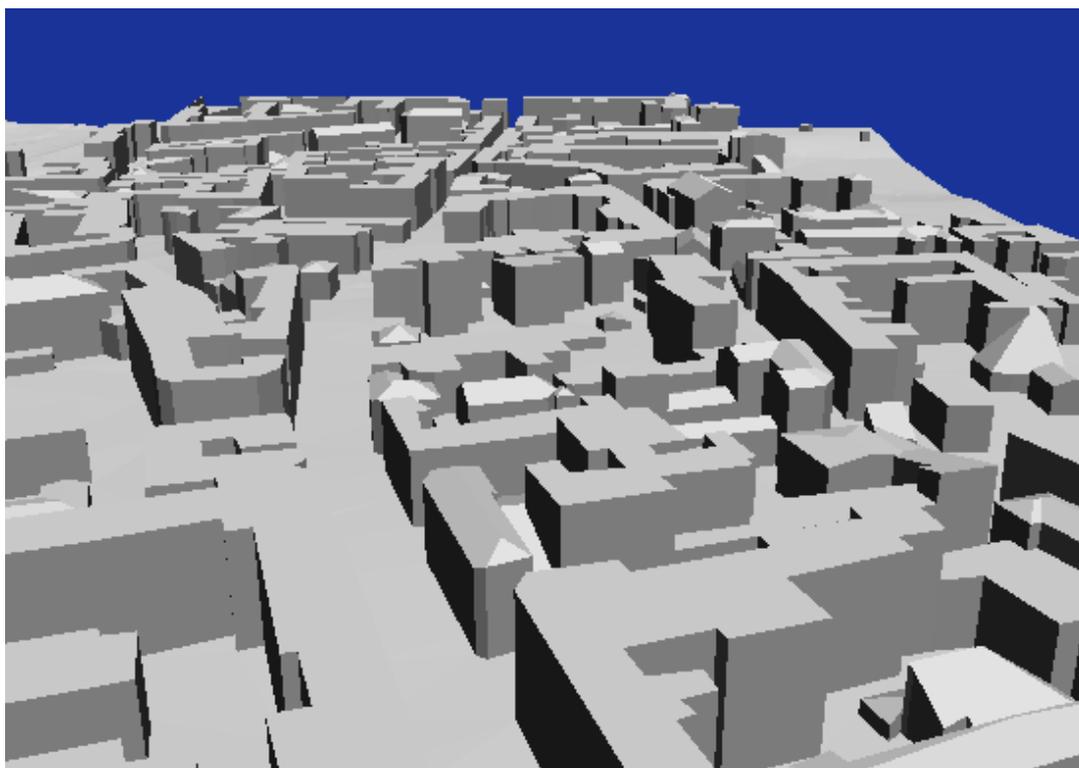
D'autres défauts apparaissent, liés à la qualité des images. Les zones affectées par un effet de *bloom* ou de *flare* sont par exemple très bruitées et leur couleur n'est plus bleutée (cf. figure 4.7).

4.4.2.2 Utilisation d'un modèle 3D

Une autre solution consiste à utiliser un modèle 3D pour déterminer où se trouvent les bâtiments. Ce modèle 3D peut être apporté par une source externe (par exemple BATI-3D[®]), ou bien issu du nuage de points LIDAR (qui peut être acquis en même temps que les images avec Stereopolis).

Pour cela, un masque des pixels de bâtiments est calculé par lancer de rayon depuis le point de vue de l'image pour déterminer s'il y a intersection avec le modèle 3D ou pas. Cela est réalisé grâce à l'outil de simulation d'IRSUTE (cf. la section 3.5), en utilisant une carte d'environnement uniforme de valeur 1 comme source de lumière et en affectant une réflectance nulle aux bâtiments, avec un nombre maximal de réflexions de 1. Ce calcul est simple, donc rapide. Il permet d'obtenir un masque de ciel (booléen égal à 1 dans les zones de ciel, 0 sinon).

Cependant, le traitement des données LIDAR étant complexe, il n'entre pas dans le cadre de cette thèse, et c'est donc un modèle BATI-3D[®] qui a été utilisé. Il s'agit d'un modèle calculé de façon semi-automatique à partir d'images aériennes, ayant un faible niveau de détails (cf. figure 4.8). Les zones sont donc assez grossièrement détectées, et la végétation n'est pas modélisée dans BATI-3D[®]. De plus, les décalages géométriques entre les images géoréférencées et le modèle 3D ont un impact sensible (cf. figure 4.9). Cela permet néanmoins d'éliminer certains bâtiments clairs, et peut être utilisé comme préliminaire à la détection par seuillage sur les valeurs de pixels (cf. figure 4.10).

FIGURE 4.8 – Modèle BATI-3D[®] sur la ville de Saint-Mandé.

4.4.3 Aggrégation des pixels de ciel

L'aggrégation des pixels de ciel issus des différentes images au sein d'une même carte d'environnement se fait par une interpolation bilinéaire des données image. Dans les zones de recouvrement où une direction (θ, ϕ) est vue par plusieurs images, on réalise une moyenne des valeurs issues des différentes images ; cela n'est valable que pour des images acquises dans un court intervalle de temps (c'est problématique notamment quand les nuages se déplacent rapidement).

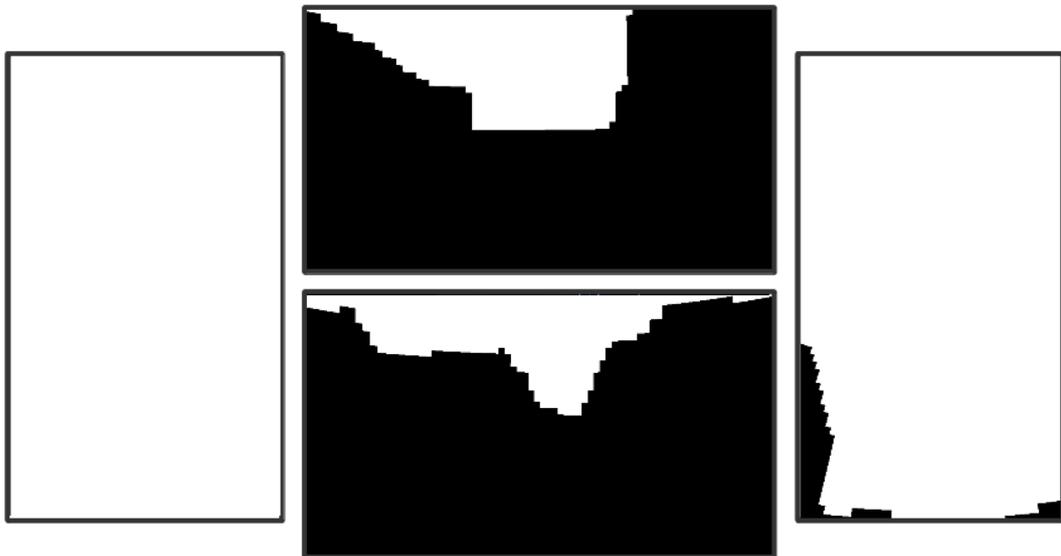
On obtient des artefacts visuels dans la carte d'environnement, du fait de l'imprécision de la mesure radiométrique et de la correction radiométrique (cf. la section 4.4.1.1). On voit ainsi des discontinuités au niveau des lignes de découpe séparant les zones de pixels issus de différentes images (voir par exemple l'image du haut sur la figure 4.13).

Il y a de plus des zones sans information, dans les directions pour lesquelles le ciel n'est pas visible ou non détecté comme ciel. Notamment, pour les fort angles zénithaux, le ciel est souvent masqué par les bâtiments. Pour limiter ce manque d'information, on utilise les images acquises lorsque le véhicule franchit un carrefour, ce qui permet d'avoir moins de masquage que dans un canyon urbain. Les trous restants sont remplis en interpolant les données extraites, ce qui mène à des artefacts visuels et une qualité radiométrique médiocre de la carte d'environnement (cf. figure 4.13). Néanmoins, la luminance issue de la zone du ciel proche de l'horizon n'a qu'une faible influence sur l'éclairage des objets de la scène.

Les discontinuités pourraient être atténuées par des techniques de traitement d'images telles que le *blending* (Levin et al., 2004). Cependant, cela conduit à une modification de la radiométrie des pixels qui n'améliore pas sa précision mais change uniquement son aspect visuel ; il est donc préférable ici de conserver une valeur liée à la mesure faite par la caméra, même si celle-ci est imprécise.

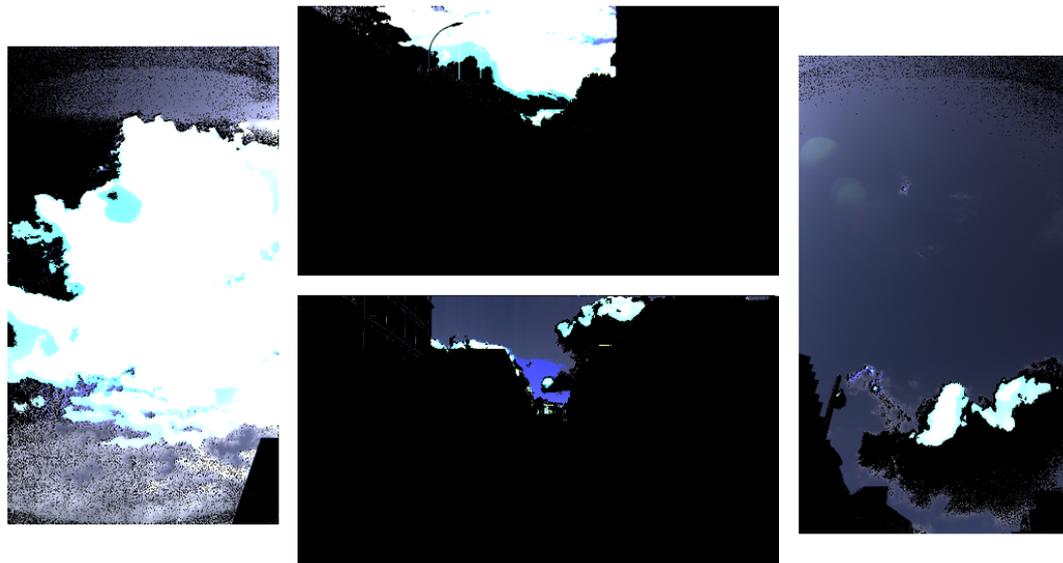


Images originales

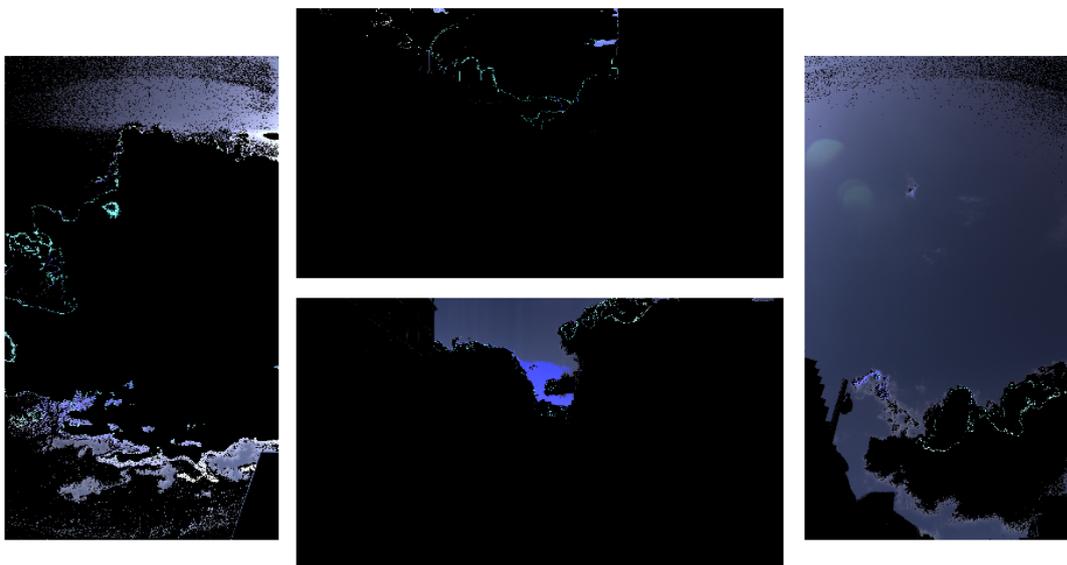


Masque calculé avec le modèle 3D

FIGURE 4.9 – Résultats de la détection de ciel par utilisation d'un modèle BATI-3D®, avec 4 images de la tête panoramique.



Pixels de ciel



Pixels de ciel bleu

FIGURE 4.10 – Résultats de la détection de ciel par seuillages en utilisant le masque calculé avec le modèle BATI-3D® (cf. figure 4.9) .

4.4.4 Estimation d'un modèle paramétrique

Une autre possibilité pour générer la carte d'environnement à partir des pixels de ciel extraits est d'utiliser un modèle paramétrique de ciel. Le modèle le plus utilisé est le modèle de [Perez et al. \(1993\)](#), qui utilise un paramètre L_z représentant la luminance au zénith, plus 5 paramètres a, b, c, d, e qui décrivent les variations de la luminance par une fonction analytique (on trouvera une interprétation de ces paramètres dans [Chain \(2004\)](#)). Ce modèle est cependant limité à la description des phénomènes de basse fréquence spatiale, et donc aux ciels bleus ou couverts de façon homogène, sans nuages isolés. Les acquisitions étant réalisées dans des conditions de beau temps, on utilise donc uniquement les pixels de ciel bleu pour l'estimation des paramètres de ce modèle. Ces pixels de ciel bleu sont extraits à l'aide des seuils de teinte et de saturation (espace colorimétrique HSV) proposés par [Schmitt and Priebe \(2009\)](#) :

$$190^\circ < teinte < 240^\circ \quad \text{et} \quad saturation > 0.2 \quad (4.6)$$

L'estimation des 6 paramètres du modèle de Perez se fait par moindres carrés non linéaires, et donne de bons résultats si les pixels extraits sont répartis de façon suffisamment homogène dans l'hémisphère céleste. Les résultats sont notamment affectés par les défauts radiométriques mentionnés à la section [4.4.1.1](#). Le flou lumineux autour du halo solaire mène notamment à une surestimation de la luminance par le modèle estimé (cf. figure [4.13](#)) .

4.4.5 Utilisation du modèle paramétrique pour correction de la carte d'environnement

Afin de réduire l'importance des effets radiométriques, on se propose d'utiliser un terme de correction basé sur le modèle de Perez estimé à partir des pixels de ciel bleu. Pour cela, on sélectionne les images prises alors que le soleil n'est pas situé dans l'hémisphère devant la caméra. En effet, ce sont des images qui ne sont a priori pas affectées par les phénomènes décrits dans la section [4.4.1.1](#), car ne subissant pas de réflexions parasites liées à la présence du soleil en bord de champ, et voyant moins de zones très lumineuses.

On estime les paramètres du modèle de Perez avec ces seules images « fiables ». Puis, pour chaque image « peu fiable », on fait la différence $D_{Perez \text{ fiable-ciel bleu}}$ entre les pixels de ciel bleu et les valeurs du modèle de Perez, et ce indépendamment pour chaque canal. Cette différence est difficilement modélisable par un modèle analytique, du fait de la complexité de la modélisation des artefacts radiométriques (cf. figure [4.11](#)) . De plus, le modèle de Perez n'est pas estimé à partir de mesures réparties sur tout l'hémisphère céleste en raison du choix des images « fiables », et il est inadapté à la modélisation d'un voile hétérogène qui peut être présent au moment de l'acquisition.

A défaut de pouvoir modéliser plus finement, on suppose donc que les artefacts affectant les images « peu fiables » sont modélisables par un voile homogène sur chaque image. On estime donc une correction additive par canal et par image comme la moyenne de l'image différence $D_{Perez \text{ fiable-ciel bleu}}$.

L'algorithme complet est récapitulé sur la figure [4.12](#).

4.4.6 Résultats

Un exemple de carte d'environnement calculée à partir de 13 images, issues d'une acquisition sur la ville de Vincennes, est présenté sur la figure [4.13](#). Le modèle de Perez est calculé avec seulement 7 images « fiables ». Les corrections additives estimées grâce au modèle de Perez atténuent légèrement les discontinuités liées au mosaïquage, principalement par une correction de la valeur du canal rouge qui est le plus affecté par les artefacts décrits à la section [4.4.1.1](#).

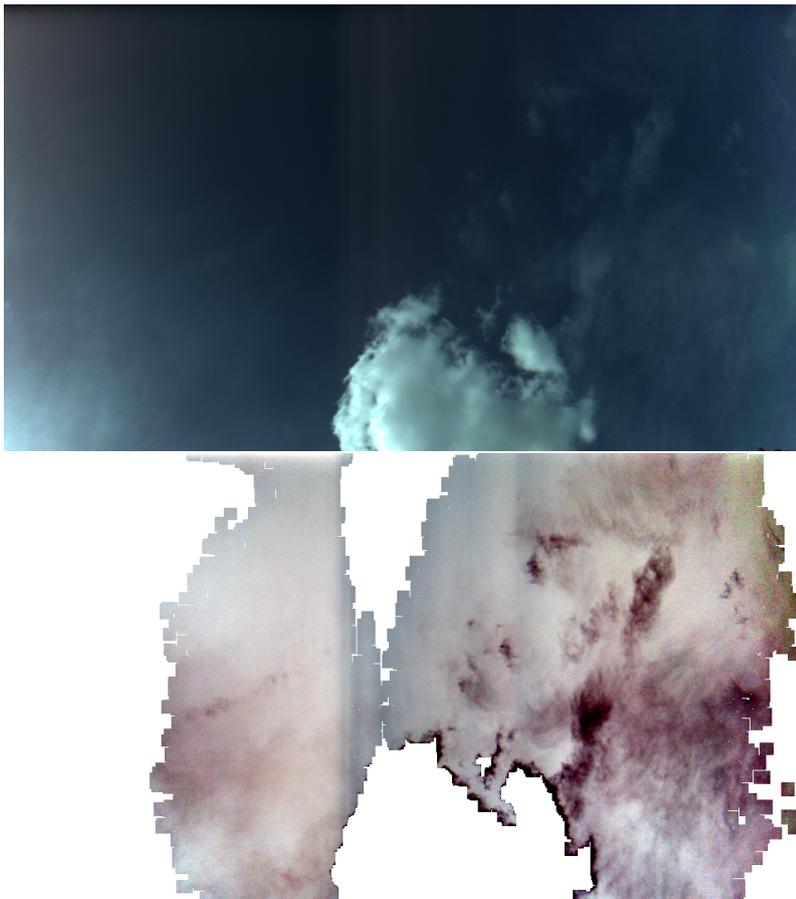


FIGURE 4.11 – Image originale (en haut) et différence $D_{Perez\ faible-ciel\ bleu}$ entre le modèle de Perez estimé et les pixels détectés comme ciel bleu. Un faible voile nuageux est mis en évidence. Les zones blanches homogènes sont celles où il n’y a pas de pixels de ciel bleu détectés. Les paramètres d’affichage sont choisis pour optimiser le contraste visuel.

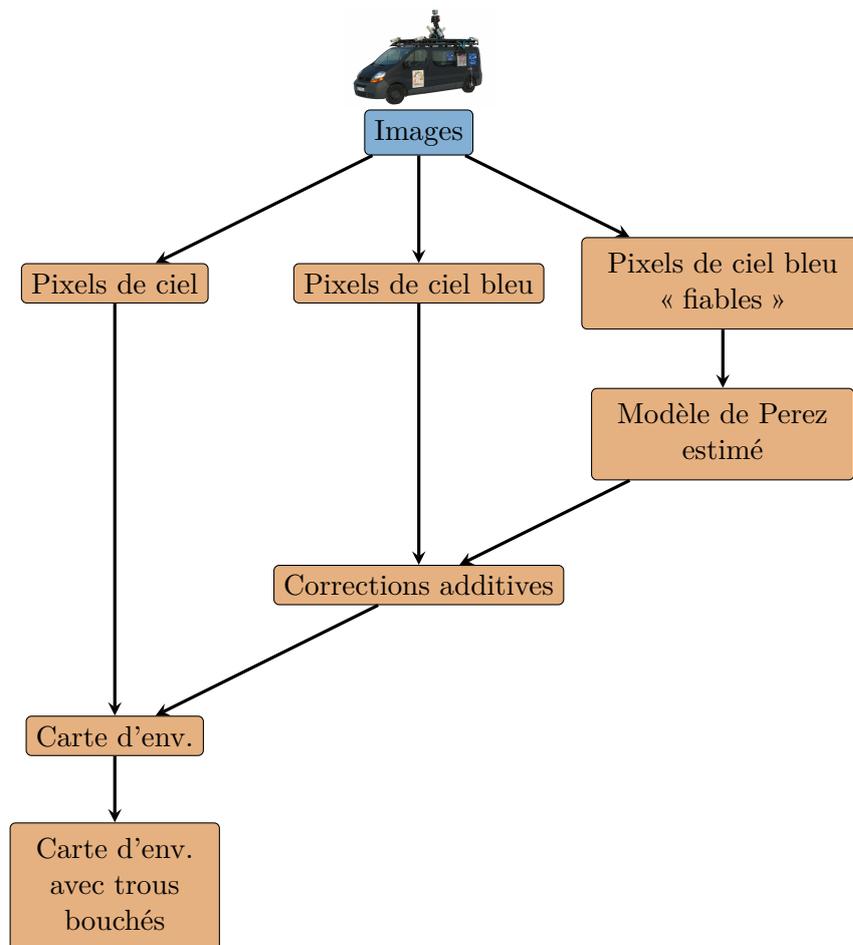


FIGURE 4.12 – Les étapes de la méthode d'estimation de l'illumination céleste.



a) Aggrégation simple des pixels de ciel



b) Modèle de Perez estimé



c) Aggrégation des pixels après correction additive par image (cf. la section 4.4.5)



d) Différence entre les cartes d'environnement a) et c)

FIGURE 4.13 – Cartes d'environnement extraites des images. La déviation vers le rouge des artefacts est visible sur l'image différence d).

Si le modèle de Perez donne une carte d'environnement visuellement plus « jolie », il ne prend pas en compte l'effet des nuages, et est donc moins précis pour la simulation de la lumière. Il s'agit d'une limite intrinsèque à ce modèle, d'autant plus sensible sur ce jeu d'images, pour lesquelles le soleil lui-même est masqué par un nuage.

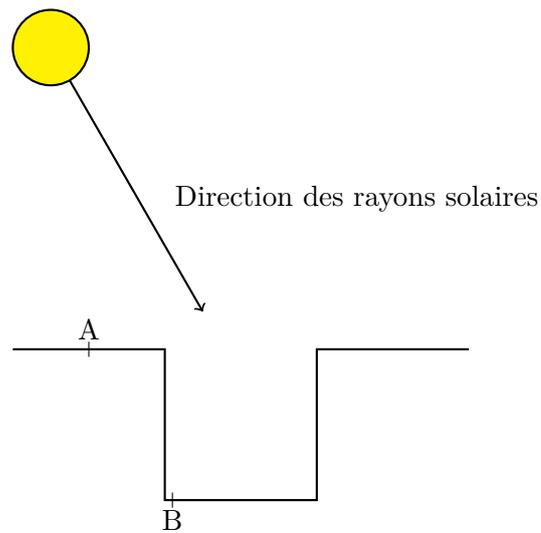
On ne dispose pas d'une vérité terrain permettant de déterminer la précision absolue de la luminance descendante obtenue. Cependant, les imprécisions de la carte d'environnement n'ont pas nécessairement un impact très fort sur l'éclairement total au sol (cf. la section 4.4.7)

4.4.7 Influence de la carte d'environnement sur la simulation

L'estimation de l'illumination présentée ici a pour but de fournir une entrée nécessaire pour la simulation d'images (cf. la section 3.5), celle-ci servant à la résolution du problème inverse que représente l'estimation de la réflectance des matériaux de la scène (voir le chapitre suivant 5). Il est donc intéressant de connaître l'influence numérique des erreurs de la carte d'environnement sur l'éclairement simulé.

Pour cela, on compare l'éclairement simulé sur une scène urbaine simple (un canyon urbain (cf. figure 4.14)) en utilisant les différentes cartes d'environnement estimées à la section précédente 4.4.6 (cf. figure 4.13), avec l'outil de simulation d'IRSUTE (cf. la section 3.5). L'éclairement est simulé ici pour le canal rouge, avec un nombre maximal de réflexions de 2. On compare les éclairagements pour un point au soleil (A) et un point à l'ombre (B).

Le modèle de Perez estimé ici sous-estime la lumière diffusée par le ciel, car il ne prend pas en compte les nuages, qui sont plus lumineux que le ciel sur les images. Cela entraîne une sous-estimation de 20% par rapport à la carte d'environnement par agrégation de tous les pixels de ciel. Cette erreur sur la luminance descendante du ciel a le plus fort impact pour les points à l'ombre, pour lesquels la luminance du ciel peut être la composante principale du signal lumineux (cf. la section 2.3.4), avec un ordre de grandeur similaire à celui de l'éclairement réfléchi. L'impact des erreurs de la carte d'environnement sur l'éclairement total au sol est donc dans notre cas inférieur à 10%.



Carte d'environnement	$E_{ciel}(A)$	$E_{ciel}(B)$
Aggrégation simple	1512 W.m ⁻²	878 W.m ⁻²
Modèle de Perez	1230 W.m ⁻²	722 W.m ⁻²
Aggrégation après correction	1558 W.m ⁻²	896 W.m ⁻²

FIGURE 4.14 – Comparaison de l'éclairage simulé avec différentes cartes d'environnement.

4.5 Conclusion

L'estimation de l'illumination à partir des images présente plusieurs avantages : pas besoin de mesures atmosphériques ni de l'étalonnage absolu de la caméra, estimation possible quelles que soient les conditions météorologiques.

L'estimation de l'éclairage solaire par une méthode ombre/soleil est possible, mais les résultats dépendent fortement de la qualité radiométrique des images.

L'estimation de la luminance du ciel est compliquée par les forts masquages du ciel dans les images urbaines, qui nécessitent d'utiliser plusieurs panoramiques pour estimer une carte d'environnement complète ; cela pose le problème de la variabilité temporelle du ciel entre les images. Cependant, l'influence de petites erreurs sur les valeurs de la carte d'environnement reste faible sur la luminance totale estimée au niveau du capteur.

Méthode d'estimation des réflectances

5.1 Introduction

5.1.1 Problématique

Le but est de retrouver la réflectance des matériaux d'une scène urbaine, à partir d'images terrestres à haute résolution.

Pour cela, on considère que l'on dispose d'un modèle 3D, dont chaque facette se voit affecter un type de matériau. L'obtention d'un tel modèle est traitée dans des travaux antérieurs du laboratoire MATIS (voir par exemple [Lafarge \(2007\)](#) pour la reconstruction des bâtiments à partir d'images aériennes, [Pénard \(2009\)](#) pour la reconstruction de façades détaillées à partir d'images terrestres, ou [Burochin \(2012\)](#) pour l'utilisation conjointe laser/images).

On suppose également que l'on connaît l'illumination, c'est-à-dire la géométrie et l'intensité des sources de lumière éclairant la scène (voir le chapitre précédent 4).

Estimer la réflectance, c'est traiter le signal image pour s'affranchir de l'illumination et ne garder que l'information issue des matériaux. La réflectance des matériaux est décrite par un ou plusieurs modèles de BRDF, dont on cherche à estimer les paramètres, formant un ensemble \mathbf{p} . Cette estimation se fait par minimisation de l'écart entre les images simulées à partir du modèle 3D et les images réelles acquises (cf. figure 5.3).

5.1.2 État de l'art

L'estimation des réflectances à partir d'images est traitée en informatique graphique par les techniques de rendu inverse (*inverse rendering*) : [Patow and Pueyo \(2003\)](#) ou [Marschner \(1998\)](#) proposent un état de l'art de ces techniques, qui peuvent traiter différents problèmes :

- l'estimation de la réflectance pour une illumination connue (parfois nommée *inverse reflectometry*). Par exemple, [Machida et al. \(2007\)](#) utilisent un éclairage contrôlé, [Yu et al. \(1999\)](#) utilisent des images multi-vues avec une illumination connue mais non modifiable, [Boivin and Gagalowicz \(2001\)](#) utilisent une seule image et une illumination connue.
- l'estimation de l'illumination alors que les propriétés de réflectance sont connues (*inverse lighting*) : il s'agit plutôt d'utiliser les images d'objets éclairés ([Marschner, 1998](#)), ([Loscos et al., 1999](#)), les techniques mesurant directement l'illumination n'étant pas à proprement parler des techniques inverses (par exemple avec une caméra *fish-eye* ([Stumpfel et al., 2004](#)) ou avec une sphère miroir ([Miller and Hoffman, 1984](#))).

- l'estimation conjointe de l'illumination et de la réflectance. Debevec (1998) utilise une sphère miroir pour acquérir une carte d'environnement puis la réflectance, afin d'insérer de façon réaliste des objets dans une scène. Ramamoorthi and Hanrahan (2001) et Ramamoorthi and Hanrahan (2004) abordent ce problème d'un point de vue théorique, en montrant que les problèmes de rendu inverse est une déconvolution dans le cas d'un objet lambertien convexe avec une illumination venant de l'infini, et utilisent la décomposition en harmoniques sphériques pour déduire des conditions quant au caractère bien posé du problème. Yu et al. (2006) utilisent des images multi-vues de l'objet à traiter bien réparties dans l'espace, estimant l'illumination grâce aux réflexions spéculaires visibles. Romeiro and Zickler (2010) utilisent une approche probabiliste (inférence bayésienne) en modélisant la carte d'environnement sous forme d'ondelettes, pour estimer BRDF et illumination à partir d'une seule image, pour un objet simple et sans prendre en compte les réflexions multiples.

La modélisation même de la réflectance pour réaliser cette inversion est délicate. On souhaite généralement un modèle paramétrique suffisamment simple pour permettre son estimation à partir de mesures, tout en assurant sa bonne description du comportement réel des matériaux, notamment pour les angles rasants (cf. figure 1.4). Les modèles analytiques de Cook and Torrance (1981), Torrance and Sparrow (1967), Oren and Nayar (1995), qui sont relativement simples, sont largement employés pour la simulation réaliste. Des modèles tels celui de Lafortune et al. (1997) ou Duer (2004) s'attachent à prendre en compte le comportement aux angles rasants. De plus, l'inversion du modèle radiométrique sera d'autant facilitée par la simplicité, voire la linéarité du modèle de BRDF par rapport à ses propres paramètres. Un état de l'art de la décomposition de la BRDF dans des bases de fonctions adaptées est donné par Rusinkiewicz (1997). Plus récemment, une linéarisation par rapport aux paramètres de modèles de BRDF connus a également été proposée par Ozturk et al. (2008).

5.2 Cas simple : scène lambertienne, illumination connue

Pour illustrer la problématique, on présente ici la résolution d'un cas simple.

5.2.1 Inversion explicite

On suppose que la scène est composée de surfaces opaques faites d'un matériau lambertien, éclairée par des sources de lumière connues. On néglige les effets radiatifs de l'atmosphère au sein de la scène ($L_{parasite} = 0$, pas d'atténuation sur le trajet cible-caméra); cf. le paragraphe 3.5.3.2 pour une justification. Soit un point $M(i)$ vu par un pixel i , de réflectance lambertienne $\rho(M(i))$, recevant l'éclairement total $E(M(i))$. La luminance directe au niveau du capteur s'exprime alors :

$$L_{direct}(i) = \frac{\rho(M(i))}{\pi} \cdot E(M(i)) \cdot T^\uparrow(i) \quad (5.1)$$

La réflectance peut donc être facilement calculée par simple division :

$$\rho(M(i)) = \frac{\pi \cdot L_{direct}(i)}{E(M(i))} \quad (5.2)$$

Il n'y a donc pas besoin de conserver la « mémoire » des directions d'incidence des différentes contributions ayant formé l'éclairement total $E(M(i))$, de par l'effet moyennneur du matériau lambertien.

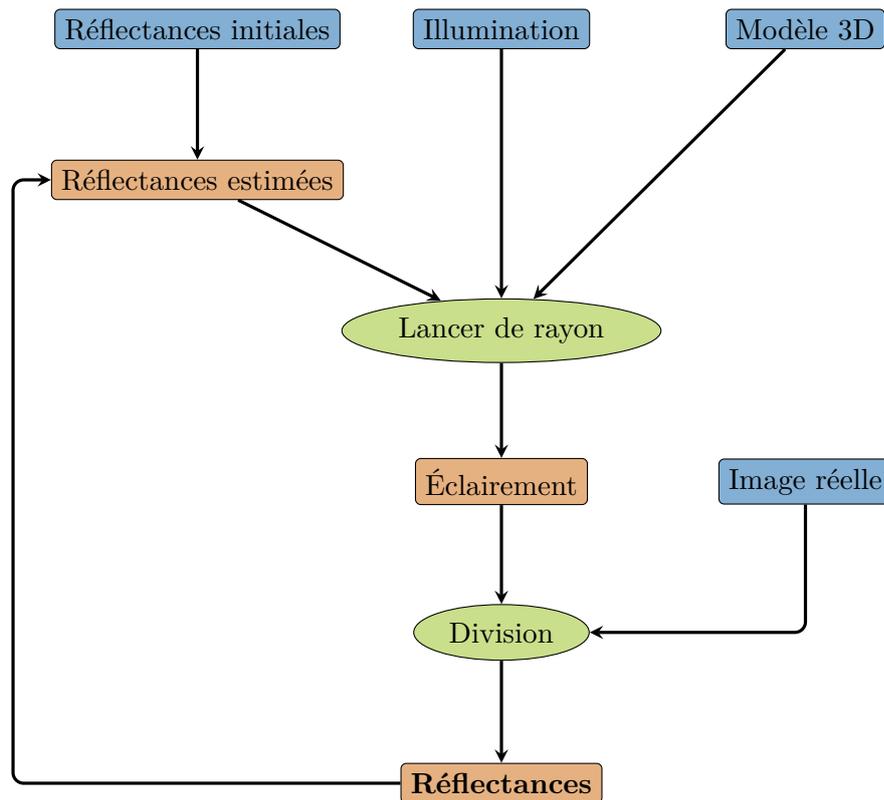


FIGURE 5.1 – Algorithme d’inversion pour une scène lambertienne.

Cependant, l’éclairage total $E(M(i))$ contient des termes réfléchis, qui nécessitent la connaissance des réflectances des matériaux de l’environnement, qui sont justement les inconnues. On utilise donc un algorithme itératif utilisant des valeurs initiales arbitraires pour les réflectances, qui sont ensuite mises à jour à chaque itération, jusqu’à convergence (cf. figure 5.1).

5.2.2 Exemple sur une scène synthétique

On considère une scène synthétique de carrefour en milieu urbain. On utilise l’outil présenté dans le chapitre 3 pour simuler une image de luminance capteur avec les valeurs « vraies » pour les albédos (correspondant à ce qu’obtiendrait une caméra), et une image d’éclairage au sol à chaque itération, avec les valeurs courantes des albédos (initialisées à 0.5).

La division pixel à pixel de ces images selon l’équation (5.2) permet d’obtenir une image des albédos de la scène (cf. figure 5.2), avec une convergence rapide (3 itérations dans notre cas). On s’affranchit ainsi de l’illumination pour obtenir une information intrinsèque sur les matériaux.

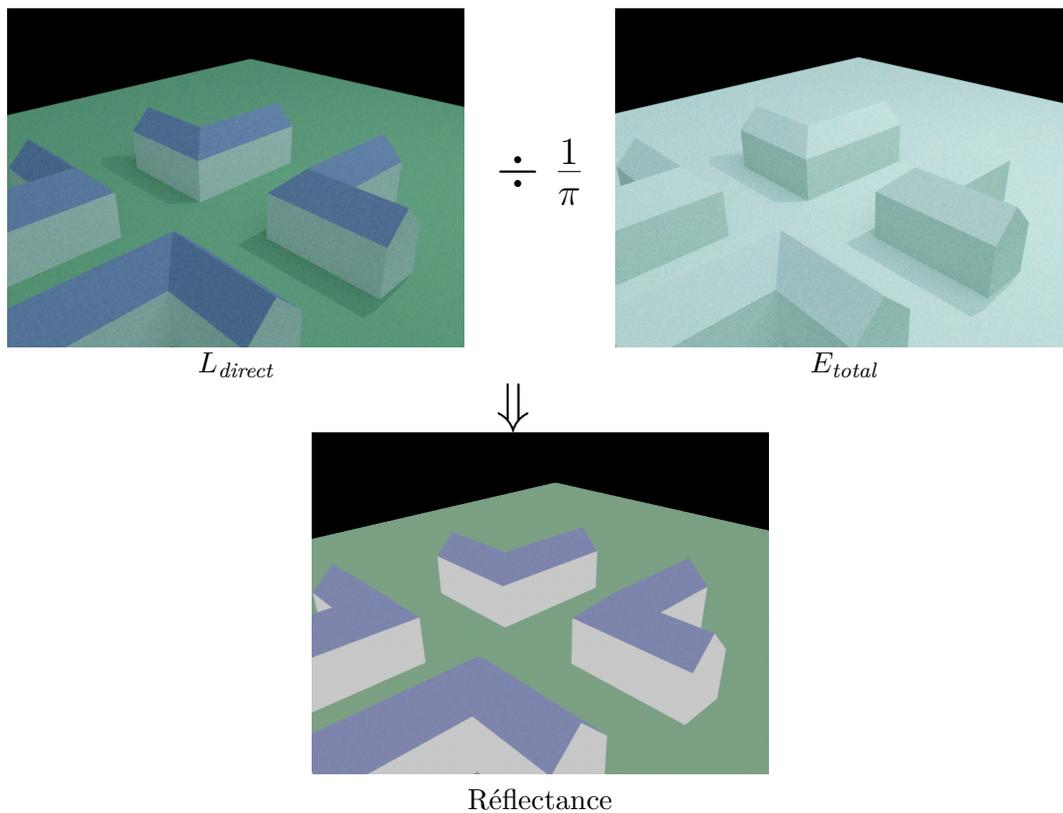


FIGURE 5.2 – Inversion sur une scène synthétique lambertienne.

5.3 Lancer de rayon formel

5.3.1 Principe et intérêt

L'image simulée utilisée pour la minimisation est calculée pour un jeu donné de paramètres de BRDF des matériaux. Ce jeu de paramètres est défini avant le lancer de rayon, et change à chaque itération du processus de minimisation. Cela nécessite donc de refaire le lancer de rayon, calcul très coûteux en temps, à chaque itération (cf. figure 5.3).

Pour s'affranchir de ce problème, on peut réaliser le lancer de rayon de façon formelle (ou symbolique) et non plus numérique. Cela consiste à stocker la luminance de chaque pixel non plus sous forme d'une valeur numérique, mais sous forme d'une fonction des paramètres de BRDF des matériaux, sans évaluation de ces paramètres (cf. figure 5.4).

5.3.2 Expression de la luminance formelle

On a, pour chaque pixel (i,j) :

$$L(i,j) = f_{i,j}(\mathbf{p}) \quad (5.3)$$

où $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_M)$ sont les M paramètres de réflectance des matériaux de la scène, et les $f_{i,j}$ des fonctions calculées par le lancer de rayon formel. La complexité de chaque fonction luminance $f_{i,j}$ dépend de la complexité du modèle paramétrique de BRDF utilisé, et de la géométrie de la scène. Mais elle dépend également du nombre de réflexions autorisées pour chaque contribution, qui peut être choisi par l'utilisateur. En effet, la luminance portée par une contribution décroît avec la longueur de son trajet (multiplication par des grandeurs plus

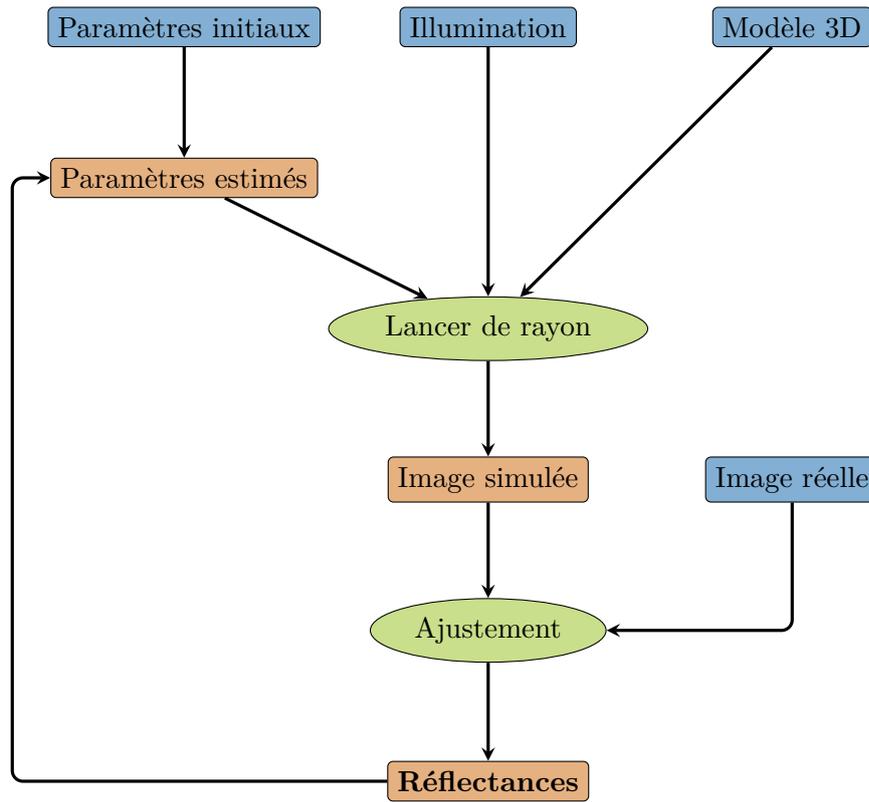


FIGURE 5.3 – Algorithme d'inversion avec un lancer de rayon numérique.

petites que 1 : la transmission, la réflectance, l'atténuation géométrique). Les termes réfléchis d'ordre supérieur à un certain entier N sont donc négligés ; Lachéradé et al. (2008) montre que les réflexions au-delà des réflexions doubles sont négligeables, ce qui mène donc à choisir $N = 3$.

5.3.2.1 Exemple : cas lambertien

On considère une scène possédant M matériaux lambertiens, d'albédos $\rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M\}$. Le nombre maximum de réflexions autorisées pendant le rendu est N .

La contribution représentée sur la figure 5.5 porte la luminance :

$$L(\rho, C) = \rho_2 \cdot \rho_1^2 \cdot G \cdot T \cdot I \quad (5.4)$$

où G est le facteur d'atténuation géométrique, T est la transmission, et I est l'éclairement de la source atteinte par le dernier rayon.

Plus généralement, chaque contribution C a pour valeur de luminance un produit d'albédos pondéré par un coefficient α dépendant de la géométrie de la scène, des sources de lumière, et de la transmission du milieu :

$$L(\rho, C) = \alpha \prod_{k=1}^{\dim(\rho)} \rho_k^{e_k} \quad , \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \alpha \in \mathbb{R}, & e_k \in \mathbb{N} \\ \sum_k e_k \leq N_{max} \end{cases} \quad (5.5)$$

La luminance d'un pixel (i, j) est la somme de Monte-Carlo de plusieurs contributions (voir l'équation (3.9)). Elle s'exprime donc comme un polynôme multivarié à M indéterminées (les

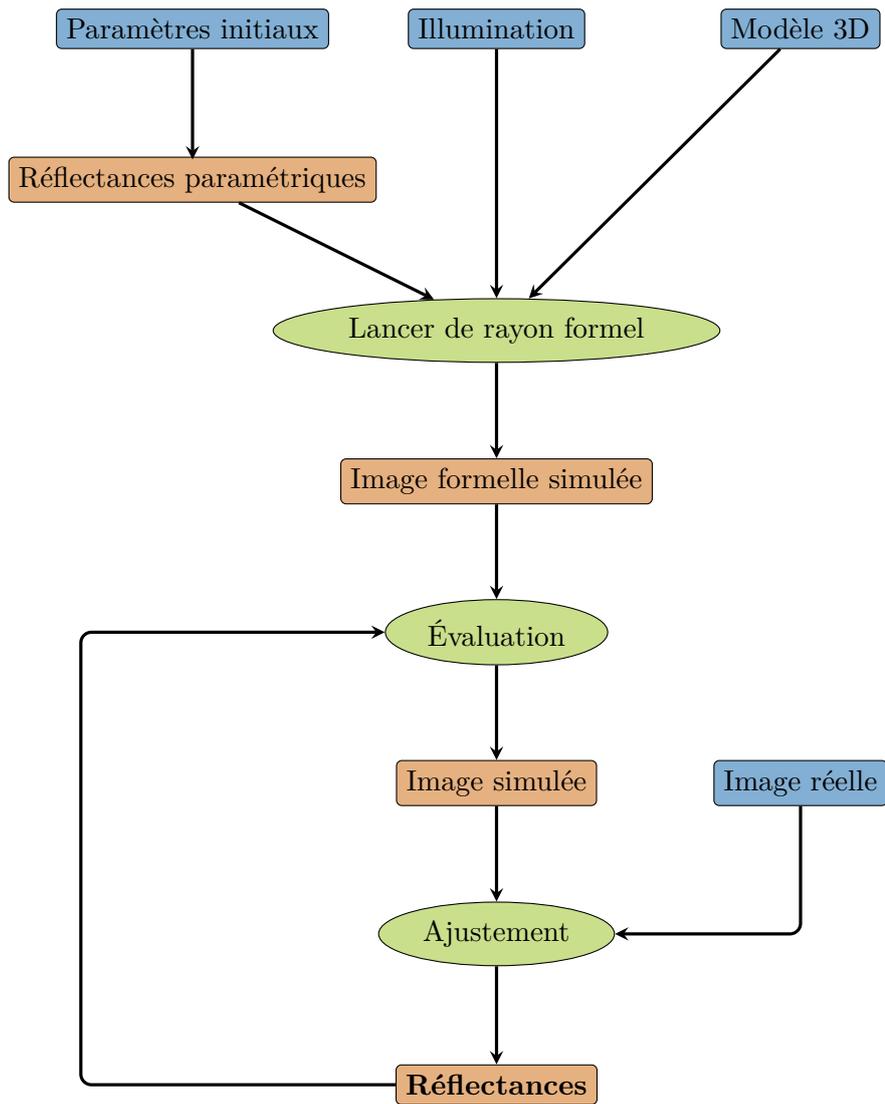


FIGURE 5.4 – Algorithme d'inversion avec un lancer de rayons formel.

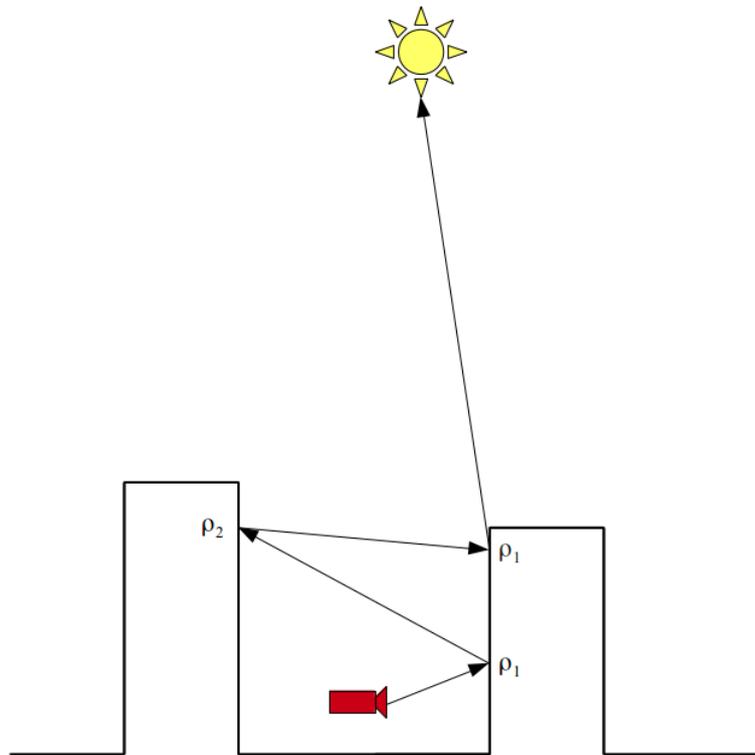


FIGURE 5.5 – Exemple de lancer de rayon sur une scène lambertienne

ρ_k).

$$L(\rho) = \sum_n \beta_n \cdot L(\rho, C_n) = \sum_n \gamma_n \prod_{k=1}^{\dim(\rho)} \rho_k^{e_{k,n}} \quad (5.6)$$

où $\gamma_n = \beta_n \cdot \alpha_n$. Les coefficients numériques γ_n de ces fonctions sont calculés par le lancer de rayon formel, et dépendent de l'atténuation géométrique et de la probabilité des différentes contributions ayant contribué au pixel. Ils dépendent donc de la configuration de l'acquisition, de la géométrie de la scène, des sources de lumière (i.e. des conditions météorologiques pour les scènes extérieures), mais pas des matériaux eux-mêmes.

5.3.3 Complexité et stockage

L'étude de la complexité de l'expression formelle de la luminance d'un pixel est importante pour comprendre la complexité du calcul.

5.3.3.1 Cas lambertien

On reprend le même cas qu'en 5.3.2.1. Le nombre de termes maximal de ce polynôme est le nombre de combinaisons possibles pour le produit d'albédos porté par une contribution. Ce produit peut avoir k facteurs, avec k entre 0 et N . Ces facteurs sont pris avec répétition éventuelle dans l'ensemble $\rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M\}$. Il s'agit donc d'une combinaison non ordonnée avec répétition, aussi nommée k-combinaison. Le nombre de k-combinaisons de M éléments est le coefficient binomial $\binom{M+k-1}{k}$, noté Γ_M^k .

Le nombre maximal de termes pour l'expression formelle de la luminance d'un pixel est donc :

$$Nb_{termes/pixel}(N, M) = \sum_{k=0}^N \Gamma_M^k = \sum_{k=0}^N \binom{M+k-1}{k} \quad (5.7)$$

Cette expression se simplifie par la considération suivante : le produit de $k < N$ termes est égal au produit de k termes multiplié $N - k$ fois par 1. D'où :

$$Nb_{termes/pixel}(N, M) = \binom{M+N}{N} \quad (5.8)$$

Ce nombre grandit rapidement avec N et M , mais reste fini ; le tableau 5.1 donne quelques exemples numériques. On remarque que ce tableau est symétrique, i.e. $Nb_{termes/pixel}(N, M) = Nb_{termes/pixel}(M, N)$. En effet :

$$\binom{M+N}{N} = \frac{(M+N)!}{N!(M+N-N)!} = \frac{(M+N)!}{N!M!} = \frac{(M+N)!}{(N+M-M)!M!} = \binom{M+N}{M} \quad (5.9)$$

5.3.3.2 Cas d'un modèle paramétrique de BRDF

Dans le cas général d'un modèle paramétrique, l'expression formelle de la luminance n'est pas nécessairement un polynôme multivarié dont les variables sont les paramètres. Les modèles les plus couramment utilisés, comme les modèles de [Torrance and Sparrow \(1967\)](#) ou [Ward \(1992\)](#), utilisés par [Machida et al. \(2007\)](#) et [Yu et al. \(1999\)](#), ne sont pas linéaires par rapport à leurs paramètres, car ils contiennent l'exponentielle d'un terme contenant à la fois un paramètre du modèle et des valeurs dépendant de la géométrie. Il n'est donc pas possible avec ces modèles de factoriser les termes au cours de l'addition des contributions ; le nombre de termes

M \ N	1	2	3	4	5	10
1	2	3	4	5	6	11
2	3	6	10	15	21	66
3	4	10	20	35	56	286
4	5	15	35	70	126	1001
5	6	21	56	126	252	3003
10	11	66	286	1001	3003	184756
20	21	231	1771	10626	53130	30045015

TABLE 5.1 – Nombre de termes maximal pour exprimer la luminance d’un pixel, dans le cas lambertien

est strictement croissant avec le temps de rendu, et n’est pas borné. La taille demandée en mémoire par la luminance formelle n’est donc pas bornée, ce qui pose un problème pratique : il faut trouver un compromis entre limitation du bruit stochastique dû à l’intégration de Monte-Carlo et temps de calcul raisonnable dans la manipulation des expressions formelles. Cependant, des modèles linéaires simples existent, comme par exemple ceux de [Walthall et al. \(1985\)](#) et [Pickup et al. \(1995\)](#). Même s’ils ne reflètent qu’imparfaitement le comportement physique des matériaux, leur apport pourrait néanmoins être étudié, notamment en les confrontant à des mesures de BRDF de matériaux urbains réels pour estimer leur écart à la réalité.

5.3.3.3 Modèles de BRDF à noyaux

Pour les matériaux réels, l’hypothèse lambertienne n’est pas valide ; il est donc nécessaire de pouvoir utiliser des modèles plus réalistes. Cela pose néanmoins un problème pratique lors du lancer de rayon formel, comme souligné dans la partie 5.3.3. Pour avoir une taille nécessaire en mémoire pour le stockage des fonctions formelles de luminance qui soit bornée, il suffit que le modèle soit une combinaison linéaire de noyaux non paramétrés. On appelle ici noyau une fonction simple, non paramétrée, décrivant un mode du comportement possible du matériau (par exemple mode rétro-spéculaire, diffus ou spéculaire) ; la somme de plusieurs noyaux permet d’approcher le comportement réfléchissant complet du matériau.

$$brdf(P, \vec{\omega}_{in}, \vec{\omega}_{out}) = \sum_k \rho_i^P \cdot f_k^P(P, \vec{\omega}_{in}, \vec{\omega}_{out}) \quad (5.10)$$

Quelques exemples de modèles BRDF à noyaux :

- modèle lambertien :

$$brdf(\omega_0, \omega_i) = \frac{\rho_d}{\pi} ;$$
- modèle lambertien avec un pic parfaitement spéculaire :

$$brdf(\omega_0, \omega_i) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \cdot \delta_{unit(\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_i) = \vec{n}_P} ;$$
- modèle lambertien avec des lobes gaussiens de largeur fixe :

$$brdf(\omega_0, \omega_i) = \frac{\rho_d}{\pi} + \sum \rho_s^n \cdot \mathcal{N}(\xi^n, \sigma_n).$$

Il s’agit alors de trouver un modèle qui soit physiquement réaliste, mais qui soit suffisamment simple pour être exprimé sous forme d’une combinaison linéaire de noyaux ; cela nécessitera l’utilisation de mesures de BRDF.

On considère dans la suite que l’on utilise un modèle de BRDF à noyaux. L’ensemble des M paramètres de réflectance de la scène est $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_M)$. La luminance formelle peut donc

M \ N	1	2	3	4	5	10
1	1.50	1.67	1.75	1.80	1.83	1.91
2	2.00	2.50	2.80	3.00	3.14	3.50
3	2.50	3.50	4.20	4.71	5.11	6.19
4	3.00	4.67	6.00	7.07	7.94	10.62
5	3.50	6.00	8.25	10.21	11.92	17.69
10	6.00	15.17	28.00	43.71	61.52	162.62
20	11.00	46.00	130.00	292.50	565.50	4588.00

TABLE 5.2 – Nombre de pixels au-delà duquel le stockage des images formelles complètes est plus volumineux que le stockage de la fonction coût

se mettre sous la forme d'un polynôme multivarié en \mathbf{p} , de la même façon que pour le cas lambertien (cf. 5.3.2.1).

5.3.3.4 Nombre de termes de la fonction coût

La fonction coût est la différence en norme L^p entre l'image formelle simulée et l'image réelle, soit :

$$\epsilon = \left(\sum_{\text{image } j} \sum_{\text{pixel } i} [L_{\text{capteur}}^{\text{simulée}}(i, j, \rho) - L_{\text{capteur}}^{\text{acquise}}(i, j)]^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (5.11)$$

Il s'agit donc également d'un polynôme multivarié à M variables, mais de degré maximal dépendant de p . On choisit $p = 2$ car il s'agit du plus petit degré tel que ϵ^p soit un polynôme multivarié différentiable. Le degré du polynôme est alors $2N$. Le nombre maximal de termes de la fonction coût est alors :

$$Nb_{\text{termes coût}}(N, M) = \Gamma_{M+1}^{2N} \quad (5.12)$$

Pour une estimation numérique de ce nombre de termes de la fonction coût, il suffit de remplacer N par $2N$ dans le tableau 5.1.

5.3.3.5 Stocker l'image formelle ou la fonction coût ?

En fonction de la taille de l'image, il peut être avantageux de stocker la fonction coût ou l'image formelle. En effet, le nombre de termes à stocker pour la fonction coût ne varie pas avec la taille de l'image. Soit N_{pix} le nombre de pixels de l'image (ou la somme des pixels du jeu d'images). Pour déterminer le nombre de pixels de l'image au-delà duquel il est préférable de stocker la fonction coût plutôt que l'image formelle complète, on cherche N_{pix} tel que $N_{\text{pix}} \cdot \Gamma_{M+1}^N = \Gamma_{M+1}^{2N}$. Les résultats sont donnés dans le tableau 5.2.

En pratique, sur une scène réelle, les réflexions d'ordre supérieur à 2 sont négligeables [Lachérade et al. \(2008\)](#) ; on choisit donc $N = 3$. Le nombre de matériaux M de la scène est lui aussi réduit (on suppose que le modèle 3D est segmentée en zones de réflectance homogène). Il est donc préférable de stocker la fonction coût plutôt que l'image complète. Par exemple, pour une image de 300×300 pixels avec $N = 2$ et $M = 10$, le nombre de termes à stocker pour l'image complète est 5 940 000, alors qu'il n'en faut que 1001 pour la fonction coût, soit une réduction d'un facteur 6 000 environ. Néanmoins, cette réduction du stockage ne peut intervenir que pour l'export du résultat de la simulation. Au cours de la simulation, il faut conserver l'intégralité de l'expression formelle, du fait de la non-linéarité de la norme L^2 .

5.3.4 Implémentation du lancer de rayons formel

5.3.4.1 Intégration à l'outil de simulation

L'implémentation de l'estimation des paramètres de réflectance à partir d'un jeu d'images est réalisée dans notre code baptisé IRSUTE (Inversion Radiométrique de Scènes Urbaines TERrestres). La simulation par lancer de rayons est basée sur le logiciel de lancer de rayons LuxRender (LuxRender, 2012) (cf. la section 3). Ce code open source (licence GPL) a été modifié afin d'effectuer directement le calcul d'images formelles (ou symboliques). Pour cela, la librairie open source de manipulation d'expressions symboliques GiNaC (GiNaC, 2011) a été utilisée (licence GPL). Les modèles de réflectance implémentés ont désormais comme attributs supplémentaires les variables symboliques correspondant à leurs paramètres. Ces variables symboliques sont transmises tout au long du calcul, et la luminance est stockée sous forme d'une expression symbolique GiNaC au lieu d'une valeur numérique (flottant). Cependant, les techniques d'échantillonnage utilisées par LuxRender nécessitent une valeur numérique de la BRDF et de la luminance portée par une contribution. En effet, pour une convergence plus rapide de l'intégration de Monte-Carlo, on lance plus de contributions dans les directions où le signal est fort (échantillonnage préférentiel ou *importance sampling* (Pharr and Humphreys, 2004)). Pour cette raison, une valeur initiale des paramètres des BRDF doit être fournie, et les valeurs numériques des pixels sont stockés en parallèle des valeurs formelles. On peut noter que la qualité de cette valeur initiale ne peut introduire de biais dans la simulation ; elle réduit seulement la qualité de l'échantillonnage préférentiel, et ne peut donc introduire que de la variance.

5.3.4.2 Structure de données du lancer de rayon formel

Notre version modifiée de LuxRender stocke les données des différentes classes d'objets manipulés de la manière décrite sur le diagramme UML 5.6.

Les différentes classes correspondent aux objets définis à la section 3.4. La BRDF est stockée en fonction du modèle qui la représente (modèle analytique paramétrique, valeurs tabulées, etc).

5.3.4.3 Performance

Le stockage des fonctions formelles est volumineux, car leur taille en mémoire augmente au cours du lancer de rayon (cf. la section 5.3.3). De plus, les manipulations d'expressions symboliques sont plus lentes que les manipulations de flottants. Cela ralentit donc la convergence du lancer de rayon, le nombre de rayons lancés par unité de temps étant environ 5 fois plus faible sur la simulation formelle que sur la simulation purement numérique.

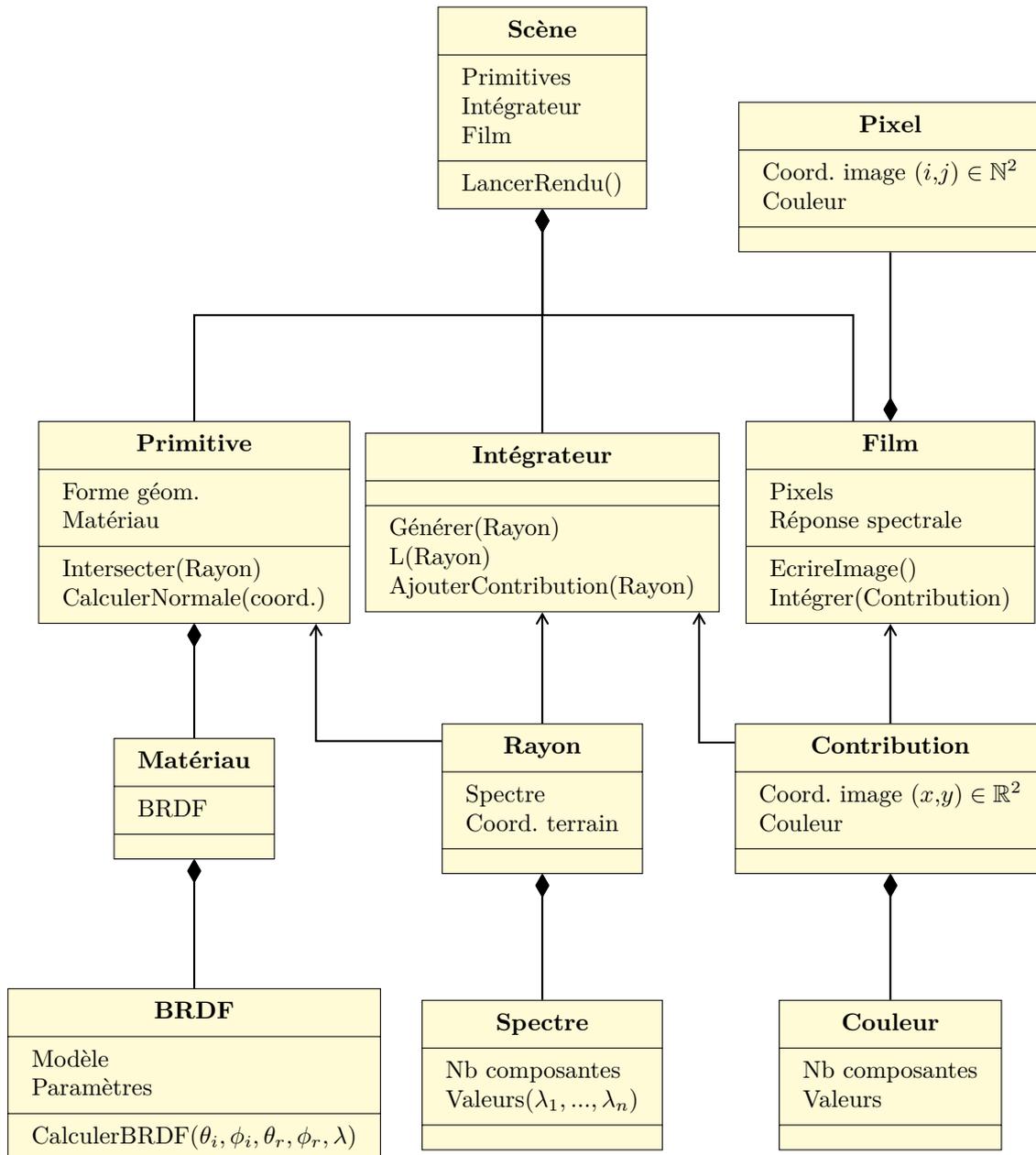


FIGURE 5.6 – Diagramme UML simplifié expliquant les principales structures de données dans le code de lancer de rayon formel basé sur LuxRender.

5.4 Inversion : estimation des paramètres de réflectance

5.4.1 Algorithme de minimisation

On dispose d'un jeu d'images acquises, géoréférencées, corrigées en luminance. On dispose également d'un modèle 3D segmenté en zones de réflectance uniforme, ainsi que de l'illumination de la scène (description de sources de lumière). L'algorithme d'inversion pour l'estimation de la réflectance est alors celui présenté au chapitre 5.3 (cf. figure 5.4). Il s'agit de minimiser la différence entre les images simulées et les images acquises réelles, en faisant varier les paramètres de réflectance $\rho = (\rho_n)_n, n \in \llbracket 1; N_p \rrbracket$ dans les images simulées. Cette différence est définie par :

$$\epsilon = \left| \sum_{\text{image } j} \sum_{\text{pixel } i} [L_{\text{capteur}}^{\text{simul}}(i, j; \rho) - L_{\text{capteur}}^{\text{acquise}}(i, j)]^p \right|^{\frac{1}{p}} \quad (5.13)$$

On choisit $p = 2$ car il s'agit du plus petit degré tel que ϵ^p soit un polynôme multivarié différentiable.

5.4.2 Implémentation de la minimisation

5.4.2.1 Utilisation de GSL

Les méthodes de minimisation d'énergie sont nombreuses ; on en choisit une simple : le gradient conjugué. L'implémentation utilise la bibliothèque scientifique open source GSL [GSL \(2012\)](#). Une méthode de simplexe [Nelder and Mead \(1965\)](#) a également été testée, sans différence notable. Les méthodes par simplexe nécessitent en moyenne moins d'évaluations de la fonction coût qu'une méthode basée sur le gradient. En effet, tous les $M + 1$ points du simplexe ne changent pas à chaque itération (avec M le nombre de paramètres à estimer), alors que le calcul du gradient par différences finies nécessitent l'évaluation de la fonction coût en $M + 1$ points à chaque itération.

5.4.2.2 Minimisation de polynômes multivariés : essai avec Gloptipoly

La fonction coût à minimiser est un polynôme multivarié (cf. la section 5.3.3.4). Il existe des méthodes spécifiquement dédiées à la minimisation des polynômes multivariés, par exemple la méthode proposée par [Henrion and Lasserre \(2003\)](#), implémentée dans Gloptipoly, qui est un programme d'optimisation de systèmes de polynômes multivariés ([Gloptipoly, 2012](#)). Il se présente sous la forme d'un script Matlab, utilisant le paquet SeDuMi ([SeDuMi, 2012](#)). Il existe une version Octave (clone GNU de Matlab, sous licence GPL) de SeDuMi, et le code de Gloptipoly est compatible avec Octave. Il est donc possible d'utiliser Gloptipoly avec Octave.

Gloptipoly nécessite en entrée un tableau c à N_p dimensions, où N_p est le nombre de paramètres, tel que $c(j_1, j_2, \dots, j_{N_p})$ soit le coefficient du monôme $\rho_1^{j_1} \cdot \rho_2^{j_2} \cdot \dots \cdot \rho_{N_p}^{j_{N_p}}$. Le code de minimisation a été modifié pour transformer la fonction coût polynomiale (sous forme d'une expression GiNaC) en un fichier texte contenant les éléments du tableau c . Le fichier texte est ensuite lu par un script Octave, pour être formaté en un tableau multidimensionnel c (la réalisation de ce tableau n'est pas triviale, car il n'est pas possible d'appeler un élément avec un indice de taille connue à l'exécution ; une solution utilisant une chaîne de caractère pour définir les indices a été trouvée).

Les résultats obtenus en utilisant Gloptipoly sont très semblables à ceux obtenus avec GSL. Pour un système non contraint, on obtient la même solution avec Gloptipoly qu'avec une descente de gradient (GSL). En revanche, on peut introduire des contraintes sur les paramètres dans Gloptipoly, en ajoutant des inégalités dans le système ; cela est très intéressant pour

Objet	Albédo de réf.	Albédo estimé	Err. relative	Err. relative, image verticale seule
Trottoir	0,15	0,1498	-0,11 %	-0,05 %
Route	0,07	0,0699	-0,08 %	-0,04 %
Toits	0,30	0,2997	-0,09 %	-0,04 %
Fenêtres	1,00	0,9986	-0,13 %	-145 %
Murs	0,42	0,4196	-0,09 %	0,67 %
Jardin	0,80	0,7998	-0,03 %	-0,07 %

TABLE 5.3 – Résultats numériques de l'inversion dans le cas lambertien.

imposer des contraintes de conservation de l'énergie par la BRDF. Cependant, Octave est limitant quant à la taille des systèmes qu'il est possible de traiter. En effet, le traitement d'une scène avec $M = 20$ paramètres et $N = 3$ réflexions autorisées a mené à une erreur de mémoire à l'exécution.

5.4.3 Validation sur scènes synthétiques

5.4.3.1 Matériaux lambertiens

La validation de la méthode d'inversion est effectuée sur des images synthétiques d'une scène de carrefour urbain (cf. figure 5.7), à la longueur d'onde 550 nm. La scène comporte 6 matériaux lambertiens différents (avec des albédos arbitraires), dont 2 sur des faces verticales (les murs et les fenêtres). Le nombre maximal de réflexions autorisées N est fixé à 3; seules les réflexions simples et doubles sont prises en compte (cf. 5.3.3.5). Sont ainsi simulées deux images de référence depuis deux points de vue différents, l'un aérien vertical et l'autre terrestre horizontal. Sont simulées ensuite les images formelles correspondantes, en ayant donné des valeurs initiales arbitraires aux paramètres, différentes des valeurs de référence. En effet, la valeur numérique des paramètres est utilisée dans le calcul formel, pour réaliser l'échantillonnage préférentiel. Il faut donc réaliser deux lancers de rayon indépendants pour calculer les images numérique et formelle, afin de ne pas introduire artificiellement une corrélation. Les résultats de l'estimation des albédos sont présentés dans le tableau 5.3. La précision de l'estimation est très bonne lors de l'utilisation conjointe des deux images. Il est intéressant de noter qu'il est possible d'estimer correctement l'albédo pour des matériaux qui ne sont pas vus directement sur l'image. C'est le cas pour la simulation aérienne verticale, sur laquelle l'albédo des murs est estimé avec une erreur de 0,7%. Cela n'est vrai que pour des matériaux qui sont suffisamment représentés dans la scène, i.e. qui couvrent une grande surface. Par exemple, l'albédo des fenêtres est très mal estimé avec l'image verticale seule, avec une erreur relative de 145%.

5.4.3.2 Modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire

Pour les raisons de taille mémoire évoquée dans la partie 5.3.3, on utilise un modèle à noyaux (cf. 5.3.3.3) pour rendre le modèle de BRDF plus réaliste. On teste dans un premier temps un modèle composé de la somme d'un noyau lambertien et d'un noyau purement spéculaire. Cela donne donc, en fonction des angles zénithaux et azimutaux d'incidence (θ_i, ϕ_i) et de réflexion (θ_r, ϕ_r) :

$$brdf(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \cdot \delta_{\theta_i=\theta_r} \cdot \delta_{\phi_i=-\phi_r} \quad (5.14)$$

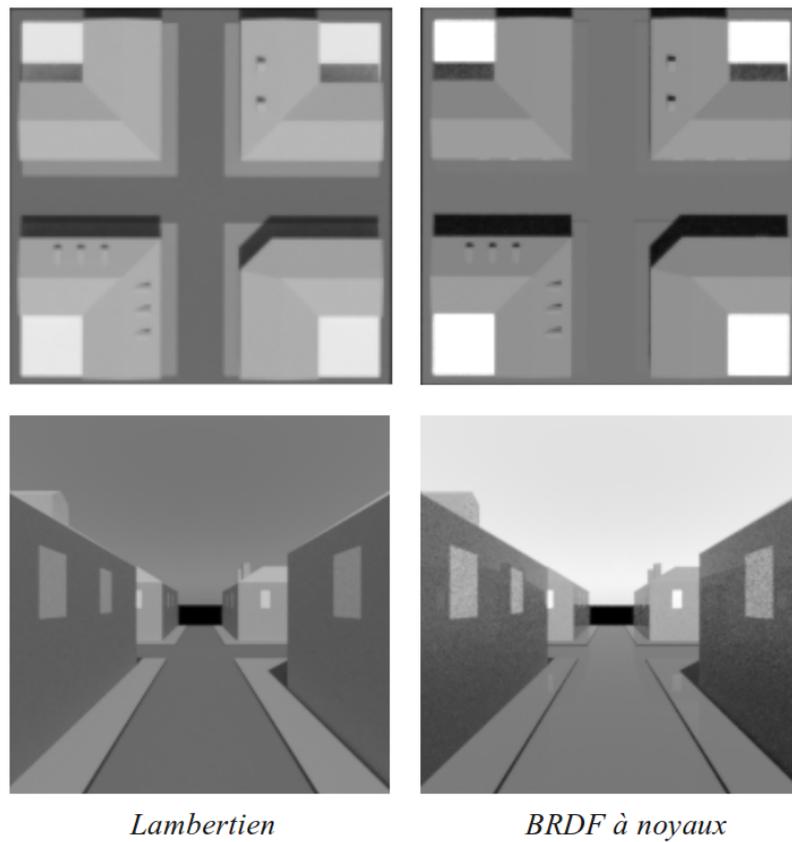


FIGURE 5.7 – Images simulées sur la scène du carrefour (les niveaux de gris ne sont pas comparables entre les deux modèles, les paramètres d’affichage étant différents pour éviter les zones saturées ou trop sombres)

Objet	Param.	Val. réf.	Val. estimée	Err. relative
Trottoir	ρ_d	0,015	0,0150	-0,039 %
	ρ_s	0,135	0,1374	1,8 %
Route	ρ_d	0,014	0,0140	0,088 %
	ρ_s	0,056	0,0554	-1,1 %
Toits	ρ_d	0,030	0,0300	-0,012 %
	ρ_s	0,270	0,2698	-0,073 %
Fenêtres	ρ_d	0,378	0,3748	-0,85 %
	ρ_s	0,042	0,0656	36 %
Murs	ρ_d	0,084	0,0835	-0,56 %
	ρ_s	0,336	0,3387	0,79 %
Jardin	ρ_d	0,320	0,3197	-0,11 %
	ρ_s	0,480	0,4975	3,5 %

TABLE 5.4 – Résultats numériques de l'inversion dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène de carrefour urbain.

Objet	Param.	Val. réf.	Val. estimée	Erreur
Toit	ρ_d	0.2	0.390	0.190
Mur	ρ_d	0.72	0.762	0.042
	ρ_s	0.08	0.326	0.246
Balcon	ρ_d	0.3	0.284	-0.016
	ρ_s	0	0.373	0.373
Sol	ρ_d	0.2	0.218	0.018
	ρ_s	0	0.000	0.000
Auvent	ρ_d	0.05	0.046	-0.004
	ρ_s	0	0.300	0.300
Fenêtre	ρ_d	0.18	0.185	0.005
	ρ_s	0.72	0.494	-0.226

TABLE 5.5 – Résultats numériques de l'inversion dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène avec bâtiments complexes.

où ρ_d et ρ_s règlent l'importance de la partie diffuse et de la partie spéculaire. En utilisant ce modèle pour tous les matériaux de la scène et en donnant des valeurs arbitraires aux paramètres, les résultats sur la scène utilisée à la section précédente 5.4.3.1 sont présentés dans le tableau 5.4.

L'estimation de la partie diffuse des réflectances est très bonne. En revanche, l'estimation de la partie spéculaire peut être imprécise dans le cas d'un matériau peu représenté (les fenêtres ici), car le problème est alors moins bien posé s'il n'y a pas de pics spéculaires directement visibles dans l'image. Le nombre et la répartition des images utilisées pour l'estimation est donc un critère important pour la qualité de l'estimation. En dépit de ces erreurs sur l'estimation de la partie spéculaire, l'image reconstruite avec les paramètres estimés est visuellement très proche de l'image de référence (cf. figure 5.8).

Sur une scène plus complexe, avec des bâtiments offrant un niveau de détail supérieur, les résultats sont semblables (voir la figure 5.9 pour voir les images reconstruites et le tableau 5.5 pour les résultats numériques). On peut notamment voir la mauvaise estimation de la partie spéculaire sur les auvents.

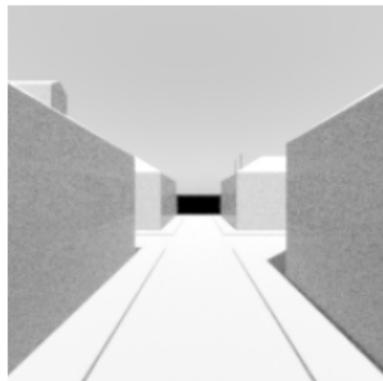


Image reconstruite avec les paramètres initiaux



Image reconstruite après 20 itérations



Image reconstruite après 100 itérations



Image reconstruite avec les paramètres finaux (1000 itérations)



Image de référence

FIGURE 5.8 – Estimations itératives successives des paramètres de réflectance dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène de carrefour urbain.



Image de référence

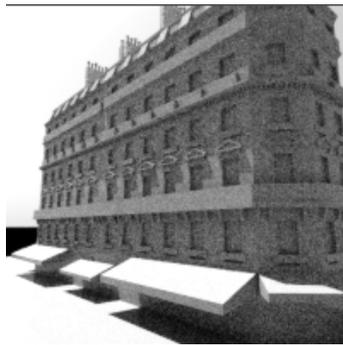


Image initiale



Image reconstruite après
20 itérations



Image reconstruite avec les
paramètres finaux

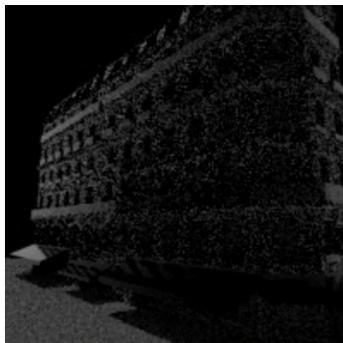


Image d'erreur

FIGURE 5.9 – Estimations itératives successives des paramètres de réflectance dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire, scène avec bâtiments complexes.

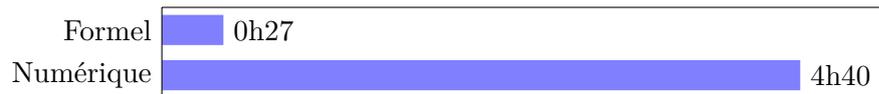


FIGURE 5.10 – Comparaison des temps de calcul des réflectances avec l’algorithme d’inversion en utilisant le lancer de rayon formel ou non.

5.4.3.3 Gain en temps de calcul

On effectue une comparaison entre l’algorithme d’inversion avec lancer de rayon entièrement numérique (cf. figure 5.3) et avec lancer de rayon formel (cf. figure 5.4). Pour la méthode par calcul entièrement numérique, on limite le nombre d’estimations de la fonction coût (chacune entraînant un nouveau lancer de rayon) en utilisant l’algorithme du simplexe pour la minimisation (cf. la section 5.4.2.1).

La comparaison est effectuée sur une scène synthétique de carrefour urbain, avec des matériaux lambertiens. Les deux codes n’utilisent qu’un seul fil d’exécution, et le critère d’arrêt de la simulation est fixé à l’obtention de 50 échantillons par pixel. L’ordinateur utilisé possède une mémoire vive de 8 GO. Les temps de calcul pour l’estimation des réflectances lambertiennes sont présentés sur la figure 5.10.

L’utilisation du lancer de rayon formel permet effectivement de gagner en temps de calcul, du moins quand la scène est suffisamment simple pour ne pas saturer la mémoire vive de l’ordinateur.

5.5 Conclusion

Dans le cas général, l’estimation de la réflectance des matériaux d’une scène urbaine est complexe et nécessite des temps de calcul trop longs, car elle nécessite de nombreuses simulations de la luminance en entrée du capteur pour faire converger un algorithme nécessairement itératif à cause des éclairagements réfléchis.

Ce chapitre présente une méthode de calcul formel de la luminance en entrée du capteur, qui permet de n’effectuer qu’une seule simulation lors du processus d’inversion ; cela a permis de gagner un facteur 10 sur le temps de calcul.

Même si cette méthode ne nécessite pas d’hypothèse particulière sur la scène, elle impose des contraintes d’un point de vue pratique sous peine d’utiliser une trop grande capacité de stockage informatique lors du calcul. Ainsi, le modèle paramétrique de BRDF choisi pour représenter la réflectance des matériaux doit être constitué d’une combinaison linéaire de noyaux non paramétrés. Cela permet néanmoins de représenter un grand nombre de comportements des matériaux.

Bilan et perspectives

6.1 Contributions

Cette thèse a permis d'aborder le problème de l'utilisation radiométrique des images photogrammétriques terrestres urbaines, par une approche physique. Les applications envisageables sont l'amélioration de la qualité visuelle des images mises à disposition dans un visualisateur immersif, le ré-éclairage sous n'importe quelles conditions d'illumination, la réalité augmentée, la classification.

6.1.1 Un outil de simulation physique générique

Un outil de simulation d'images en luminance a été développé, basé sur le code *open source* LuxRender qui utilise le principe du lancer de rayons (cf. le chapitre 3). Même si ces différentes possibilités n'ont pas nécessairement été exploitées au cours de cette thèse, cet outil présente l'avantage d'être très générique :

- la géométrie du modèle peut être complexe, définie par une surface triangulée ou des primitives (procédural) ;
- les matériaux peuvent être opaques ou non, avoir une émission propre ;
- la BRDF peut être définie de manière tabulée ou analytique, simple ou complexe ;
- les sources de lumière peuvent être ponctuelles, étendues, une carte d'environnement ;
- la géométrie d'acquisition de la caméra peut être conique, orthographique, panoramique ;
- la réponse spectrale du capteur peut être définie par l'utilisateur ;
- le transfert radiatif dans le milieu diffusé peut aussi être pris en compte, au prix d'un très long temps de calcul.

On peut ainsi simuler des phénomènes plus ou moins complexes, mais cela influe très fortement sur le temps de calcul.

Cet outil a montré l'intérêt de l'utilisation des méthodes de la communauté des *computer graphics*, centrée sur l'aspect visuel réaliste, pour les problèmes de la télédétection urbaine. En utilisant les mêmes principes de base, il peut être étendu à d'autres capteurs que les caméras dans le domaine visible, comme les capteurs infra-rouges ou laser (par exemple, ces travaux ont inspiré l'utilisation du lancer de rayon par [Ristorcelli et al. \(2012\)](#)).

6.1.2 Une méthode d'estimation de la réflectance par lancer de rayon formel

La méthode d'inversion proposée, basée sur l'utilisation de l'outil de simulation par lancer de rayon formel est nouvelle et permet également d'aborder le problème générique (cf. le chapitre 5), même si des problèmes pratiques de temps de calcul et de taille mémoire limitent fortement son utilisation pour des cas où la BRDF est complexe (cf. la section 5.3.3).

La méthode d'estimation des réflectances, initialement conçue en considérant l'illumination et le modèle 3D de la scène comme des entrées connues du système, n'a pas pu être appliquée sur les données du véhicule d'acquisition Stereopolis au cours de cette thèse. En effet, il a fallu développer une méthode d'estimation de l'illumination à partir des images qui est très fortement affectée par la sur-exposition des pixels imageant le ciel (cf. la section 4.4.1.1). De plus, un modèle 3D de type BATI-3D[®] est insuffisamment détaillé pour cette application : il faudrait utiliser le nuage de points acquis par le système LIDAR, ce qui représente un travail conséquent ne rentrant pas dans le cadre de cette thèse.

6.2 Perspectives : vers un traitement des images urbaines

6.2.1 Utilisation radiométrique des images terrestres urbaines

De même que les images de télédétection spatiale ou aérienne, les images terrestres peuvent être utilisées comme des mesures de luminance permettant d'estimer des paramètres physiques des objets. Cependant, l'étalonnage radiométrique des caméras utilisées, qui ne sont généralement pas destinées à ce genre d'applications, reste un sujet à traiter et à prendre en considération.

6.2.2 Segmentation du modèle 3D de la scène

6.2.2.1 Problématique

Le modèle 3D utilisé en entrée de l'algorithme d'inversion (cf. le chapitre 5) doit être segmenté en zones de réflectance homogène. En effet, une estimation de la réflectance « point par point » (i.e. pour chaque petit élément de surface du modèle 3D) n'est pas envisageable dans le cas général car cela mènerait un trop grand nombre de paramètres et donc une complexité numérique trop importante (cf. la section 5.3.3). Cela peut être envisagé pour le cas lambertien, mais le système serait tout de même moins robuste car on perd de la redondance d'observations.

Cependant, le modèle 3D disponible n'est généralement pas segmenté ainsi, qu'il s'agisse de BATI-3D[®] (modèle vecteur formé de polyèdres simples) ou de modèles issus d'un nuage de points laser.

De plus, les modèles de type BATI-3D[®] sont généralisés à un certain niveau de détail (par exemple les façades sont des plans), et les modèles issus de laser présentent des parties cachées (derrière le mobilier urbain, les voitures, les arbres). Les éléments de végétation sont de toute façon des objets complexes (géométriquement et radiométriquement), et nécessitent des méthodes de transfert radiatif adaptées (voir par exemple [Adeline et al. \(2012\)](#)).

6.2.2.2 Quelques pistes

On peut noter les travaux de [Lensch et al. \(2001\)](#) visant à estimer la réflectance des matériaux conjointement à leur segmentation.

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour obtenir un modèle 3D segmenté en zones de réflectance homogène :

- une segmentation directement à partir des images. De nombreuses méthodes existent (voir par exemple [Burochin \(2012\)](#)), adaptées à différentes conditions. Il est cependant difficile, sur des critères colorimétriques, de ne pas séparer des zones faites d'un même matériau si l'une est à l'ombre et l'autre soleil. Une méthode supervisée par un opérateur humain pourrait donc être utile, en partant d'une sur-segmentation puis en agrégeant les zones afin de réduire le nombre de paramètres à estimer.
- une segmentation en utilisant l'information de rétrodiffusion du capteur laser. En effet, s'agissant d'un capteur actif, le signal reçu n'est pas affecté par l'illumination ambiante de la scène et ne présente donc pas de différence pour un même matériau à l'ombre et au soleil. En supposant que les zones de même coefficient de rétrodiffusion sont des zones de même réflectance, le nuage de points pourrait donc être segmenté sur critère de rétrodiffusion. Cependant, la dynamique de cette rétrodiffusion semble très faible et ne permet pas de discriminer les matériaux (essai réalisé avec le LIDAR rotatif de Stereopolis, acquisition dans une rue étroite du XIII^e arrondissement de Paris). Il faudrait donc étudier cette possibilité pour pouvoir conclure.

6.2.3 Application aux données Stereopolis

Il faudra tester la chaîne de traitement développée sur les données d'une mission d'acquisition Stereopolis, par exemple UMBRA (cf. la section 6.2.6.1). Même si l'illumination et les réflectances estimées ne seront probablement pas très précises, il sera intéressant de tester la qualité visuelle en résultant dans des applications de ré-éclairage.

Un autre problème rencontré pour la validation de la méthode est l'absence de vérité terrain, i.e. un jeu d'images terrestres urbaines pour lesquelles on connaît parfaitement à la fois l'illumination et la réflectance des matériaux. Un tel jeu serait difficile à réaliser, il faudrait donc trouver des méthodes de validation indirecte.

La qualité radiométrique des images est difficile à maîtriser, avec des phénomènes complexes à corriger, comme le *smearing* ou le *flare*. Pour l'algorithme d'inversion, il pourrait être intéressant d'intégrer ces effets dans l'outil de simulation (voir par exemple [Hullin et al. \(2011\)](#) pour une méthode de simulation du *flare*); cela éviterait d'avoir à corriger les images brutes pour en faire des images en luminance, en faisant l'inversion en comparant des images brutes caméra.

6.2.4 Campagnes d'acquisition réalisées

6.2.4.1 Acquisitions Stereopolis spécifiques

En plus des acquisitions déjà réalisées par le véhicule Stereopolis pour d'autres applications (notamment sur le 12^e arrondissement de Paris, sur les villes de Montreuil (93) et Clermont-Ferrand), plusieurs courtes acquisitions ont été réalisées par le véhicule Stereopolis dans la ville de Saint-Mandé (94) dans le cadre de cette thèse. La particularité de ces acquisitions spécifiques est l'emploi d'une plaque de référence sur le toit du véhicule (cf. la section 4.3), selon le dispositif montré sur la figure 4.2. Le matériau employé n'est malheureusement pas du Spectralon[®], les mesures indirectes d'éclairage solaire effectuées en seront donc affectées.

Ces acquisitions ont été réalisées sur un parcours de quelques kilomètres en zone urbaine, sans acquisition laser simultanée; cependant, un modèle 3D de type BATI-3D[®] est disponible sur cette zone.

6.2.5 Utilisation d'une carte d'environnement dans le cas d'une acquisition panoramique

En s'inspirant des méthodes de rendu basé images, qui ont pour but de synthétiser des nouvelles vues à partir d'un jeu d'images acquises (Shum et al., 2007), on peut envisager d'utiliser les images panoramiques acquises pour déterminer certains termes de luminance. Cela permet de réduire le nombre de réflexions nécessaires lors de la simulation.

6.2.5.1 Illumination distante

On peut parfois considérer que les sources de lumière (primaires et secondaires) sont loin de la scène par rapport à la taille de la scène (voir par exemple Debevec (1998) pour des applications de réalité augmentée). Cette hypothèse est correcte pour des petits objets isolés, mais n'est pas très réaliste pour le milieu urbain, pour lequel la direction et l'angle solide de vue d'une portion de façade est différent si l'on se place au niveau de la caméra où au niveau de la façade opposée (cf. figure 6.1).

Cependant, il est possible d'utiliser l'information des images pour déterminer la luminance totale émise par les surfaces composant la scène, puisque les valeurs des pixels imageant ces surfaces sont une mesure de cette luminance.

On veut simuler l'éclairement en un point I_1 du modèle 3D. D'après l'équation (2.19), on doit intégrer les luminances arrivant depuis toutes les directions en M . Si l'on suppose que l'illumination est distante, autrement dit que les objets environnant I_1 sont situés très loin, de même que le ciel et le soleil, alors la luminance reçue par I_1 issue d'un point I_2 est identique à la luminance mesurée par la caméra $C = I_0$ dans la direction $\overrightarrow{I_0 I_2}$. Cela est faux si I_2 est un point situé sur un objet de la scène, car les distances $I_0 I_1$ et $I_0 I_2$ sont du même ordre de grandeur ; la luminance mesurée par la caméra dans la direction $\overrightarrow{I_1 I_2}$ est en fait la luminance issue d'un autre point I_2' de la scène (cf. figure 6.1). On peut donc appliquer cette méthode uniquement pour le ciel, le soleil et les objets distant, mais pas pour l'ensemble de la scène dans notre cas.

6.2.5.2 Algorithme utilisant le modèle 3D

La connaissance du modèle 3D permet tout de même de récupérer dans les images la mesure de luminance correspondant à la direction \overrightarrow{MP} .

Il s'agit alors d'une modification de notre code de simulation par lancer de rayon (cf. la section 3.4.2). On génère une carte d'environnement grâce aux images acquises par la tête panoramique de notre système. Le nombre maximal de réflexions autorisées N_{max} est fixé à 2, La première interaction avec une surface en un point I_1 ne change pas. Lors de l'interaction suivante :

- s'il n'y a pas d'intersection avec la scène, la luminance est directement prise dans la carte d'environnement (il s'agit de la luminance descendante du ciel) ;
- s'il y a intersection en un point I_2 de la scène, la luminance portée par le rayon $\overrightarrow{I_2 I_1}$ est estimée comme étant la valeur de la carte d'environnement dans la direction $\overrightarrow{I_0 I_2}$ (cf. figure 6.2). Cela suppose que la luminance émise par I_2 est la même dans les directions de I_1 et I_0 , ce qui est faux dans le cas général d'une BRDF quelconque. Cela est par contre vérifié par exemple dans le cas de matériaux lambertiens.

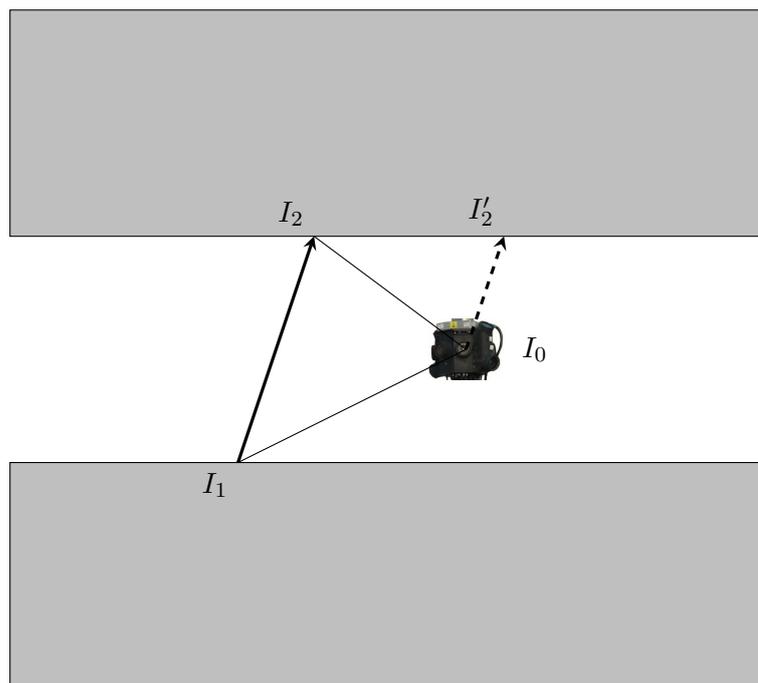


FIGURE 6.1 – Non validité de l’hypothèse d’illumination distante pour une scène de canyon urbain.

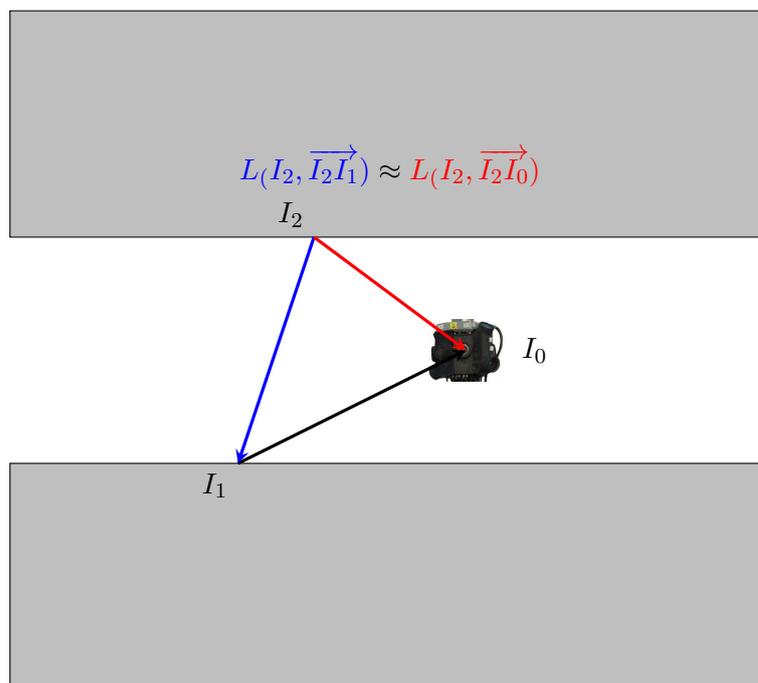


FIGURE 6.2 – Illustration de l’algorithme de simulation de la lumière avec une carte d’environnement issue de la tête panoramique.

6.2.5.3 Conclusion

Cette méthode permet de simplifier la simulation en limitant le nombre maximal de réflexions. Elle ne nécessite pas l'hypothèse d'une illumination distante pour chaque objet de la scène, mais elle ne permet pas de prendre en compte la bidirectionnalité de la réflectance pour le calcul des éclairagements réfléchis par les autres objets de la scène. Cependant, elle peut n'être utilisée qu'à partir d'un certain nombre de réflexions pour limiter l'influence de l'approximation faite ; cela permet néanmoins de limiter la taille mémoire nécessaire au calcul formel.

Cette méthode a été implémentée en fin de thèse dans la perspective de simplifier l'inversion, mais elle n'a pas été utilisée sur la chaîne complète d'estimation de la réflectance.

6.2.6 Amélioration et/ou simplification de la méthode d'inversion

La complexité du calcul de l'inversion du système est un frein pour une utilisation de la méthode proposée sur un grand jeu de données. Notamment, cette méthode peut s'appliquer à de l'estimation multi-images (voir la section 5.4.3.1 pour un exemple d'estimation avec deux points de vue sur une scène synthétique) ; mais cela reste difficile dans la pratique à cause du coût de calcul. Il serait donc intéressant d'étudier comment simplifier le calcul. Plusieurs pistes sont envisageables :

- une approche multi-résolution travaillant d'abord sur des images sous-échantillonnées ;
- une complexification du modèle de BRDF en plusieurs passes, en commençant par un modèle lambertien (par exemple à la manière de [Boivin and Gagalowicz \(2001\)](#)) ;
- une utilisation de la valeur des pixels des différentes images pour estimer la luminance émise par les matériaux (cf. la section 6.2.5) , ce qui permet de réduire le nombre de réflexions maximal à prendre en compte et donc la complexité de la fonction coût ;
- le couplage d'une méthode physique et d'une méthode basée image.

6.2.6.1 Campagne UMBRA

La campagne UMBRA, fruit d'une collaboration entre l'IGN et l'ONERA, a eu lieu en octobre 2012. Il s'agit d'une campagne d'acquisition aéroportée avec des capteurs multi-spectraux et hyper-spectraux, à des fins d'étude des écosystèmes urbains et naturels ([Adeline et al., 2013](#)). Les principales zones d'acquisition sont les villes de Toulouse et d'Amiens. Des mesures au sol ont été effectuées simultanément au passage de l'avion avec des spectroradiomètres sur différentes surfaces (cf. figure 6.3) . De plus, pour les besoins de la présente thèse, une acquisition simultanée avec le véhicule Stereopolis, équipé de la plaque de référence, a eu lieu sur le site d'Amiens.



FIGURE 6.3 – Mesures de luminance à l'aide d'un spectroradiomètre ASD sur une cible en vinyle dont les propriétés de réflectance sont par ailleurs mesurées en laboratoire. Site d'Amiens, campagne UMBRA.

6.3 Conclusion générale

Au cours de cette thèse ont été développés un outil de simulation, un outil d'estimation de l'illumination et un outil d'inversion adaptés au milieu urbain, permettant de mettre en place une chaîne complète d'estimation de la réflectance. Cette chaîne, nommée IRSUTE, utilise un lancer de rayon formel pour limiter le temps de calcul ; elle a été validée sur des scènes synthétiques. Il y a néanmoins des limitations (modèles simples de BRDF, taille mémoire requise lors du calcul), et il reste des points délicats pour permettre l'application à un grand jeu d'images urbaines terrestres (obtention d'un modèle 3D segmenté, correction radiométrique des images, complexité du calcul).

Pour permettre une mise en application à grande échelle, l'hypothèse lambertienne pourrait être retenue : en effet, une grande partie des matériaux de façades ont un comportement proche de la réflexion lambertienne ; on pourrait alors considérer les spécularités comme des anomalies et les traiter à part. L'algorithme d'inversion lui-même pourrait être optimisé afin d'être utilisable en un temps raisonnable même pour un large volume de données.

Bibliographie

- Adeline, K., Briottet, X., and Paparoditis, N. (2012). Material reflectance retrieval in shadow due to urban vegetation from 3D Lidar data and hyperspectral airborne imagery. In *Proceedings of the 32nd EARSeL symposium*, pages 308–317. *Cité page 108*
- Adeline, K., Le Bris, A., Coubard, F., Briottet, X., Paparoditis, N., Viallefont, F., Rivière, N., Papelard, J.-P., Déliot, P., Duffaut, J., Airault, S., David, N., Maillet, G., Poutier, L., Foucher, P.-Y., Achard, V., Souchon, J.-P., and Thom, C. (2013). Description de la campagne aéroportée UMBRA : étude de l'impact anthropique sur les écosystèmes urbains et naturels avec des images THR multispectrales et hyperspectrales. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (202) :79–92. *Cité page 112*
- Bayer, B. (1976). Color imaging array. US Patent, 3,971,065. *Cité page 121*
- Berk, A., Anderson, G., Acharya, P., Bernstein, L., Muratov, L., Lee, J., Fox, M., Adler-Golden, S., Chetwynd Jr, J., Hoke, M., et al. (2006). MODTRAN5 : 2006 update. In *Proceedings of SPIE*, volume 6233, page 62331F. *Cité page 44*
- Boivin, S. and Gagalowicz, A. (2001). Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 107–116. *Cité pages 87 et 112*
- Boldo, D. (2002). *Fabrication conjointe de Modèles Numériques de Surface et d'ortho-images pour la visualisation perspective de scènes urbaines*. PhD thesis, Université René Descartes - Paris 5. *Cité pages 13, 28 et 125*
- Burochin, J.-P. (2012). *Reconstruction de façades de bâtiments à partir d'imagerie urbaine terrestre optique et laser*. PhD thesis, Université Paris Est. *Cité pages 87 et 109*
- Cannelle, B., Paparoditis, N., and Papelard, J.-P. (2011). Calibration de caméra par acquisition de type panoramique. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 194(2) :16–24. *Cité page 121*
- Cantou, J., Maillet, G., Flamanc, D., and Buissart, H. (2006). Preparing the use of Pleiades images for mapping purposes : Preliminary assessments at IGN-France. *Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Ankara, Turkey*, 36. *Cité page 30*
- Ceolato, R. and Riviere, N. (2010). Banc Melopee : Mesure de BRDF polarisées et multispectrales en laboratoire. In *Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie CMOI-SFO, Labège France*. *Cité page 37*

- Chain, C. (2004). *Caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle : application à l'éclairage des bâtiments*. PhD thesis, INSA de Lyon. Cité pages 34, 67 et 81
- Chandelier, L. and Martinoty, G. (2009). A radiometric aerial triangulation for the equalization of digital aerial images and orthoimages. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(2). Cité page 44
- Cohen, M. and Greenberg, D. (1985). The hemi-cube : A radiosity solution for complex environments. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 19, pages 31–40. ACM. Cité page 45
- Cook, R. and Torrance, K. (1981). A reflectance model for computer graphics. In *Proceedings of the 8th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 307–316. ACM. Cité page 88
- Dare, P. (2005). Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 71(2) :169–177. Cité pages 15, 127, 128 et 129
- Debevec, P. (1998). Rendering synthetic objects into real scenes : Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In *SIGGRAPH 1998*, page 32. ACM. Cité pages 67, 88 et 110
- Devaux, A., Brédif, M., and Paparoditis, N. (2012). A web-based 3D mapping application using WebGL allowing interaction with images, point clouds and models. In *Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 586–588. ACM. Cité page 21
- Doz, S. (2011). *Méthode de simulation d'images urbaines à partir d'acquisitions aéroportées multi-angulaires à très hautes résolutions spatiale et spectrale*. PhD thesis, Université de Toulouse. Cité pages 28, 33 et 57
- Doz, S., Thomas, C., Lachérade, S., Briottet, X., Boldo, D., Lier, P., and Porez-Nadal, F. (2008). Simulation of high spatial resolution images for urban remote sensing. In *Proc. Int. Conf. Space Optics*. Cité pages 44, 47 et 62
- Duer, A. (2004). On the Ward model for global illumination. Technical report, University of Innsbruck. Cité page 88
- Dutre, P., Bala, K., and Bekaert, P. (2006). *Advanced global illumination*. AK Peters Ltd. Cité pages 29 et 45
- Gascon, F. (2001). *Modélisation physique d'images de télédétection optique*. PhD thesis, Université de Toulouse. Cité pages 30 et 44
- GiNaC (2011). GiNaC website. <http://www.ginac.de/>. Cité page 97
- Gloptipoly (2012). Gloptipoly 3 website. <http://homepages.laas.fr/henrion/software/gloptipoly/>. Cité page 99
- Goral, C., Torrance, K., Greenberg, D., and Battaile, B. (1984). Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 18, pages 213–222. ACM. Cité page 45
- GSL (2012). Gsl website. <http://www.gnu.org/software/gsl/>. Cité page 99

- Henrion, D. and Lasserre, J. (2003). Gloptipoly : Global optimization over polynomials with Matlab and SeDuMi. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 29(2) :165–194. *Cité page 99*
- Honkavaara, E., Arbiol, R., Markelin, L., Martinez, L., Cramer, M., Bovet, S., Chandelier, L., Ilves, R., Klonus, S., Marshal, P., et al. (2009). Digital airborne photogrammetry—a new tool for quantitative remote sensing?—a state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. *Remote Sensing*, 1(3) :577–605. *Cité page 19*
- Hufty, A. (2001). *Introduction à la climatologie : le rayonnement et la température, l’atmosphère, l’eau, le climat et l’activité humaine*. Presses Université Laval. *Cité page 44*
- Hullin, M. B., Eisemann, E., Seidel, H.-P., and Lee, S. (2011). Physically-based real-time lens flare rendering. *ACM Trans. Graph. (Proc. of SIGGRAPH)*, 30(4) :108 :1–108 :9. *Cité page 109*
- Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., and Nakamura, H. (2004). Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. *Solar Energy*, 77(2) :137–157. *Cité page 67*
- Jacquemoud, S. (2007). Transfert radiatif et bilan énergétique de l’atmosphère. cours du mastère MPT, Université Paris Diderot. *Cité pages 17 et 40*
- Jacques, M. (2002). Étude de modèles de BRDF adaptés au milieu urbain à haute résolution. Master’s thesis, DESS matériaux. *Cité page 28*
- Kajiya, J. (1986). The rendering equation. In *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 143–150. ACM. *Cité pages 36, 45 et 46*
- Kasser, M. and Egels, Y. (2001). *Photogrammétrie numérique*. Hermès. *Cité page 19*
- Kingslake, R. (1992). *Optics in photography*, volume 6. SPIE Press. *Cité page 74*
- Lachérade, S. (2006). *Caractérisation des propriétés optiques des matériaux urbains à partir d’images de télédétection à très hautes résolutions spatiale et spectrale*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de l’Aéronautique et de l’Espace. *Cité pages 34, 37, 44 et 47*
- Lachérade, S., Miesch, C., Boldo, D., Briottet, X., Valorge, C., and Le Men, H. (2008). ICARE : A physically-based model to correct atmospheric and geometric effects from high spatial and spectral remote sensing images over 3D urban areas. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3) :209–222. *Cité pages 91 et 96*
- Lafarge, F. (2007). *Modèles stochastiques pour la reconstruction tridimensionnelle d’environnements urbains*. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris. *Cité page 87*
- Lafortune, E., Foo, S., Torrance, K., and Greenberg, D. (1997). Non-linear approximation of reflectance functions. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–126. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. *Cité page 88*
- Lenoble, J. (1985). *Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres : standard computational procedures*. Studies in geophysical optics and remote sensing. A. Deepak. *Cité page 44*
- Lensch, H., Kautz, J., Goesele, M., Heidrich, W., and Seidel, H. (2001). *Image-based reconstruction of spatially varying materials*. *Cité page 108*

- Levin, A., Zomet, A., Peleg, S., and Weiss, Y. (2004). Seamless image stitching in the gradient domain. In *Computer Vision-ECCV 2004*, pages 377–389. Springer. Cité page 78
- Loscos, C., Frasson, M., Drettakis, G., Walter, B., Granier, X., and Poulin, P. (1999). Interactive virtual relighting and remodeling of real scenes. In *Proceedings of the 10th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 329–340. Cité page 87
- LuxRender (2012). Luxrender software online documentation. <http://www.luxrender.net/v/manual>. Cité pages 45 et 97
- Machida, T., Takemura, H., and Yokoya, N. (2007). Inverse reflectometry for real objects with diffuse and specular interreflections. *Electronics and Communications in Japan (Part II : Electronics)*, 90(1) :50–60. Cité pages 87 et 94
- Marschner, S. (1998). Inverse rendering for computer graphics. Cité page 87
- Martinoty, G. (2005). *Reconnaissance de matériaux sur des images aériennes en multirecouvrement, par identification de fonctions de réflectances bidirectionnelles*. PhD thesis, Université Paris 7. Cité pages 13, 15, 35, 37, 41, 44, 46, 47, 57 et 122
- Masek, J., Vermote, E., Saleous, N., Wolfe, R., Hall, F., Huemrich, K., Gao, F., Kutler, J., and Lim, T. (2006). A landsat surface reflectance dataset for north america, 1990-2000. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 3(1) :68–72. Cité page 44
- Meyzonnette, J. and Lépine, T. (1999). *Bases de radiométrie optique*. Cépaduès. Cité pages 27, 36 et 43
- Miesch, C. (1999). *Quantification des effets de l'hétérogénéité et du relief d'une scène en télédétection : modélisation du signal en entrée du capteur*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace. Cité pages 33, 44, 46 et 47
- Miller, G. and Hoffman, C. (1984). Illumination and reflection maps : Simulated objects in simulated and real environments. *SIGGRAPH 1984*. Cité page 87
- Montes Soldado, R. and Ureña Almagro, C. (2012). An overview of BRDF models. Technical report, University of Granada. <http://hdl.handle.net/10481/19751>. Cité page 28
- Musialski, P., Wonka, P., Aliaga, D. G., Wimmer, M., van Gool, L., and Purgathofer, W. (2012). A survey of urban reconstruction. In *Eurographics 2012-State of the Art Reports*, pages 1–28. The Eurographics Association. Cité page 25
- Nelder, J. and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4) :308. Cité page 99
- Nicodemus, F. (1977). Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Applied Optics*, 9 :1474–1475. Cité pages 27 et 36
- Oren, M. and Nayar, S. K. (1995). Generalization of the lambertian model and implications for machine vision. *International Journal of Computer Vision*, 14(3) :227–251. Cité page 88
- Ozturk, A., Kurt, M., Bilgili, A., and Gungor, C. (2008). Linear approximation of bidirectional reflectance distribution functions. *Computers & Graphics*, 32(2) :149–158. Cité page 88
- Paltridge, G. and Platt, M. (1976). Radiative process in meteorology and climatology. *Development in atmospheric science*, (5). Cité pages 30, 33 et 37

- Paparoditis, N., Papelard, J.-P., Cannelle, B., Devaux, A., Soheilian, B., David, N., and Houzay, E. (2012). Stereopolis ii : a multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology. *Revue Francaise de Photogrammétrie et de Télé-détection*, 200 :69–79. Cité pages 19, 23 et 24
- Patow, G. and Pueyo, X. (2003). A survey of inverse rendering problems. In *Computer graphics forum*, volume 22, pages 663–687. Cité page 87
- Pénard, L. (2009). *Reconstruction de scènes urbaines à partir d’images terrestres et aériennes haute résolution*. PhD thesis, Université Paris 5. Cité page 87
- Perez, R., Seals, R., and Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation. *Solar energy*, 50(3) :235–245. Cité pages 67 et 81
- Pharr, M. and Humphreys, G. (2004). *Physically based rendering : from theory to implementation*. Morgan Kaufmann. Cité pages 45, 46, 47, 48 et 97
- Pharr, M. and Humphreys, G. (2012). PBRT (physically based rendering) website. <http://www.pbrt.org/>. Cité page 45
- Pickup, G., Chewings, V., and Pearce, G. (1995). Procedures for correcting high resolution airborne video imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 16(9) :1647–1662. Cité page 95
- Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P. (2001). On the relationship between radiance and irradiance : determining the illumination from images of a convex lambertian object. *JOSA A*, 18(10) :2448–2459. Cité page 88
- Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P. (2004). A signal-processing framework for reflection. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 23(4) :1004–1042. Cité page 88
- Raskar, R., Agrawal, A., Wilson, C. A., and Veeraraghavan, A. (2008). Glare aware photography : 4d ray sampling for reducing glare effects of camera lenses. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 27, page 56. ACM. Cité page 74
- Reinhard, E. (2006). *High dynamic range imaging : acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann. Cité page 67
- Richter, R. and Schläpfer, D. (2002). Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. part 2 : atmospheric/topographic correction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13) :2631–2649. Cité page 44
- Ristorcelli, T., Hamoir, D., Briottet, X., Cazanave, G., Petit, D., and Gastellu-Étchegorry, J.-P. (2012). Modelling of full-waveform, 3D laser imaging for vegetation characterisation and foliage penetration. OPTRO 2012, Paris. Cité page 107
- Romeiro, F. and Zickler, T. (2010). Blind reflectometry. *Computer Vision—ECCV 2010*, pages 45–58. Cité page 88
- Rusinkiewicz, S. (1997). A Survey of BRDF Representation for Computer Graphics. Technical report, Princeton University. Cité page 88
- Schanda, E. (1986). *Physical fundamentals of remote sensing : with 102 figures and 14 tables*. Springer Verlag. Cité pages 43 et 46

- Schmitt, F. and Prieese, L. (2009). Sky detection in csc-segmented color images. *VISAPP (2)*, pages 101–106. Cité page 81
- SeDuMi (2012). SeDuMi website. <http://sedumi.ie.lehigh.edu>. Cité page 99
- Serra, J. (2013). Cours de morphologie mathématique. Centre de morphologie mathématique, MINES ParisTech. <http://cmm.ensmp.fr/~serra/cours/index.htm>. Cité page 76
- Shum, H.-Y., Chan, S.-C., and Kang, S. B. (2007). *Image-based rendering*. Springer. Cité page 110
- Spencer, S. (1993). Radiosity overview. SIGGRAPH Education Slide Set. http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/radiosity/overview_1.htm. Cité page 45
- Stumpfel, J., Tchou, C., Jones, A., Hawkins, T., Wenger, A., and Debevec, P. (2004). Direct hdr capture of the sun and sky. In *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*, pages 145–149. ACM. Cité pages 67 et 87
- Tanre, D., Herman, M., and Deschamps, P. (1981). Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. *Applied Optics*, 20(20) :3676–3684. Cité page 34
- Thomas, C. (2010). *Caractérisation des aérosols atmosphériques en milieu urbain par télédétection à très haute résolution spatiale*. PhD thesis, Université de Toulouse. Cité page 29
- Torrance, K. and Sparrow, E. (1967). Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical society of America*, 57(9) :1105–1114. Cité pages 88 et 94
- Troccoli, A. and Allen, P. K. (2005). Relighting acquired models of outdoor scenes. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2005. 3DIM 2005. Fifth International Conference on*, pages 245–252. IEEE. Cité pages 13 et 21
- Veach, E. (1997). *Robust Monte Carlo methods for light transport simulation*. PhD thesis, Stanford University. Cité pages 45 et 58
- Vermote, E., Tanré, D., Deuze, J., Herman, M., and Morcette, J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6s : An overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35(3) :675–686. Cité pages 29, 30, 35, 44, 47 et 55
- Walthall, C., Norman, J., Welles, J., Campbell, G., and Blad, B. (1985). Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24(3) :383–387. Cité page 95
- Ward, G. (1992). Measuring and modeling anisotropic reflection. In *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 265–272. ACM. Cité page 94
- Yu, T., Wang, H., Ahuja, N., and Chen, W. (2006). Sparse lumigraph relighting by illumination and reflectance estimation from multi-view images. In *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, pages 175–es. ACM. Cité page 88
- Yu, Y., Debevec, P., Malik, J., and Hawkins, T. (1999). Inverse global illumination : Recovering reflectance models of real scenes from photographs. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 215–224. Cité pages 87 et 94

Annexes

A.1 Modélisation du système caméra

Le système caméra transforme la luminance arrivant devant son objectif en une image de valeurs entières. Le traitement radiométrique de ces images demande donc une modélisation de ce processus, qui est utilisée pour l'étalonnage radiométrique de la caméra.

A.1.1 Les phénomènes

Une caméra numérique est un appareil mesurant la luminance arrivant sur chaque photosite (ou cellule photo-sensible) d'une matrice (CCD ou CMOS), placée derrière un système optique de focalisation des rayons lumineux. Chaque composante de ce système a un effet sur la lumière qui le traverse. On ne s'intéresse ici qu'à la modélisation radiométrique de la caméra ; en particulier, on ne parlera pas de la distorsion géométrique induite par l'optique (cf. [Cannelle et al. \(2011\)](#) pour un exemple d'étalonnage de cette distorsion).

A.1.1.1 Réponse spectrale

La caméra répond de manière différente en fonction de la longueur d'onde du signal reçu. Le support de cette réponse spectrale $R_{spect}(\lambda)$ est une certaine bande spectrale, pouvant être très fine (pour les systèmes hyperspectraux) ou large. Les imageurs classiques essaient généralement d'avoir des canaux dont la réponse spectrale est proche de celle de l'œil (3 canaux RVB), avec éventuellement un canal panchromatique sensible dans tout le spectre visible. Le filtrage spectral se fait à deux niveaux :

- par les filtres placés avant le photosite (devant l'optique pour les systèmes multi-têtes, juste devant le photosite pour les systèmes Bayer ([Bayer, 1976](#)));
- par les photosites eux-mêmes dont le rendement quantique dépend de la longueur d'onde.

Un exemple est donné sur la figure [A.1](#).

A.1.1.2 Atténuation optique

La traversée du système optique et l'arrivée sur le photosite donne lieu à une atténuation A_{opt} qui varie radialement autour du PPA (Point Principal d'Autocollimation), correspondant à l'intersection de l'axe optique du système et de la matrice de photosites. Le PPA peut différer légèrement du centre de l'image. Cette atténuation est généralement une fonction variant avec

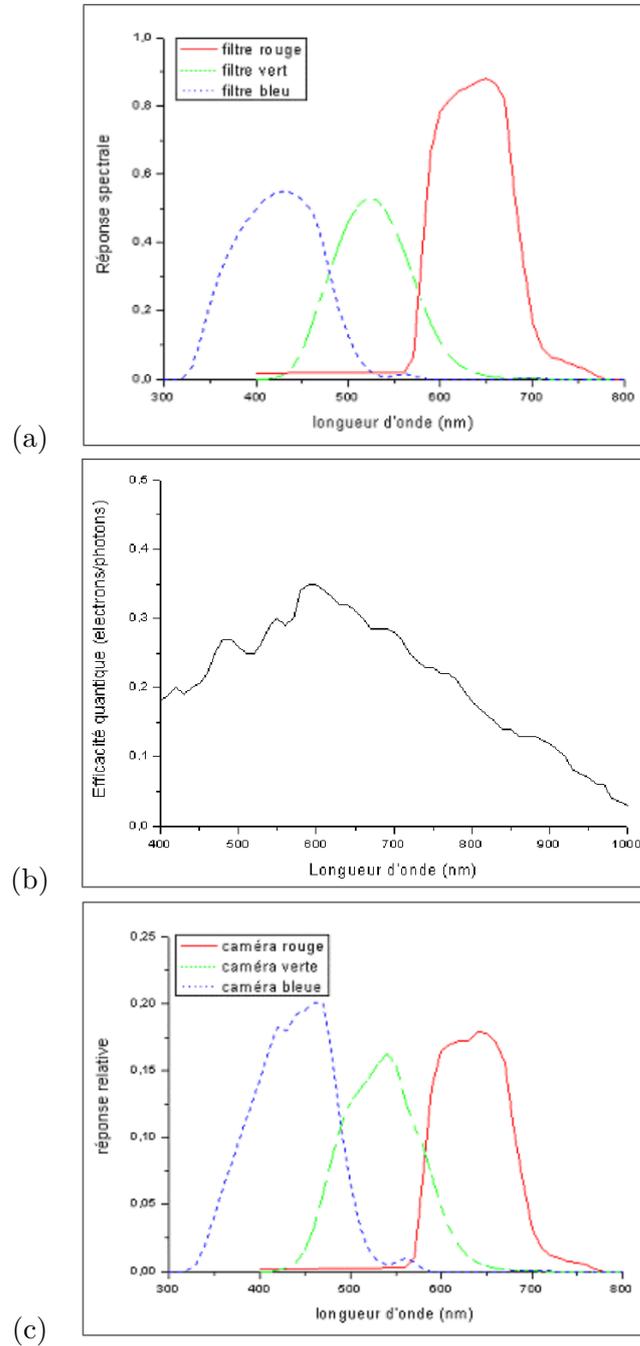


FIGURE A.1 – Réponse spectrale des filtres colorés (a), des photosites (b), et réponse spectrale de la caméra (c)=(a)·(b). Caméra numérique IGN (destinée aux missions aéroportées, montrée ici à titre d'exemple) (Martinoty, 2005).

$\cos^4(\theta)$, où θ est l'angle entre l'axe optique et le rayon passant par le centre optique et le point de la matrice.

A.1.1.3 Vignettage

L'atténuation est encore accentuée dans les coins par le vignettage A_{vign} , i.e. l'assombrissement lié au masquage (par les bords de l'objectif voire par un éventuel pare-soleil) d'une partie du faisceau arrivant sur les photosites des coins de la matrice. Le vignettage augmente avec l'ouverture du diaphragme : plus il est ouvert, plus le faisceau de lumière intégré par le photosite est large, plus les différences entre le centre et les bords s'accroissent.

A.1.1.4 Réponse des photosites et système électronique

La luminance arrivant sur le photosite est intégrée pendant le temps de pose t_{pose} . Les photosites transforment alors cette énergie reçue (nombre de photons) en un signal (nombre d'électrons), selon une fonction R_q nommée le rendement quantique, qui est à peu près linéaire pour les capteurs CCD (mais pas du tout pour les capteurs CMOS).

Les photosites envoient un signal non nul même quand l'obturateur de la caméra est fermé : c'est ce que l'on appelle le courant d'obscurité ; on le note C_0 . Celui-ci varie avec le temps (à l'échelle même d'une acquisition), notamment avec la température qui influe sur l'excitation des photosites.

Ce signal est limité par un maximum (limitation physique des photosites ne pouvant intégrer qu'un nombre fini de photons par unité de temps) : c'est le phénomène de saturation, qui apparaît lors d'une sur-exposition (liée à la durée d'ouverture de l'obturateur (temps de pose) et au niveau de luminance en entrée du capteur), et qui agit comme une fonction de seuillage S sur le signal, fonction supposée identique pour tous les pixels.

Le signal est ensuite transformé en un compte numérique (ou valeur du pixel) V par le système électronique, via une étape de quantification. Cette transformation est caractérisée par un gain K et une fonction de quantification Q , cette dernière étant supposée identique pour tous les pixels. Les caméras à large dynamique utilisées ont généralement un codage de la valeur sur 12 bits, soit 4096 niveaux, recodé ensuite sur 16 bits dans le fichier image de sortie.

A.1.1.5 Variations locales

Les phénomènes décrits précédemment ne sont pas nécessairement homogènes sur la matrice ; des variations locales sont présentes à cause de diverses imperfections :

- taches, poussières et rayures dans le système (sur une lentille ou sur la matrice) (cf. figure A.2) ;
- différence de sensibilité entre les photosites ;
- pixels chauds : photosites toujours en état excité (cf. figure A.3) ;
- pixels morts : photosites défectueux qui ne sont plus photo-sensibles).

Ces différents facteurs peuvent varier au cours du temps, notamment avec l'usure de la matrice.

A.1.1.6 Bruit

Comme toute mesure physique, le compte numérique final est entaché d'un bruit issu de plusieurs sources : bruit quantique aléatoire sur le signal des photosites, bruit de l'électronique,



FIGURE A.2 – Effet d’une poussière sur l’optique pour une image aérienne, bien visible au niveau du cours d’eau. Caméra argentique, IGN.



FIGURE A.3 – Exemple de pixel chaud : un des pixels centraux renvoie une forte valeur sur ces trois images, indépendamment de la luminance en entrée du capteur.

bruit quantique aléatoire du courant d'obscurité, bruit de quantification (Boldo, 2002). Ce bruit est d'autant plus perceptible dans les zones renvoyant une faible luminance, car il ne diminue pas linéairement avec la valeur du signal. C'est notamment le cas dans le coin des images, pour lesquels l'atténuation optique est forte.

A.1.2 Modélisation de la valeur des pixels

A.1.2.1 Cas général

On cherche à modéliser la fonction f de réponse globale de la caméra :

$$V(i,j) = f(i,j, L_{\text{capteur}}(i,j)) \quad (\text{A.1})$$

La luminance arrivant devant l'objectif de la caméra, dans le champ de vue du photosite repéré par les coordonnées (i,j) sur la matrice, est notée $L_{\text{capteur}}(i,j)$. Le nombre de photons intégré pendant le temps de pose est quasi proportionnel au temps de pose et à la luminance \bar{L} prise en compte par le photosite, donnée par :

$$\bar{L}(i,j) = A_{\text{opt}}(i,j) \cdot A_{\text{vign}}(i,j) \int_{\lambda} R_{\text{spect}}(\lambda) \cdot L_{\text{capteur}}(i,j,\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{A.2})$$

Cette équation décrit principalement la partie optique du système (hormis une partie de la réponse spectrale due aux photosites).

La valeur (ou compte numérique) $V(i,j)$ du pixel (i,j) est alors :

$$V(i,j) = K(i,j) \cdot Q \circ S \left(R_q^{(i,j)} \left(\alpha \cdot t_{\text{pose}} \cdot \bar{L}(i,j) \right) + C_0(i,j) \right) \quad (\text{A.3})$$

avec

- K le gain du système électronique ;
- Q la fonction de quantification ;
- S la fonction de saturation ;
- $Q \circ S$ est la fonction composée des deux précédentes ;
- R_q est le rendement quantique du pixel ;
- α est le facteur constant transformant $t_{\text{pose}} \cdot \bar{L}(i,j)$ en le nombre de photons intégrés ;
- C_0 est le courant d'obscurité.

Cette équation décrit la partie électronique du système.

A.1.2.2 Flat-field

On modélise souvent l'atténuation optique, le vignettage et les variations locales par un *flat-field* (ou plan de lumière uniforme), donnant pour chaque pixel (i,j) l'atténuation relative $FF(i,j)$ par rapport au centre de l'image, qui est proche du minimum d'atténuation (cf. figure A.4). Cela suppose implicitement que les différents défauts impliquant les variations locales se mettent sous la forme d'un facteur à appliquer à chaque pixel. Notamment, la fonction R_q doit avoir la même forme pour tous les photosites. On suppose également que ce *flat-field* est indépendant de la longueur d'onde.

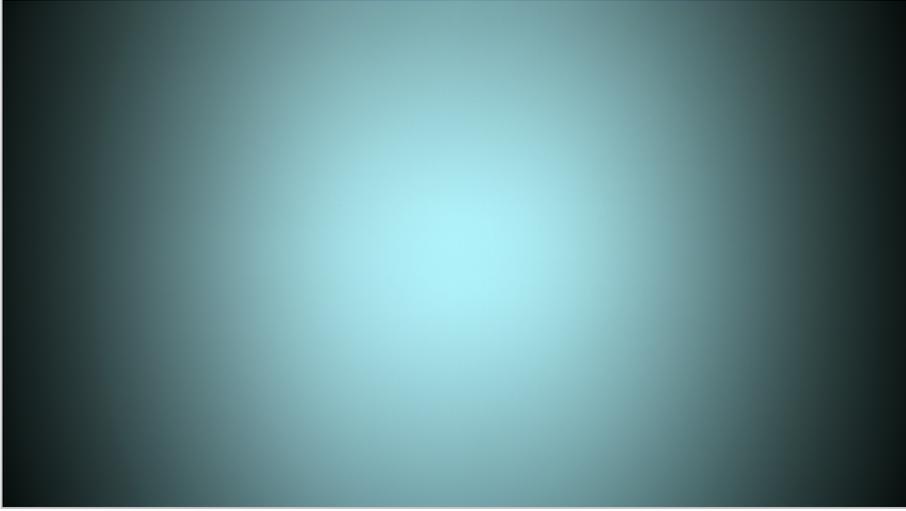


FIGURE A.4 – Exemple de *flat-field* d'une caméra terrestre (sans correction de la balance des blancs).

La valeur $V(i,j)$ du pixel (i,j) est alors :

$$V(i,j) = \bar{K} \cdot (Q \circ S) \left(\bar{R}_q \left(\alpha \cdot t_{pose} \text{FF}(i,j) \cdot \int_{\lambda} R_{spect}(\lambda) \cdot L_{capteur}(i,j,\lambda) \cdot d\lambda \right) + C_0(i,j) \right) \quad (\text{A.4})$$

L'équation (A.4) n'est pas rigoureuse pour le traitement des variations locales issues de la partie électronique, sauf si R_q est linéaire. Si de plus on néglige le courant d'obscurité et l'effet de la quantification, on obtient (en dehors du domaine de saturation) :

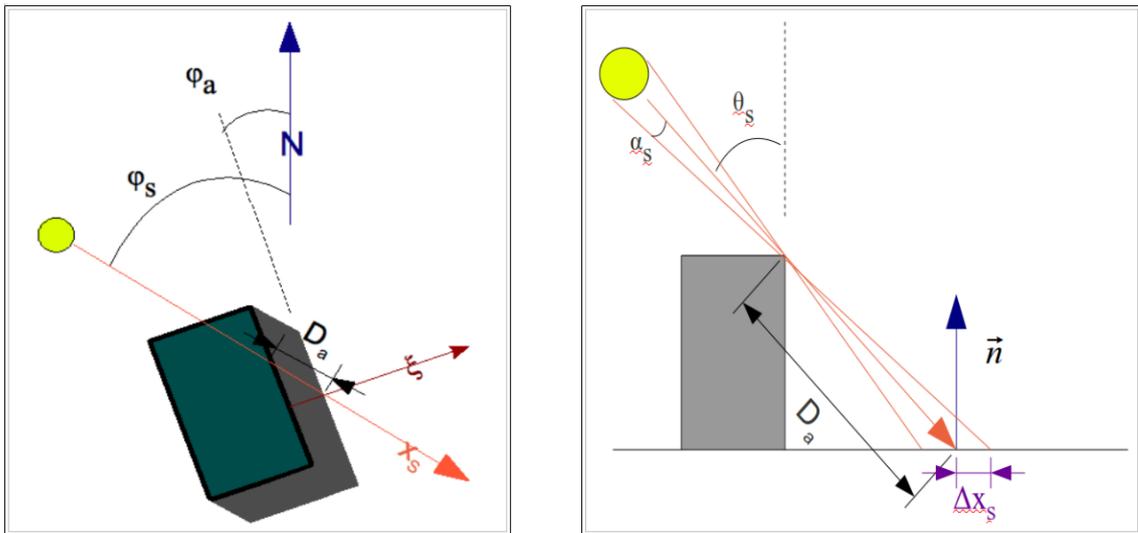
$$V(i,j) = \bar{K}' \cdot t_{pose} \cdot \text{FF}(i,j) \cdot \int_{\lambda} R_{spect}(\lambda) \cdot L_{capteur}(i,j,\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{A.5})$$

Ce *flat-field* est obtenu à partir de l'image d'un objet uniformément blanc (sphère intégrante, plaque de dépoli), corrigée du courant d'obscurité.

A.2 La pénombre

Le soleil est une source étendue de lumière, ce qui entraîne l'apparition de zones de pénombre au niveau des transitions ombre - soleil. L'éclairement direct dans ces zones n'est donc qu'une portion de l'éclairement direct pour un point au soleil (cf. la section 2.3.1.2). La taille de ces zones de pénombre n'est pas toujours négligeable en milieu urbain avec une imagerie à haute résolution.

A.2.1 Modélisation de la taille de la pénombre



- x_s est l'abscisse selon la direction du soleil projetée sur la surface ;
- Δx_s est la demi-taille de la zone de pénombre (selon x_s) ;
- α_s est le demi-angle apparent de vue du soleil ;
- θ_s est l'angle zénithal du soleil ;
- D_a est la distance du centre de la pénombre au bord masquant (ici le haut du bâtiment) ;
- \vec{n} est la normale à la surface au niveau du bord de l'ombre projetée ;
- φ_a est l'azimut de la tangente au bord masquant ;
- φ_s est l'azimut de la direction du soleil.

FIGURE A.5 – Caractéristiques géométriques d'une zone de pénombre.

La taille Δx_s de la zone de pénombre (selon la direction du soleil projetée sur la surface, x_s) peut être déterminée géométriquement (cf. figure A.5). Dare (2005) en propose une expression valable uniquement pour une surface horizontale. On propose ici une formulation plus générale pour une surface localement plane d'orientation quelconque, **en faisant l'hypothèse que la**

taille de la zone de pénombre est petite devant la distance au bord masquant. Cette taille est alors égale à :

$$2 \cdot \Delta x_s = 2 \cdot \frac{D_a \cdot \alpha_s}{\langle \vec{n} \cdot \vec{\Theta}_s \rangle} \quad (\text{A.6})$$

où D_a est la distance entre le bord masquant et la limite d'ombre, $\vec{\Theta}_s$ le vecteur unitaire indiquant la direction du soleil, \vec{n} la normale à la surface où se projette l'ombre.

A.2.2 Comparaison des modèles de taille de pénombre

Il s'agit de comparer numériquement le modèle proposé par [Dare \(2005\)](#) (valable uniquement pour une surface horizontale) et notre modèle de pénombre. La comparaison s'effectue pour un bord d'ombre projetée par un bâtiment d'une hauteur de 10 m sur une surface horizontale.

On représente la taille de la zone de pénombre en fonction de l'angle d'élévation solaire (angle entre la direction de l'horizon et la direction du soleil), pour les deux modèles (cf. figure [A.6](#)).

Les deux modèles donnent un résultat très proche de celui obtenu, hormis quand l'angle solaire est très rasant ($\theta_s > 85^\circ$). En effet, on a alors une taille de pénombre très grande, ce qui ne correspond plus à l'hypothèse faite par notre modèle (la taille de la zone de pénombre doit être petite devant la distance au bord masquant).

Cependant, les courbes sont confondues à partir d'une élévation solaire par rapport à l'horizontale supérieure à 5° , ce qui correspond aux conditions usuelles d'observation.

La formule approchée que nous proposons donne donc pour une surface horizontale un résultat très proche de celui obtenu avec la formule proposée par [Dare \(2005\)](#), dans les conditions d'une scène urbaine.

A.2.3 Expression dans un cas simple

Dans le cas d'un bord de bâtiment masquant une surface horizontale, la distance au bord masquant s'exprime simplement par :

$$D_a = \frac{H_{\text{bâtiment}}}{\cos(\theta_s)} \quad (\text{A.7})$$

Le demi-angle apparent de vue du soleil α_s dépend de l'éloignement Terre-Soleil (voir [tableau 2.1](#)), et donc de la saison, avec une moyenne égale à $\bar{\alpha}_s = 0,267^\circ$.

Par exemple, un bâtiment de 30 m de hauteur impliquera une zone de pénombre d'une taille de 38 cm environ sur un sol plat.

A.2.4 Profil d'atténuation

L'atténuation de l'éclairement solaire direct au sein de la zone suit un certain profil, que l'on peut expliciter. En fonction de la coordonnée x_s selon la direction du soleil projetée au sol, on a une atténuation dans la zone de pénombre proportionnelle à l'aire apparente du soleil, soit :

$$E_{dir. \text{ pénombre}}(x_s) = E_{dir. \text{ soleil}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\pi} \left(\arccos \left(\frac{x_s}{\Delta x_s} \right) - \frac{x_s}{\Delta x_s} \sqrt{1 - \left(\frac{x_s}{\Delta x_s} \right)^2} \right)}_{\text{atténuation}} \quad (\text{A.8})$$

avec $x_s \in [-\Delta x_s, \Delta x_s]$

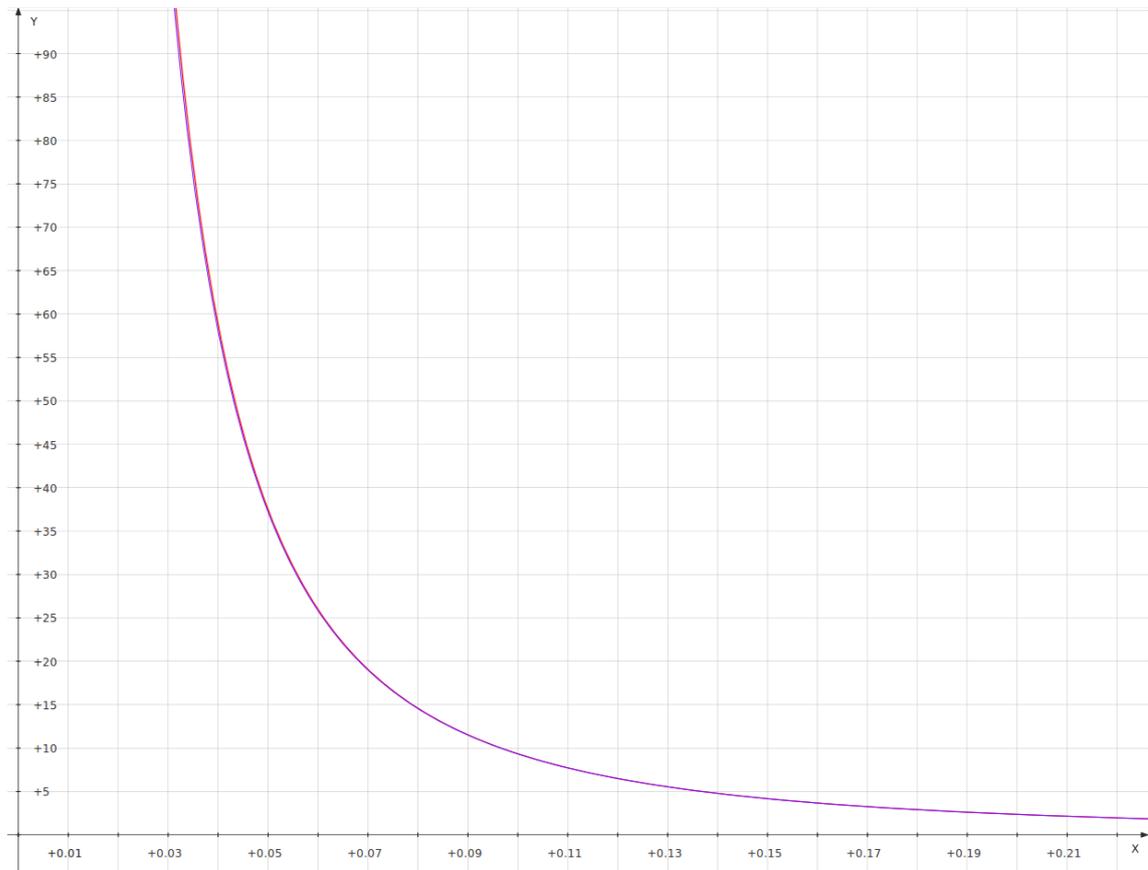


FIGURE A.6 – Comparaison de la taille de la pénombre (en m) sur une surface horizontale avec la formule approchée (A.6) (en rouge) et avec la formule proposée par Dare (2005) (en bleu), en fonction de l’angle d’élevation solaire (en radians). Calcul effectué avec un bâtiment masquant d’une hauteur de 10 m.

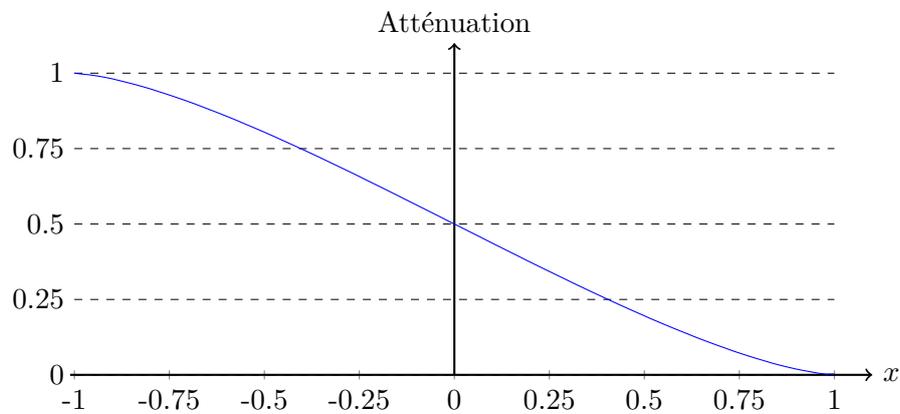


FIGURE A.7 – Atténuation (grandeur sans dimension entre 0 et 1) de l’éclairage solaire direct dans une zone de pénombre de demi-taille arbitraire $\Delta x_s = 1$.

La courbe représentant la forme mathématique de l'atténuation est présentée sur la figure [A.7](#).

Ce profil peut être utilisé par exemple pour un ajustement sur des données réelles issues d'une image présentant une zone de pénombre large de plusieurs pixels, afin d'estimer des paramètres.

A.3 Les équations du *path tracing*

L'algorithme est basé sur le principe décrit dans la section 3.4.2 ; on reprend également les notations de cette section. On lance donc un rayon depuis la caméra et on suit son chemin dans la scène, en choisissant aléatoirement les directions de réflexion après interaction avec un objet, jusqu'à ce que le rayon rencontre une source ou soit perdu en-dehors de la scène.

Afin de diminuer le temps de calcul, on utilise dans l'intégration de Monte-Carlo, pour chaque contribution, les contributions de tous les chemins de taille inférieure ou égale à celle du chemin total de la contribution, notée $N(x,y)$. Ainsi, un chemin de taille $N + 1$ est obtenu par rallongement d'un chemin de taille N , sans refaire un tirage aléatoire de la totalité des interactions depuis la caméra.

A chaque interaction, la luminance portée par la contribution est additionnée de la luminance que renvoie le point de la scène intersecté dans la direction du rayon. La somme pondérée d'un grand nombre de contributions permet de calculer, par intégration de Monte-Carlo, l'image des luminances renvoyées par la scène à la caméra.

La variance introduite par la corrélation entre les chemins de tailles différentes est largement compensée par le gain sur le temps de calcul.

A.3.1 Interaction avec une surface

Le calcul de l'atténuation se fait comme décrit en 3.4.2. Cependant, la luminance portée par une contribution ayant un chemin C de taille n est la somme des luminances portées par les sous-chemins inclus dans C de taille inférieure ou égale à n .

$$L_{contribution}(x,y) = \sum_{n=1}^{N(x,y)} L^n = \sum_{n=1}^{N(x,y)} G^n \cdot R^n \cdot T^n \cdot L_{dir}(I_{n+1}, -\vec{u}_n) \quad (\text{A.9})$$

En explicitant les termes :

$$L_{contribution}(x,y) = L_{dir}(I_1, -\vec{u}_0) \cdot T_{0,1} + \sum_{n=1}^{N(x,y)} \left(L_{dir}(I_{n+1}, -\vec{u}_n) \prod_{k=0}^{n-1} \rho_{dd}(I_{k+1}, \vec{u}_k, \vec{u}_{k+1}) \cos(\widehat{\vec{n}_{I_{k+1}}, \vec{u}_{k+1}}) \cdot \prod_{k=0}^n T_{k-1,k} \right) \quad (\text{A.10})$$

Il s'agit d'une décomposition en termes correspondant à des chemins ayant un nombre de réflexions croissant :

$$L_{contribution}(x,y) = L_{direct-direct}(x,y) + \frac{L_{réfléchi-direct}(x,y, I_1, \vec{u}_1)}{pdf(I_1, \vec{u}_1)} + \sum_{n=2}^{N_{max}} \left(\frac{L_{réfléchi n fois-direct}(x,y, (I_{j+1}, \vec{u}_{j+1})_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket})}{\prod_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket} pdf(I_{j+1}, \vec{u}_{j+1})} \right) \quad (\text{A.11})$$

où $L_{réfléchi n fois-direct}(x,y, (I_{j+1}, \vec{u}_{j+1})_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket})$ désigne la luminance vue par le point (x,y) du capteur, due à un chemin aléatoire à n interactions. Ce chemin est décrit par la suite $(I_{j+1}, \vec{u}_{j+1})_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket}$ des directions tirées aléatoirement à chaque intersection avec un objet de la scène. La probabilité de ce chemin est donnée par la densité de probabilité suivante :

$$pdf((I_{j+1}, \vec{u}_{j+1})_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket}) = \prod_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket} pdf(I_{j+1}, \vec{u}_{j+1}) \quad (\text{A.12})$$

(les tirages de direction à chaque intersection étant indépendants entre eux). Le terme $L_{direct-direct}$ a déjà été calculé par intégration de Monte-Carlo et n'a pas de valeur de pdf associée.

A.3.2 Optimisation du critère d'arrêt

Les critères d'arrêt d'un rayon sont l'intersection vide ou l'intersection avec une source. On rajoute cependant un critère de maximum de réflexions. Ainsi, si le nombre d'intersections avec des surfaces dépasse un certain nombre N_{max} fixé par l'utilisateur, on arrête le rayon. On néglige donc les réflexions d'ordre supérieur à N_{max} . Cela est justifié par le fait que l'atténuation totale F^n décroît avec la taille du chemin (produit de grandeurs plus petites que 1).

Pour cette raison de décroissance de F^n , traiter un chemin de grande taille n'apporte pas nécessairement un gain intéressant sur la précision par rapport au temps de calcul alors consommé. On rajoute donc une autre possibilité d'arrêt tiré aléatoirement selon une probabilité augmentant avec la taille du chemin. Cette technique d'arrêt du rayon, dite « roulette russe », limite le nombre moyen d'interactions des contributions sans biaiser le résultat final. À chaque nouvelle interaction, on choisit aléatoirement avec une probabilité q si l'on arrête le chemin de la contribution. La probabilité q augmente avec le nombre de réflexions de la contribution, et dans le cas où l'on n'arrête pas le rayon, les termes suivants seront pondérés par $\frac{1}{1-q}$, ce qui permet de ne pas biaiser le résultat.

A.3.3 Valeur en luminance d'un pixel

La valeur de la luminance venant de la scène vers un pixel, défini par des coordonnées entières (i, j) dans le repère image, est obtenue par la sommation des $N_{contributions}$ contributions parvenues dans la cellule entourant le point de coordonnées (i, j) (cf. équation(3.6)). Dans le cas du *path tracing*, cela donne :

$$L(i, j) = \frac{1}{N_{contributions}} \sum_{k=1}^{N_{contributions}} [L_{direct - direct}^k(x^k, y^k) + \sum_{n=1}^{N(x^k, y^k)} \frac{L_{réfléchi\ n\ fois - direct}^k(x^k, y^k, (r_{j+1}^k)_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket})}{pdf((r_{j+1}^k)_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket})}] \quad (A.13)$$

Soit $N_{contributions}(n)$ le nombre de contributions pour lesquels $N(x^k, y^k) \geq n$:

$$L(i, j) = \frac{1}{N_{contributions}} \sum_{k=1}^{N_{contributions}} L_{direct - direct}^k(x^k, y^k) + \sum_{n=1}^{N_{max}} \frac{1}{N_{contributions}(n)} \sum_{k=1}^{N_{contributions}(n)} \frac{L_{réfléchi\ n\ fois - direct}^k(x^k, y^k, (r_{j+1}^k)_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket})}{pdf((r_{j+1}^k)_{j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket})} \quad (A.14)$$

On a donc, avec une variance diminuant en $\frac{1}{\sqrt{N_{contributions}}}$:

$$L(i, j) = L_{direct-direct}(i, j) + \sum_{n=1}^{N_{max}} L_{réfléchi\ n\ fois - direct}(i, j) \quad (A.15)$$

i.e. $L(i, j) = L_{direct}(i, j)$ en négligeant les réflexions d'ordre supérieur à N_{max} .

A.3.4 Path tracing bidirectionnel

Il s'agit d'une variante du *path tracing* dans laquelle des rayons sont lancés depuis la caméra et depuis les sources. Cela permet dans certaines configurations d'obtenir une convergence plus rapide. C'est le cas notamment lorsque les sources sont peu visibles depuis les éléments de surface vus par la caméra.

A.4 Publications

Ce travail de thèse a donné lieu à quatre publications :

- Coubard, F., Brédif, M., Paparoditis, N., and Briottet, X. (2011). Reflectance estimation from urban terrestrial images : Validation of a symbolic ray-tracing method on synthetic data. In *Photogrammetric Image Analysis*.
- Coubard, F., Brédif, M., Briottet, X., and 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*, 2(194) :25–35.
- Coubard, F., Lelégard, L., Brédif, M., Paparoditis, N., and Briottet, X. (2012). Reconstruction of sky illumination domes from ground-based panoramas. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXIX-B3, pages 269–274.
- Adeline, K., Le Bris, A., Coubard, F., Briottet, X., Paparoditis, N., Viallefont, F., Rivière, N., Papelard, J.-P., Déliot, P., Duffaut, J., Airault, S., David, N., Maillet, G., Poutier, L., Foucher, P.-Y., Achard, V., Souchon, J.-P., and Thom, C. (2013). Description de la campagne aéroportée UMBRA : étude de l'impact anthropique sur les écosystèmes urbains et naturels avec des images THR multispectrales et hyperspectrales. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (202) :79–92.