HAL
open science

Estimation de la réflectance de matériaux d'une scène urbaine : modélisation et méthode d'inversion

Fabien Coubard, Mathieu Brédif, Xavier Briottet, Nicolas Paparoditis

To cite this version:

Fabien Coubard, Mathieu Brédif, Xavier Briottet, Nicolas Paparoditis. Estimation de la réflectance de matériaux d'une scène urbaine : modélisation et méthode d'inversion. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 2011, 2 (194), pp.25-35. hal-01883044

HAL Id: hal-01883044

https://hal.science/hal-01883044v1

Submitted on 3 Oct 2018

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.

ESTIMATION DE LA RÉFLECTANCE DE MATÉRIAUX D'UNE SCÈNE URBAINE : MODÉLISATION ET MÉTHODE D'INVERSION

Fabien Coubard[1], Mathieu Brédif[1], Xavier Briottet[2], Nicolas Paparoditis[1]

1 : Laboratoire MATIS, Institut Géographique National, Université Paris-Est - fabien.coubard@ign.fr

2 : DOTA, ONERA, Toulouse

Résumé

De nombreuses images terrestres géoréférencées sont accessibles sur Internet, via des services d'immersion, tels que Google Street View. Afin d'améliorer la lisibilité de ces images et permettre la juxtaposition et la comparaison de l'information qu'elles contiennent, il est nécessaire de mettre en œuvre des corrections radiométriques afin de s'affranchir des conditions d'illumination au moment de l'acquisition. Pour cela, la modélisation de la luminance reçue par le capteur doit prendre en compte la diffusion atmosphérique et les réflexions multiples entre objets de la scène, qui peuvent être importantes dans le cadre de l'imagerie terrestre urbaine à très haute résolution spatiale. Dans ce but, un simulateur de luminance au niveau du capteur, basé sur le lancer de rayons, a été développé et validé sur des scènes simples. Le problème inverse à résoudre est alors l'estimation de la réflectance des matériaux de la scène connaissant la géométrie de la scène, donnée par un modèle 3D acquis simultanément aux images. La méthode proposée repose sur un algorithme de lancer de rayons formel, qui génère des images paramétriques formelles pouvant être par la suite rapidement évaluées et comparées aux images réelles acquises. Son principe consiste alors en une estimation itérative des paramètres de réflectance, en n'utilisant qu'une seule simulation (formelle) par image. Les résultats, obtenus sur des scènes synthétiques, sont très encourageants dans le cas d'un modèle de BRDF linéaire à noyaux non paramétrés. Les difficultés et limites lors de l'utilisation d'un modèle non-linéaire de BRDF sont ensuite discutées.

Mots-clés : radiométrie, BRDF, lancer de rayons, images terrestres multi-angulaires, modèle 3D.

Abstract

Urban terrestrial images are widely available to web users, mainly in urban areas, through immersion services such as Google Street View. In order to enhance the visualization of these images and provide their information in a comparable way, radiometric corrections must be performed to free them from illumination conditions at the time of acquisition. The modelization of the radiance hitting the sensor must take into account both atmospheric scattering and objects interreflections, which can be of high importance in urban images with high spatial resolution. In that work, the radiance is simulated by a ray-tracing algorithm, which is validated on simple scenes. Then, given the simultaneously acquired 3D geometric model of the scene with lidar or vision techniques, we face an inverse rendering problem where the illumination and the geometry of the scene are known and the reflectance of the scene is to be estimated. The proposed method uses a symbolic ray-tracing rendering to generate parametric images, for quick evaluation and comparison with the acquired images. The method is then based on an iterative estimation of the reflectance parameters of the materials, using a single symbolic rendering processing. The results on synthetic scenes are promising with linear BRDF models, and the limitations of the proposed approach with more general BRDF models that are non-linear with respect to their parameters are discussed.

Keywords: *radiometry, BRDF, ray-tracing, multi-angular terrestrial images, 3D model.*

1. Introduction

1.1. Contexte

L'acquisition d'images terrestres à l'aide de véhicules géolocalisés est actuellement largement mise en œuvre pour la constitution de bases de données 3D. Cependant, en vue de la mise à disposition de ces données au grand public dans des navigateurs de type *Street View*, des traitements radiométriques sont nécessaires.
D'une part, il s'agit d'images à grande dynamique (typiquement 12 bits) présentant de fortes variations d'illumination entre les zones soumises à l'éclairement direct du soleil et les zones situées à l'ombre du soleil. Pour améliorer la lisibilité de ces images, en extraire le maximum d'informations possible, et les afficher avec un rendu agréable à l'œil, deux approches peuvent être envisagées. La première consiste à appliquer des transformations colorimétriques en n'utilisant comme source de données que l'image elle-même (c'est le cas des méthodes d'égalisation d'histogramme par exemple). Bien que ces méthodes puissent donner des résultats visuellement bons, elles ne renseignent généralement que peu sur les propriétés intrinsèques des constituants de la scène ; la deuxième approche est privilégiée ici. Celle-ci consiste à réaliser une modélisation physique de

la formation des images, afin de comprendre au mieux l'information radiométrique qu'elles contiennent.
D'autre part, des applications à valeur ajoutée peuvent être envisagées pour augmenter l'attrait d'un navigateur d'images terrestres en ligne de type *Street View*. Dans ce cadre, une application majeure est le ré-éclairement de la scène sous des conditions d'éclairement (saison, heure, météo) souhaitées par l'utilisateur.

1.2. Problématique

Les images utilisées pour la texturation d'une base de données 3D sont généralement issues de plusieurs acquisitions différentes, donc prises avec un horaire, une géométrie et des conditions météorologiques différentes. Afin de s'affranchir de ces différences et éliminer les artefacts visuels qu'ils impliquent (tels que les ombres, les raccords, voire la saturation), une caractéristique intrinsèque aux matériaux doit être estimée : la réflectance. En effet, celle-ci est indépendante de l'illumination de la scène.

1.3. État de l'art

La modélisation radiométrique des images est très utile pour l'interprétation et l'utilisation de leur contenu. [Miesch, 1999] introduit une modélisation adaptée à la haute résolution (prise en compte du relief et de la bidirectionnalité de la réflectance des matériaux). [Martinoty, 2005] et [Lachérade, 2006] utilisent cette modélisation pour estimer la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function [Nicodemus et al., 1977]) ou l'albédo à partir d'images aériennes ou spatiales. [Doz et al., 2008] l'ont également reprise pour estimer les effets bidirectionnels de la réflectance à partir d'images aériennes multi-angulaires à très haute résolution.
Dans le domaine de la vision par ordinateur, des méthodes inverses ont été développées pour estimer la réflectance sous différentes hypothèses et conditions ; L'état de l'art décrit par [Patow et Pueyo, 2004] introduit une taxonomie complète des problèmes de transfert radiatif inverses, classés suivant le niveau de connaissance et/ou de contrôle de la géométrie, de l'illumination et de la réflectance de la scène, ainsi que sur le nombre d'images disponibles (qui forment les observations du problème). Le présent article se situe dans le cadre d'une géométrie et d'une illumination (décrite par la connaissance du soleil et de l'atmosphère) connues avec des observations multi-angulaires : c'est donc un problème de réflectométrie inverse. Ce type de problème est généralement traité par une approche analyse/synthèse [Boivin et Gagalowicz, 2001] telle que celle décrite sur la figure 6.
Cependant, ces méthodes ne sont pas complètement adaptées au cas présenté ici. Les réflexions multiples entre objets ne sont pas toujours prises en compte [Lensch et al., 2003], alors qu'elles sont importantes pour des images urbaines. [Yu et al., 1999] utilisent un très grand nombre d'images multi-angulaires pour être sûr d'avoir de l'information dans la direction spéculaire des surfaces ; ce n'est pas le cas lors d'une acquisition terrestre avec un véhicule. De même, l'utilisation d'une source de lumière quasi- ponctuelle et dont la position peut être changée [Machida et al., 2007] n'est pas possible ici.

1.4. Organisation de l'article

L'article présente la modélisation physique de la luminance au niveau du capteur, en expliquant les différents phénomènes pris en compte.
Les différentes techniques de simulation de cette luminance sont ensuite brièvement présentées, avant une description de la méthode de lancer de rayons, choisie ici, et une validation de l'outil implémenté.
La méthode d'inversion est ensuite exposée dans son principe général, puis le lancer de rayons formel est introduit dans le but d'optimiser la méthode. Une validation est réalisée sur une scène synthétique, dans le cas lambertien et dans le cas d'une BRDF présentant un noyau lambertien et un noyau parfaitement spéculaire. Les limites de la méthode sont alors mises en évidence et discutées.

2. Modélisation radiométrique d'une image terrestre urbaine

2.1. Les différents phénomènes radiatifs

Dans le domaine réflectif, pour un capteur au sol visant un point P, la luminance incidente, $L_{capteur}$, est le résultat de plusieurs contributions radiatives : une composante directe L_{direct} correspondant aux différents éclairements incidents en P et directement transmis vers le capteur (figure 1), et une composante parasite $L_{parasite}$ correspondant aux éclairements incidents diffusés dans l'angle solide du capteur dans la direction du capteur (figure 2).
L'expression de la luminance pour un pixel i du capteur, voyant un angle solide élémentaire Ω_i, s'écrit donc :

$$L_{capteur}(i) = L_{direct}(i) + L_{parasite}(i) \qquad (1)$$

Sur les figures 1 et 2, ETOA est l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère ; Edirect est l'éclairement solaire direct incident au point P ; Ediffus est l'éclairement atmosphérique descendant dû à la diffusion des rayons solaires par les molécules et aérosols présents dans l'atmosphère, incident au point P ; Erefl est l'éclairement dû aux réflexions multiples entre éléments de la scène 3D ; enfin, E couplage est l'éclairement dû aux multiples réflexions entre le sol et l'atmosphère, incident au point P .
La luminance directe Ldirect s'exprime en fonction de l'éclairement total incident en P, et de la réflectance bidirectionnelle ρdd associée au matériau en P :

$$L_{direct}(i) = \int_{P \in \Omega_i} \int_{\vec{\omega_P} \in \Omega_P} \frac{E(P, \vec{\omega_P})}{\pi} \rho_{dd}(\vec{\omega_P}, \vec{PC})\, d\vec{\omega_P}\, dP \qquad (2)$$

où Ω_p est l'angle solide centré en P, correspondant à l'hémisphère au-dessus du point P ; C est le centre optique du capteur ; T(PC) est la transmission le long du trajet PC ; $E(P,\omega_P)$ est l'éclairement total arrivant en P

dans la direction de l'angle solide ω_P. Cet éclairement total incident en P est défini par :

$$E(M)=E_{direct}(M)+E_{diffus}(M)+E_{réfl}(M)+E_{couplage}(M) \quad (3)$$

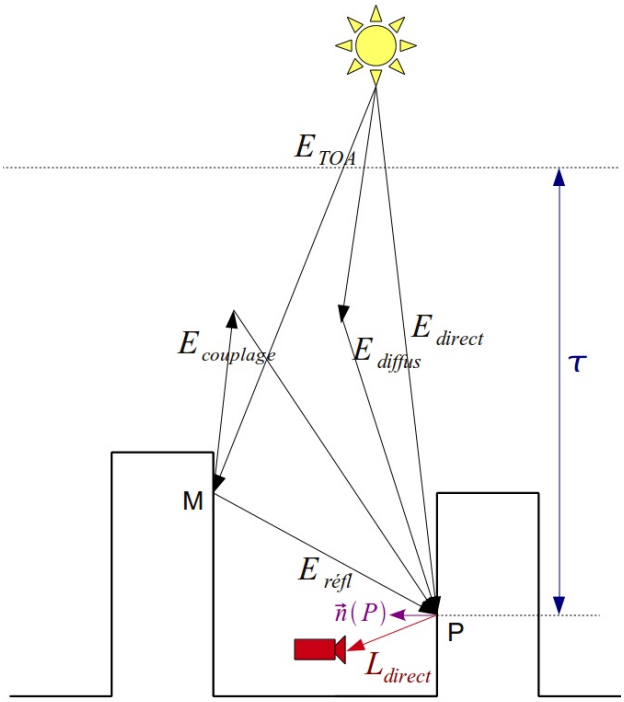

Figure 1 : Les composantes de la luminance directe.

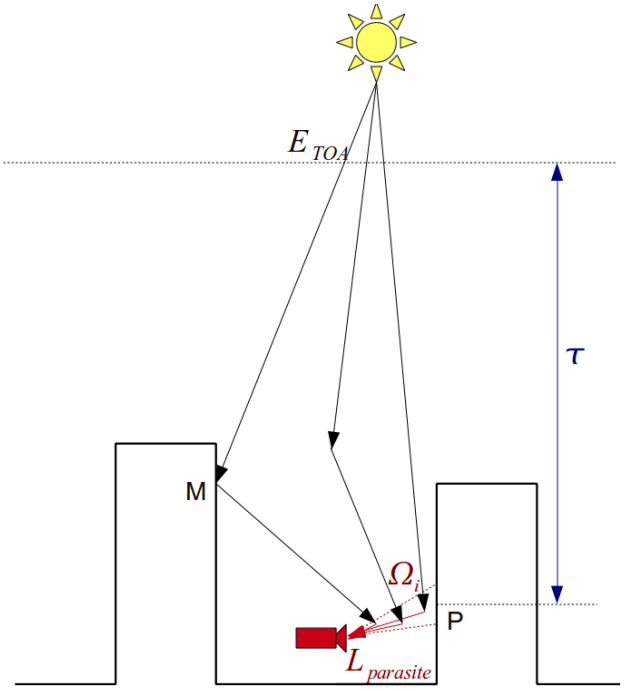

Figure 2 : Les composantes de la luminance parasite.

2.2. Spécificités de l'imagerie terrestre

L'imagerie urbaine à haute résolution présente des difficultés 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 basse résolution, ne pourra plus l'être ici, où le sujet est justement le « relief » urbain : les bâtiments [Miesch, 1999]. De même, les effets directionnels de la réflectance des matériaux ne pourront plus être négligés : les angles de visées et d'incidence solaire présentent des variations très importantes, allant jusqu'à des visées rasantes. L'hypothèse lambertienne ne reflètera donc que très imparfaitement les phénomènes réels [Martinoty, 2005].

En revanche, les distances entre la cible et la caméra sont faibles ; le faible volume d'atmosphère intervenant permet donc de négliger l'atténuation le long du trajet 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 négligera ainsi cette atténuation dans la suite. 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 est également négligée.

3 Simulation

3.1. Choix d'une méthode de simulation

L'expression analytique de ces différents termes est complexe dans le cas traité dans ces travaux, car elle nécessite une description des surfaces de la scène en facettes homogènes, menant à des problèmes de discrétisation et à des temps de calcul importants [Doz et al., 2008].

De plus, les méthodes numériques de calcul développées en synthèse d'images (physique ou non) sont intéressantes pour la simulation [Dutré et al., 2003], mais doivent prendre en compte les effets directionnels et être non biaisées.

Pour ces raisons, la méthode proposée ici utilise la technique du lancer de rayons par *path tracing* [Pharr et Humphreys, 2004], désigné par la suite simplement par « lancer de rayons ».

Cette technique présente l'avantage de ne pas nécessiter d'hypothèse restrictive sur les phénomènes physiques pouvant être pris en compte. En effet, les seules hypothèses faites sur le rayonnement sont celles de l'optique géométrique (on n'a donc pas de prise en compte de la diffraction). Sont ainsi prises en compte l'absorption, l'émission propre et la dispersion dans les différents milieux composant la scène. Cependant, dans les travaux présentés ici, on utilise les caractéristiques du rayonnement dans les fenêtres atmosphériques du domaine visible et proche infrarouge, avec des conditions atmosphériques favorables (faible contenu en vapeur d'eau et en aérosols). Dans ce cas, l'émission propre est

négligeable, et l'atmosphère est transparente sur des courtes distances. Le principal phénomène modélisé est alors la réflexion caractérisée par la réflectance bidirectionnelle, qui peut être décrite soit par des données tabulées soit par un modèle paramétrique.
Un autre avantage du lancer de rayons est la généricité induite par la gestion de la géométrie 3D : on ne doit connaître que la normale à la surface au point atteint par un rayon. Cela évite d'avoir recours à une discrétisation des surfaces (par exemple par un maillage triangulaire).

3.2. Principe du lancer de rayons

Le calcul de la luminance en chaque point de la caméra s'effectue par intégration Monte-Carlo sur un grand nombre de rayons lumineux simulés entre la caméra et les sources primaires de lumière.
L'équation radiométrique locale en un point M est une simple traduction de la conservation de l'énergie [Kajiya, 1986] :

$$L(M,\vec{\omega},\lambda)=L_{émis}(M,\vec{\omega},\lambda) + \int_{\vec{\omega}_i \in Sphère} f(M,\vec{\omega},\vec{\omega}_i,\lambda).L_{incident}(M,\vec{\omega}_i,\lambda).d\vec{\omega}_i \quad (4)$$

Dans le cas d'un point à la surface d'un objet opaque sans émission propre à la longueur d'onde λ, cette équation devient :

$$L(M,\vec{\omega},\lambda)=\int_{\vec{\omega}_s \in hémisphère} \rho_{dd}(M,\vec{\omega},\vec{\omega}_i,\lambda) .L_{incident}(M,\vec{\omega}_s,\lambda).\langle \vec{n}_M,\vec{\omega}_s\rangle d\vec{\omega}_s \quad (5)$$

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 calcule, pour chaque pixel (i,j) de l'image à simuler, les contributions d'un grand nombre N de rayons. Ces rayons vont des sources de lumière à un point (x_k,y_k) du capteur situé dans le support de la PSF au pixel (i,j). Chaque rayon k porte la luminance $L(x_k,y_k)$ apportée au point (x_k,y_k) du capteur par un chemin possible C(k) de la lumière dans la scène, choisi aléatoirement selon une certaine densité de probabilité pdf(C(k)).

$$L(i,j)=\frac{1}{\sum_{k=1}^{N} psf_{i,j}(x_k,y_k)}\sum_{k=1}^{N}\frac{psf_{i,j}(x_k,y_k).L(x_k,y_k)}{pdf(C(k))} \quad (6)$$

La somme, pondérée par la probabilité des chemins suivis, des contributions de tous les rayons (6) est l'estimateur Monte-Carlo de la luminance reçue au pixel (i,j), intégrée sur tous les chemins possibles depuis les sources. Cette somme est également pondérée par la PSF (fonction d'étalement du point ou réponse impulsionnelle) du système optique.

3.3. Optimisations et tirage aléatoire des chemins

Le critère d'arrêt du chemin d'un rayon dépend de deux facteurs. Premièrement, l'utilisateur fixe un nombre maximal de réflexions autorisées. Ensuite, un tirage aléatoire dit « roulette russe » décide à chaque nouvelle interaction avec une surface si le chemin s'arrête ou non, avec une probabilité qui augmente avec le nombre d'interactions déjà subies [Pharr et Humphreys, 2004]. En effet, les contributions des rayons décroissent avec le nombre de réflexions subies (qui multiplient la contribution par une valeur inférieure à 1) ; on a donc intérêt à utiliser davantage de rayons ayant peu d'interactions avec les surfaces si l'on veut une convergence rapide.
De même, le tirage aléatoire des directions de réflexions des rayons se fait par échantillonnage préférentiel pour limiter la variance de l'estimation et converger plus rapidement [Veach, 1997]. Il s'agit, à chaque interaction du rayon avec une surface, d'utiliser la valeur de la BRDF comme densité de probabilité pour les différentes directions de l'hémisphère. Ainsi, les directions où la réflectance est forte, et donc où la contribution en luminance est importante, seront plus fortement échantillonnées.
En pratique, si le rayon voit son chemin arrêté lors de l'interaction avec une surface, l'échantillonnage préférentiel est multiple : la densité de probabilité utilisée combine la BRDF et la répartition de la puissance des sources lumineuses dans l'hémisphère supérieur.

3.4. Implémentation d'un outil de simulation

D'un point de vue pratique, le logiciel de rendu par lancer de rayons LuxRender a été choisi pour l'implémentation de la simulation. Il s'agit d'une version avec interface homme-machine de PBRT (Physically-Based Ray-Tracing), qui lui sert de noyau et lui apporte donc une simulation basée sur les lois de la physique [Pharr et Humphreys, 2004]. Il est également *open source* et gratuit, et possède une interface avec le modeleur 3D Blender, facilitant son utilisation et sa modification.
En toute rigueur, le calcul de la diffusion et de la transmission le long des rayons doit être réalisé en prenant en compte la répartition volumique des particules atmosphériques diffusantes (aérosols et molécules). Cette répartition n'est pas accessible facilement lors d'une acquisition ; pour pouvoir prendre en compte la diffusion en n'utilisant que quelques paramètres atmosphériques globaux facilement observables (tels la visibilité horizontale), et non une caractérisation volumique complète, on utilise une *environment map* (figure 3). Il s'agit d'une image tabulant, pour chaque direction dans l'hémisphère au dessus de la scène, la valeur de la luminance diffuse du ciel. Cela suppose néanmoins que les particules diffusantes situées au sein de la scène soient négligées ; c'est une hypothèse déjà adoptée (cf. partie 2.2.).
Le code de transfert radiatif 6S [Vermote et al, 1997] est utilisé pour calculer la luminance diffuse du ciel pour chaque direction (θ,φ). 6S offre la possibilité de définir les propriétés atmosphériques de différentes façons, en fonction des données disponibles, allant d'une description de la densité en gaz et en aérosols en fonction de l'altitude (hypothèse plan-parallèle) accessible par des mesures météorologiques, à une simple valeur de visibilité horizontale, observable depuis le sol. Cependant, lors du traitement d'une acquisition réelle, la précision de

l'estimation de la luminance diffuse du ciel et de l'éclairement solaire direct dépend de la quantité de données fournies.

Figure 3 : Exemple d'environment map calculée avec 6S.

3.5. Validation

L'outil de simulation a été validé numériquement sur des scènes synthétiques simples, avec un matériau homogène et lambertien, et une *environment map* constante unitaire. Les résultats sont présentés sur la figure 4 pour un canyon infini, pour lequel on peut calculer analytiquement la luminance au capteur, ce qui est possible dans le cas lambertien avec des sources de lumière simples. Les écarts constatés (figure 5) au niveau des discontinuités sont principalement dus à la pixellisation. On constate de plus la présence de bruit stochastique, inhérent à la technique d'intégration par méthode de Monte-Carlo. De plus, une comparaison de résultats avec l'outil AMARTIS V2 [Doz et al., 2008] a été réalisée dans le cas d'une prise de vue aérienne. Celle-ci a montré une très bonne cohérence entre les deux outils, avec des différences faibles (inférieures à 5% sur l'éclairement total) liées principalement à une différence dans la gestion de la géométrie (discrétisation en facettes ou utilisation de la normale locale).

Figure 4 : Validation de l'outil de simulation : image de luminance monochromatique à 550 nm simulée sur une scène de canyon.

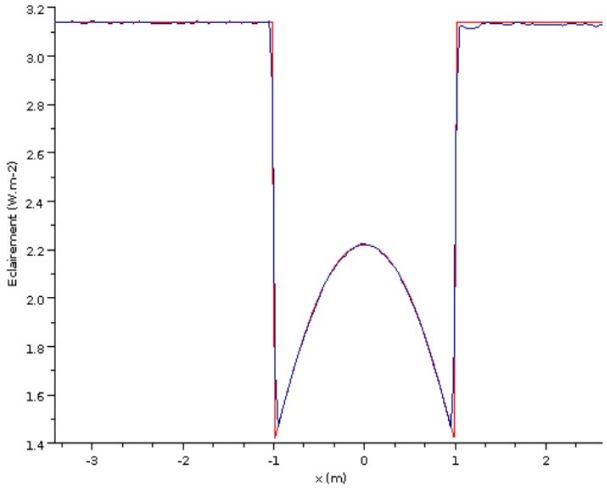

Figure 5 : Validation de l'outil de simulation : profils théorique (en rouge) et simulé (en bleu) de la luminance capteur, sur la scène du canyon.

4 Inversion : principe et lancer de rayons formel

4.1. Cadre et données en entrée

Le but est de retrouver la réflectance des matériaux d'une scène urbaine, à partir d'un jeu d'images terrestres haute résolution (de l'ordre du cm), acquises par un véhicule. La géométrie des caméras et leur calibration sont supposées connues.
Pour cela, le modèle 3D, segmenté en zones de réflectance homogène, est considéré comme disponible comme donnée d'entrée. L'obtention d'un tel modèle, ainsi que l'influence de ses imperfections, ne sont pas étudiés ici. Néanmoins, les acquisitions à traiter étant réalisées par un véhicule pourvu de caméras et de scanners LIDAR, il est envisageable d'utiliser conjointement les données images et LIDAR pour reconstruire le modèle 3D segmenté. En ce qui concerne les données images, on pourra se reporter à [Lafarge et al., 2010] pour un état de l'art sur la reconstruction 3D, et à [Burochin et al., 2010] pour la segmentation de façades. Pour la reconstruction de façades à partir de données LIDAR terrestres, on pourra se reporter à [Hammoudi et al., 2010].
La réflectance des matériaux est décrite par un ou plusieurs modèles de BRDF, dont les paramètres sont à estimer. Les conditions atmosphériques permettant de calculer l'éclairement diffus du ciel sont également considérées comme connues. Une piste de réflexion pourrait d'ailleurs être la reconstruction de la luminance de l'hémisphère céleste directement à partir des images, pour s'affranchir de toute observation météorologique.

4.2. Principe général de l'inversion

Dans le cas lambertien, on peut exprimer l'albédo ρ en fonction de l'éclairement total reçu et de la luminance mesurée par le capteur, car, ne dépendant pas des directions incidentes et sortantes, il peut être sorti des

expressions intégrales. En négligeant toujours la luminance parasite et l'atténuation sur les trajets au sein de la scène, on a donc :

$$\rho = \pi \frac{L_{capteur}}{E_{total}} \qquad (7)$$

L'éclairement total dépend lui-même de l'albédo des matériaux environnants, à travers l'éclairement réfléchi.
Dans le cas général, la réflectance est représentée par un modèle paramétrique de BRDF plus ou moins complexe (voir [Jacques, 2002] pour un panorama des modèles existants), ne permettant pas l'utilisation de l'équation (7).
Les paramètres du modèle de BRDF des matériaux sont donc estimés par minimisation de l'écart entre les images réelles acquises et les images simulées par lancer de rayons avec les mêmes conditions d'orientation et de position de la caméra.
La fonction coût à minimiser est :

$$\epsilon = \sum_{images} \sum_{(i,j)} \left(L_{simulée}(i,j) - L_{réelle}(i,j) \right)^p \qquad (8)$$

De par la nature récursive du problème à inverser, une estimation itérative suivant le principe décrit sur la figure 6 est alors réalisée.

4.3. Lancer de rayons formel

L'image simulée utilisée pour la minimisation est calculée pour un jeu de paramètres de BRDF des matériaux donné. Ce jeu de paramètres est défini avant le lancer de rayons, et change donc à chaque itération du processus de minimisation. Cela nécessite donc de refaire le lancer de rayons (calcul très coûteux en temps) à chaque itération.
Pour s'affranchir de ce problème, le lancer de rayons est réalisé de façon formelle 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. On a donc, pour chaque pixel (i,j) :

$$L(i,j) = f_{i,j}\left(\left(p_k \right)_{k=1}^{Nb_{paramètres}} \right) \qquad (9)$$

où les p_k sont les 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 rayon, qui est choisi par l'utilisateur. En effet, la luminance portée par un rayon décroît avec la longueur de son trajet (multiplication par des grandeurs ≤ 1 : la transmission, la réflectance, l'atténuation géométrique). Les termes réfléchis d'ordre supérieur à un certain entier N sont donc négligés.
Par exemple, pour une scène composée d'un unique matériau lambertien, l'ensemble des paramètres p_k se réduit à l'albédo ρ du matériau.

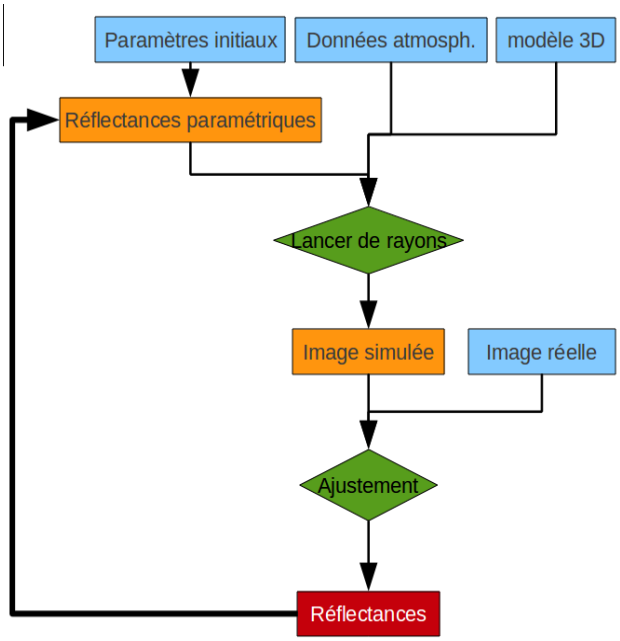

Figure 6 : Principe général de l'estimation de réflectance.

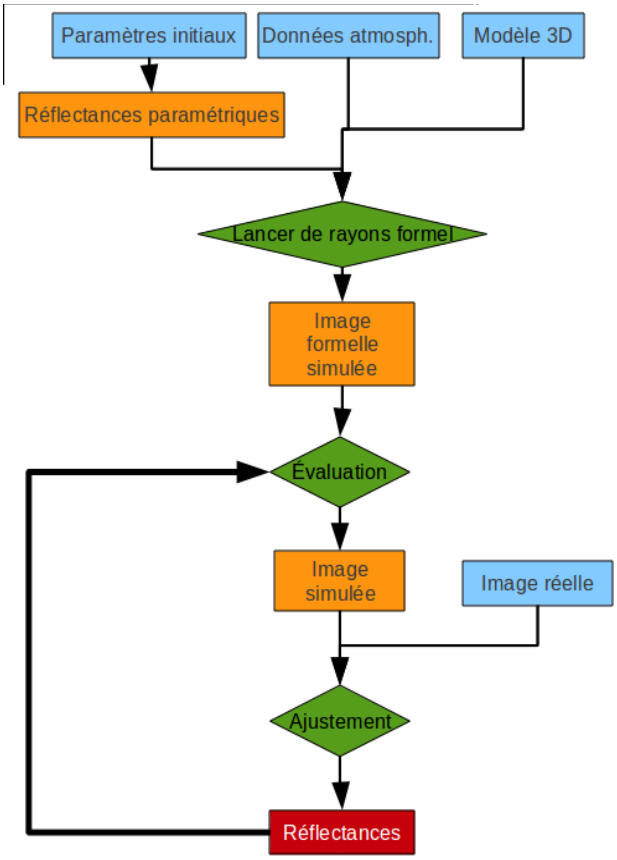

Figure 7 : Principe de l'estimation de réflectance avec lancer de rayons formel.

La fonction $f_{i,j}$ représentant la luminance d'un pixel est un polynôme en ρ, de degré maximal le nombre de réflexions autorisées :

$$L(i,j)=\sum_{k=0}^{N}\alpha_k(i,j)\rho^k \quad (10)$$

Les coefficients numériques $\alpha_k(i,j)$ de ces fonctions sont calculés par le lancer de rayons formel, et dépendent de l'atténuation géométrique et de la probabilité des différents rayons 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.
Le lancer de rayons formel permet de ne réaliser qu'un seul rendu pour tout le processus de minimisation ; le principe de l'inversion devient donc celui présenté sur la figure 7.

4.4. Nombre de termes de la luminance formelle

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

4.4.1 Cas lambertien

Dans le cas lambertien, on considère une scène possédant M matériaux, d'albédos ρ_i . Le nombre maximum de réflexions autorisées pendant le rendu est N. Chaque rayon a pour valeur de luminance un produit d'albédos pondéré par un coefficient dépendant de la transmission du milieu et de la géométrie de la scène. Un pixel est la somme pondérée de plusieurs rayons. Il s'agit donc d'un polynôme multivarié à M indéterminées.
Le nombre de termes maximal de ce polynôme est le nombre de combinaisons possibles pour le produit d'albédos porté par un rayon. Ce produit peut avoir k facteurs, avec k entre 0 et N. Ces facteurs sont pris avec répétition éventuelle parmi les ρ_i . 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 suivant :

$$C_{M+k-1}^{k}$$

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

$$Nb_{termes/pixel}(N,M)=\sum_{k=0}^{N}C_{M+k-1}^{k} \quad (11)$$

Cette expression se simplifie par la considération suivante : le produit de k<N termes est le produit de N termes dont N-k sont égaux à 1. On a donc une N-combinaison parmi M+1 éléments, qui sont les ρ_i et la constante 1. D'où :

$$Nb_{termes/pixel}(N,M)=C_{M+N}^{N} \quad (12)$$

Ce nombre grandit rapidement avec N et M, mais reste fini ; le tableau 1 donne quelques exemples numériques.

	N=1	N=2	N=3
M=1	2	3	4
M=2	3	6	10
M=3	4	10	20
M=4	5	15	35
M=5	6	21	56
M=10	11	66	286
M=20	21	231	1 771

Tableau 1 : Nombre de termes maximal, dans le cas lambertien.

4.4.2 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. Il faut pour cela que le modèle soit une combinaison linéaire de noyaux non paramétrés. On appelle ici noyau une fonction simple 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 réflectif complet du matériau.
Les modèles les plus couramment utilisés, comme les modèles de [Torrance et 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 des rayons ; le nombre de termes 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 limitée, ce qui pose un problème pratique : il faut trouver un compromis entre limitation du bruit stochastique dû à l'intégration 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.

4.5. Implémentation de l'algorithme d'inversion

La méthode décrite précédemment a été implémentée en réalisant un module de lancer de rayons formel et un module de minimisation utilisant l'image de luminance formelle.
Le lancer de rayons formel a été intégré directement dans le code de LuxRender, en sauvegardant à chaque étape

du lancer de rayons la fonction luminance au lieu de sa valeur numérique, jusqu'à l'écriture de l'image qui est remplacée par l'export d'une matrice de fonctions luminances $f_{i,j}$. Les expressions formelles sont gérées par la bibliothèque *open source* GiNaC.
La minimisation est implémentée dans un programme indépendant utilisant la bibliothèque GiNaC pour la lecture de la matrice de fonctions luminances, et la bibliothèque *open source* GSL (GNU Scientific Library) pour l'estimation des paramètres (algorithme de gradient conjugué).

5 Résultats : estimation de réflectance sur des images synthétiques

5.1. Validation dans le cas lambertien

La validation de la méthode d'inversion exposée précédemment est effectuée sur des images synthétiques d'une scène de carrefour urbain (figure 8), 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, les réflexions d'ordre supérieur étant négligeables [Lachérade, 2006].
Sont ainsi simulées deux images de référence depuis deux points de vue différents, l'un aérien vertical et l'autre terrestre horizontal (figure 8). 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 rayons 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 2.
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%.

5.2. Utilisation d'un modèle de BRDF à noyaux

Pour les matériaux réels, l'hypothèse lambertienne reflète imparfaitement le comportement réflectif ; il est donc nécessaire de pouvoir utiliser des modèles plus réalistes.

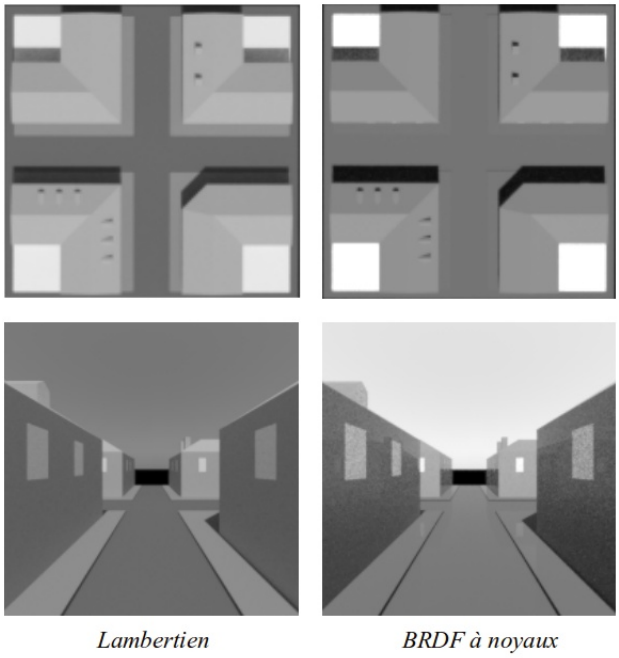

Figure 8 : Images simulées sur la scène du carrefour (les niveaux de gris ne sont pas comparables entre les deux modèles, les paramètres d'affichage étant différents pour éviter les zones saturées ou trop sombres).

Cela pose néanmoins un problème pratique lors du lancer de rayons formel, comme souligné dans la partie 4.4.2. Un modèle linéaire par rapport aux paramètres est donc choisi : 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) :

$$\rho_{dd}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_d + \rho_{s.}\, \delta_{(\theta_r = \theta_i)} . \delta_{(\phi_r = -\phi_i)} \quad (13)$$

où ρ_d et ρ_s règlent l'importance de la partie diffuse et de la partie spéculaire.
La scène et les conditions utilisées sont les mêmes que pour la section 5.1 ; seules les propriétés des matériaux changent. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.
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 (voir la figure 9, sur laquelle on voit la convergence au cours de la minimisation).

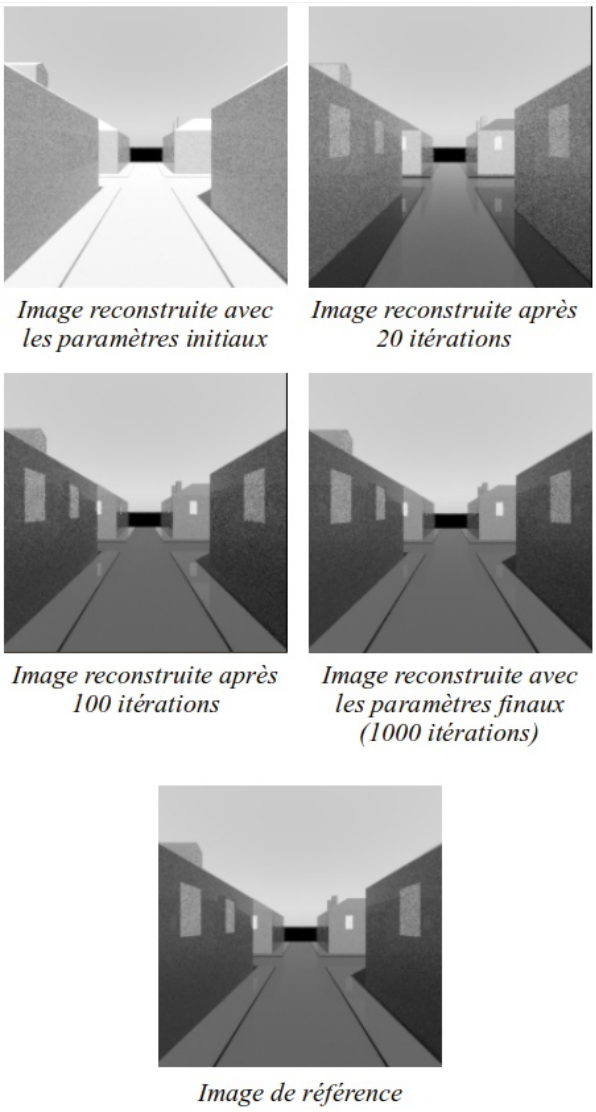

Figure 9 : Estimations itératives successives des paramètres de réflectance dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire.

Objet	Albédo de référence	Albédo estimé	Erreur relative	Erreur rel., 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 %

Tableau 2 : Résultats de l'inversion dans le cas lambertien.

Objet	ρ_d référence	ρ_d estimé	Erreur relative	ρ_s référence	ρ_s estimé	Erreur relative
Trottoir	0.015	0.0150	-0.039 %	0.135	0.1374	1.8 %
Route	0.014	0.0140	0.088 %	0.056	0.0554	-1.1 %
Toits	0.030	0.0300	-0.012 %	0.270	0.2698	-0.073 %
Fenêtres	0.378	0.3748	-0.85 %	0.042	0.0656	36 %
Murs	0.084	0.0835	-0.56 %	0.336	0.3387	0.79 %
Jardin	0.320	0.3197	-0.11 %	0.480	0.4975	3.5 %

Tableau 3 : Résultats de l'inversion dans le cas d'un modèle de BRDF à noyaux lambertien et spéculaire.

6 Conclusion et perspectives

6.1. Bilan

Dans ce travail, une nouvelle approche est proposée pour l'estimation de réflectance dans le cadre de l'imagerie terrestre urbaine à haute résolution spatiale. Le lancer de rayons formel permet une simplification de l'algorithme de minimisation, ne nécessitant alors qu'un seul rendu. Les résultats pour une scène synthétique avec un modèle lambertien montrent une très bonne qualité de l'estimation, avec une erreur de l'ordre de 0,1 % en utilisant deux images de deux points de vue différents. De même, l'estimation avec un modèle de BRDF linéaire à noyaux diffus et spéculaire donne de très bons résultats pouir la partie diffuse (erreur inférieure à 1%), et des résultats corrects pour la partie spéculaire. Cette méthode pose néanmoins un problème pratique lors de l'utilisation d'un modèle de BRDF non-linéaire par rapport aux paramètres : le nombre de termes de la luminance formelle n'est pas fini.

6.2. Perspectives

Afin de vérifier la validité physique de la modélisation, il sera nécessaire de tester la méthode sur des données réelles. En effet, un certain nombre de facteurs peuvent être critiques pour des applications futures.
Il faut en premier lieu que le modèle de BRDF utilisé modélise correctement le comportement des matériaux, notamment pour les angles rasants (configuration très fréquente pour les acquisitions terrestres urbaines : angle de vue sur le haut des bâtiments, angle entre la normale et la direction solaire pour les surfaces verticales). Un modèle simple comme celui utilisé dans la section 5.2 devra donc être remplacé par un modèle plus réaliste. L'utilisation d'une base de fonctions adaptée peut alors être envisagée pour linéariser le problème [Ozturk et al., 2008].
Un autre point important est la segmentation initiale du modèle 3D. Les zones définies ne sont pas parfaitement homogènes, du fait de la texture du matériau, de différents degrés d'usure, de la présence de salissures, etc. Il pourrait donc être intéressant de considérer une réflectance présentant des variations locales. Les travaux de [Yu et al., 1999], par exemple, vont dans ce sens en considérant une partie spéculaire homogène par zone et une partie diffuse (lambertienne) variant spatialement au sein de chaque zone.

Références

Boivin S., Gagalowicz A., 2001. *Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image*. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 107-116.

Burochin J.P., Vallet B., Tournaire O., Paparoditis N., 2010. *A Formulation For Unsupervised Hierarchical Segmentation Of Façade Images With Periodic Models*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38(Part 3), Saint-Mandé, France, pp. 227-232.

Doz S., Thomas C., Lachérade S., Briottet X., Boldo D., Lier P., Porez-Nadal F., 2008. *Simulation of high spatial resolution images for urban remote sensing*. Dans: International Conference of Space Optics, Toulouse, France.

Dutré P., Bala K., Bekaert P., 2003. *Advanced global illumination*. AK Peters Ltd, Wellesley, Massachussets.

Hammoudi K., Dornaika F., Soheilian B., Paparoditis N., 2010. *Extracting Outlined Planar Clusters of Street Facades from 3D Point Clouds*. Dans : Canadian Conference on Computer and Robot Vision, Ottawa, Canada, pp. 122-129.

Jacques M., 2002. *Etude de modèles de BRDF adaptés au milieu urbain à haute résolution*. Rapport de stage du DESS Optiques et Matériaux, Université Paris 7.

Kajiya J.T., 1986. *The rendering equation*. Dans : 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Dallas, Etats-Unis, pp. 143-150.

Lachérade S., 2006. *Caractérisation des propriétés optiques des matériaux urbains à partir d'images de télédétection à très hautes résolutions spatiale et spectrale*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace.

Lafarge F., Keriven R., Brédif M., 2010. *Insertion of 3D-primitives in mesh-based representations: Towards compact models preserving the details*. IEEE Transactions on Image Processing 19(7), pp. 1683-1694.

Lensch H., Kautz J., Goesele M., Heidrich W., Seidel H.P., 2003. Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail. ACM Transactions on Graphics 22(2), pp. 234-257.

Machida T., Takemura H., Yokoya N., 2007. *Inverse reflectometry for real objects with diffuse and specular interreflections*. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 90(1), pp. 40-60.

Martinoty G., 2005. *Reconnaissance de matériaux sur des images aériennes en multirecouvrement, par identification de fonctions de réflectances bidirectionnelles*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.

Miesch C., 1999. *Quantification des effets de l'hétérogénéité et du relief d'une scène en télédétection: modélisation du signal en entrée du capteur*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace.

Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., Ginsberg I.W., Limperis T., 1977. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Final Report, National Bureau of Standards, Washington DC. Inst. for Basic Standard.

Ozturk A., Kurt M., Bilgili A., Gungor C., 2008. *Linear approximation of bidirectional reflectance distribution functions*. Computers & Graphics 32(2), pp. 149-158.

Patow G., Pueyo X., 2004. *A survey of inverse rendering problem*. Computer Graphics Forum 22, pp. 663-687.

Pharr M., Humphreys G., 2004. *Physically based rendering*. Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, Etats-Unis.

Pickup G., Chewings V.H., Pearce G., 1995. *Procedures for correcting high resolution airborne video imagery*. International Journal of Remote Sensing 16(9), pp. 1647-1662.

Torrance K.E., Sparrow E.M., 1967. *Theory for off-specular reflection from roughened surfaces*. Journal of the Optical Society of America 57(9), pp. 1105-1114.

Veach E., 1997. *Robust Monte-Carlo methods for light transport simulation*. Thèse de doctorat, Université de Stanford, USA.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcette J.J., 1997. *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(3), pp. 675-686.

Walthall C.L., Norman J.M., Welles J.M., Campbell G., Blad B.L., 1985. *Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surface*. Applied Optics 24(3), pp. 383-387.

Ward G.J., 1992. *Measuring and modeling anisotropic reflection*. Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Chicago, USA, 265-272.

Yu Y., Debevec P., Malik J., Hawkins T., 1999. *Inverse global illumination : recovering reflectance models of real scenes from photographs*. Dans : 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Los Angeles, Etats-Unis, pp. 215-224.