

EFFETS RADIOMETRIQUES EN MILIEU URBAIN A GRANDE ECHELLE ET CORRECTION DES OMBRES

G. Martinoty⁽¹⁾, D. Boldo⁽¹⁾, H. Le Men⁽¹⁾, S. Jacquemoud⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut Géographique National, 2-4 avenue Pasteur, 94165 St Mandé Cedex

⁽²⁾ Université Paris 7 - Denis Diderot, Case Postale 7071, 2 place Jussieu 75251 Paris Cedex 05

Article soumis le 29 juin 2004 et accepté le 30 janvier 2005. Version finale reçue le 15 février 2005

Résumé

Nous avons développé un outil de simulation des éclairagements arrivant sur une scène urbaine réelle modélisée en 3D. Cet outil nous a permis de mettre en évidence l'importance des différents termes provenant du soleil, du ciel, ou des réflexions sur les bâtiments. Nous montrons notamment que ce dernier terme peut devenir prépondérant devant les autres dans les rues encaissées, nombreuses dans les centres-villes. D'autre part, nous avons également modélisé les variations du terme de voile atmosphérique au sein des images. L'ensemble de ces résultats a été mis à profit pour effectuer des corrections des ombres sur des zones du centre-ville d'Amiens. Les résultats obtenus montrent que la prise en compte des trois types d'éclairage précédents, ainsi qu'une bonne modélisation du voile atmosphérique, sont nécessaires et suffisantes pour obtenir des corrections satisfaisantes.

Mots Clés : milieu urbain, simulations, modèles 3D, effets radiométriques, correction des ombres.

Abstract

We have developed a tool simulating irradiances on a 3D model of a real urban scene. This tool allowed us to assess the relative importance of energies coming from the sun, from the sky or from reflections on surrounding buildings. In particular, we highlighted that reflected energies may become larger than other ones in narrow streets, which are very common downtown. Secondly, we also modeled the variations of the atmospheric haze inside images. All these results were used to correct shadows in downtown Amiens. Our results show that taking into account the three irradiances described previously, and modeling the atmospheric haze well, are necessary and sufficient to get satisfying results.

Keywords : urban areas, simulations, 3D models, radiometric effects, shadow correction.

1. Introduction

Les avancées récentes dans le domaine des caméras aériennes permettent d'obtenir sans difficulté des images numériques à très haute résolution spatiale, les pixels pouvant facilement atteindre une résolution de 20 cm. De même, le domaine des nouveaux capteurs satellite haute résolution (résolution inférieure au mètre), tels que QuickBird, Ikonos et bientôt Pléiades, est en plein développement. Ces capteurs apportent de nouvelles informations, à la fois géométriques et radiométriques, sur la structure tridimensionnelle de la scène observée. Dans cet article, nous nous intéresserons plus particulièrement aux effets radiométriques induits par les bâtiments et les autres structures présentes en milieu urbain. Aux résolutions considérées, les scènes urbaines apparaissent comme un environnement « rugueux », ce qui entraîne diverses spécificités radiométriques. On peut tout d'abord noter l'omniprésence des ombres. D'autre part, l'existence du sursol implique de tenir compte des phénomènes de réflexions multiples entre les bâtiments en vis-à-vis dans les « canyons » des rues. On parle souvent dans ce cas de « rétro-éclairage » des façades.

Ces caractéristiques, propres aux images à haute résolution spatiale, n'ont commencé à être prises en compte que récemment. Nous rappellerons quelques travaux antérieurs pertinents sur ces questions dans la

section 2. Pour notre part, nous avons développé un outil de simulation des éclairagements reçus sur une scène quelconque, décrite par un modèle vecteur 3D, qui sera détaillé dans la section 3. Nous avons utilisé cet outil pour évaluer l'importance des différents termes dans le cas d'une rue du centre d'Amiens (section 4). L'intérêt de se placer dans un cas réel est que l'on peut valider les ordres de grandeur des éclairagements obtenus notamment par le biais de la correction des ombres sur les images. En effet, si les simulations sont en accord avec la réalité, il doit être possible de « rééclairer » les zones à l'ombre dans les images aériennes réelles correspondant à la scène simulée, et ainsi d'obtenir une teinte réaliste en accord avec les zones au soleil voisines. Nous verrons comment et pour quels résultats dans la section 5. La correction des ombres présente de plus un intérêt intrinsèque pour améliorer la qualité radiométrique des images. En effet, la correction des ombres permet d'obtenir une meilleure dynamique globale des images, en donnant la possibilité de discerner simultanément les détails initialement à l'ombre et ceux au soleil. On peut ainsi exploiter pleinement la grande sensibilité des caméras numériques et profiter de leur excellent rapport signal/bruit dans les zones d'ombre.

2. Travaux antérieurs

En ce qui concerne les scènes d'intérieur, les travaux de [LOSCOS et al 98] notamment permettent d'évaluer et d'effacer les ombres d'une scène grâce à des algorithmes d'éclairage global. Ce cas est cependant plus simple que celui des scènes d'extérieur, en raison de la complexité moindre de la géométrie des scènes simulées et de la meilleure maîtrise des conditions d'éclairage. A notre connaissance, ces techniques n'ont jusqu'à présent pas été utilisées pour traiter des scènes d'extérieur.

Dans le cas de scènes d'extérieur, [LE MEN et al 02] ont proposé une approche permettant de corriger les effets radiométriques sur des images de scènes de montagne. Une modélisation analytique approchée leur permet de corriger les ombres en prenant en compte notamment les effets de rétro-éclairage, qui peuvent devenir dominants sur des zones très pentues à l'ombre. [BOLDO 02] a utilisé le même modèle dans le cas d'images panchromatiques numériques de zone urbaine à très grande échelle. Dans les deux cas précédents, les résultats obtenus ont cependant montré que les approximations effectuées dans la modélisation radiométrique ne permettent pas de corriger complètement tous les effets radiométriques visibles. De façon générale, les travaux s'intéressant aux problèmes radiométriques décrits précédemment sont peu nombreux, particulièrement dans un contexte de milieu urbain à très grande échelle. Les modèles classiques de transfert radiatif dans l'atmosphère tels que 6S [VERMOTE et al 97] sont plutôt adaptés au contexte satellitaire basse résolution avec une approximation en sol plat. Ces modèles ont cependant été améliorés afin de prendre en compte le relief et l'hétérogénéité des propriétés radiométriques des scènes, tandis que de nouveaux codes de simulation sont apparus. Le code Mystic [MAYER, KYLLING 01] permet ainsi de simuler des scènes 3D décrites par un modèle numérique d'élévation en utilisant la méthode de Monte-Carlo. Ce code ne semble pourtant pas avoir été utilisé à des résolutions aussi grandes que celles nécessaires pour modéliser une scène urbaine. Le code Amartis [MIESCH et al 00] est également un outil de simulation de scènes définies par un profil 2D présentant du relief ou des hétérogénéités spatiales. Ce code a permis de simuler l'importance relative des différents termes de luminance au niveau du capteur, à l'ombre et au soleil sur un profil de rue [MIESCH, BRIOTTET 01]. Le modèle DART-3D [GASTELLU-ETCHEGORRY et al 03] a été récemment étendu afin de pouvoir simuler des scènes 3D quelconques décrites par des voxels, et notamment des images aériennes de sites urbains. Ces codes ont jusqu'à présent surtout été utilisés en tant qu'outils de pure simulation permettant de choisir les propriétés de futurs capteurs (contraste obtenu [GASCON et al 01], choix de bandes spectrales [MIESCH, BRIOTTET 01], etc.).

3. Description de l'outil de simulation

3.1. Termes simulés

Les différents termes d'éclairage mis en jeu sont indiqués sur la Figure 1. La source primaire de lumière est le soleil. Pour une surface plane, nous pouvons alors identifier trois contributions à l'éclairage d'un point (cf. Figure 1 à gauche) :

- le premier terme est l'éclairage direct du soleil (E_{direct}), pour lequel il faut simplement tenir compte de l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère.
- L'atmosphère n'atténue pas seulement les rayons solaires, mais elle les diffuse également. Une deuxième source d'éclairage correspond donc à l'éclairage diffus de l'ensemble du ciel (E_{diffus}).
- Enfin il existe un couplage entre le sol et l'atmosphère ($E_{couplage}$), pour lequel des rayons en provenance de divers points de la scène sont diffusés à de multiples reprises par l'atmosphère, ce qui contribue à une troisième source d'éclairage.

Lorsque l'on tient compte de la rugosité de la scène, deux termes supplémentaires correspondant à l'énergie réfléchi sur une surface avant d'atteindre la cible sont à considérer (cf. **Figure 1** à droite) :

- Le rayonnement solaire direct peut se réfléchir sur une façade et constituer un 4e terme d'éclairage ($E_{direct-réfléchi}$).
- De même, le rayonnement diffus du ciel réfléchi par un bâtiment contribue à un 5e terme d'éclairage ($E_{diffus-réfléchi}$).

Ces deux termes sont regroupés par la suite sous l'appellation $E_{réfléchi}$.

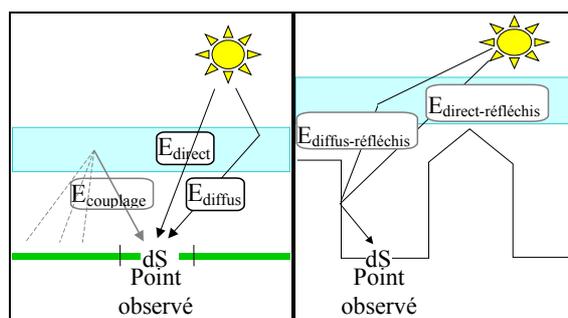


Figure 1 : à gauche : sources d'éclairage en sol plat ;
A droite : sources d'éclairage dues au sursol.

3.2. Modélisation des éclairagements

Afin d'obtenir un outil respectant la physique, nous avons utilisé les modèles du soleil et du ciel validés dans le code 6S [VERMOTE et al 97]. Celui-ci requiert de nombreux paramètres pour décrire l'atmosphère, en particulier le type, les proportions et la répartition des aérosols. Dans le cas d'une simulation, il est possible de préciser l'ensemble de ces paramètres et d'utiliser le modèle de ciel obtenu. Cependant, dans le cas d'une mission aérienne standard, il est clair que nous n'avons

pas accès à l'ensemble de ces paramètres. Si l'on souhaite obtenir des éclairagements potentiellement cohérents avec ceux qui ont illuminé une image aérienne réelle, il est nécessaire de faire des hypothèses simplificatrices. Fort heureusement, les missions aériennes n'ont lieu que par temps dégagé, avec un soleil relativement haut (hauteur minimale de 30° dans les spécifications de vol, mais la valeur est habituellement bien plus élevée) et une grande visibilité horizontale (~ 20 km), ce qui constitue une simplification forte. Ainsi, nous utilisons dans 6S un modèle d'aérosols urbains, avec la visibilité horizontale comme seul paramètre. L'ordre de grandeur de la visibilité horizontale est facile à obtenir, puisque c'est une information sauvegardée par les aéroports. Il est également possible d'utiliser les données de visibilité issues de mesures satellite, comme celles fournies quotidiennement par le capteur Modis. De plus, les réponses spectrales des trois caméras utilisées sont également prises en compte dans 6S. La technique mise en œuvre peut donc s'appliquer aussi bien à des images couleur large bande comme c'est le cas ici, ou encore à des images panchromatiques par exemple. En sortie de 6S, nous obtenons les éclairagements du soleil (atténués par la traversée de l'atmosphère) et du ciel dans les conditions de la mission aérienne (cf. **Figure 2**).

Pour gérer des géométries tridimensionnelles complexes et tenir compte des modèles précédents issus de 6S, nous avons décidé d'utiliser un logiciel de lancer de rayons tel que Renderpark [BEKAERT et al 01]. On dispose de modèles vecteurs tridimensionnels des bâtiments formant la scène considérée. Les sources lumineuses que sont le soleil et le ciel sont introduites dans la simulation de la façon suivante.

3.2.1. Modélisation du ciel

Le ciel se comporte comme une source hémisphérique non homogène englobant l'ensemble de la scène. La voûte céleste est discrétisée en une multitude de facettes, émettant chacune une énergie calculée par 6S (cf. **Figure 2**).

3.2.2. Modélisation du soleil

Le soleil est inclus dans la scène sous la forme d'une sphère lambertienne dont la position est calculée à partir de la date, de l'heure et des coordonnées géographiques souhaitées. Les proportions de cette sphère par rapport à son éloignement de la scène sont respectées, de sorte que l'angle apparent du soleil corresponde bien à l'angle solide réel.

3.2.3. Prise en compte du terme de couplage

La simulation de ce terme est particulièrement délicate, puisqu'elle implique de tenir compte de l'ensemble des radiométries dans plusieurs images autour du point considéré, et de simuler par lancer de rayons la présence d'une couche atmosphérique diffuse. Or, notre étude se situe en milieu urbain, qui

présente une réflectance moyenne plutôt faible (de l'ordre de 0,1 à 0,2), sous une atmosphère claire (visibilité horizontale de l'ordre de 20 km). Dans ces conditions particulières, les simulations réalisées avec 6S montrent que le terme $E_{couplage}$ est de plus d'un ordre de grandeur inférieur aux deux autres. De plus, on constate que ce terme crée une contribution diffuse supplémentaire sur la scène, du même type que E_{diffus} dû au ciel, mais pratiquement isotrope. Par conséquent, plutôt que de simuler précisément ce terme avec la complexité que cela implique, il est inclus dans les luminances issues du ciel sous la forme d'un terme additif obtenu grâce à la simulation 6S.

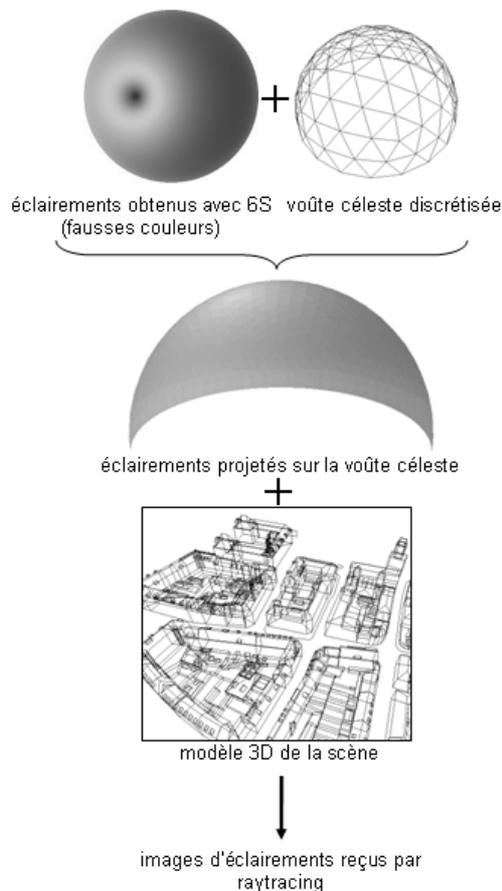


Figure 2 : processus d'obtention des simulations d'éclairagements par lancer de rayons.

3.3. Calcul des termes d'éclairagements

Pour obtenir les termes d'éclairagement E_{direct} , E_{diffus} , $E_{réfléchi}$, il suffit de réaliser les simulations par lancer de rayons suivantes : l'éclairagement dû au soleil, E_{direct} , est facile à obtenir : on ne met que le soleil dans la simulation et l'on ne permet pas de réflexion de l'énergie sur les facettes. Cela revient à dire que la profondeur de récursivité de l'algorithme de lancer de rayons est limitée à la première surface rencontrée. Le principe de détermination de l'éclairagement dû au ciel, E_{diffus} , est exactement le même : le ciel est l'unique source lumineuse de la simulation, et l'on n'autorise pas de réflexions d'énergie sur les facettes.

L'obtention des termes $E_{réfléchi}$ est plus délicate, car elle suppose de connaître les propriétés de réflexion des matériaux composant la scène. Pour une pure simulation, on peut mettre les modèles de réflexion que l'on souhaite. En revanche, dans le cas d'une scène réelle, nous proposons la méthode suivante pour nous rapprocher des valeurs effectives présentes dans la scène. Nous utilisons les images réelles comme sources d'information pour obtenir des estimations des albédos des matériaux. Pour cela, on les considère comme lambertiens, et l'on ne prend en compte que les éclairements direct et diffus incidents. Dans ce cas, l'équation reliant les luminances mesurées dans les images aux éclairements reçus s'écrit :

$$L_{image} = e^{-\tau^{\uparrow}/\cos\theta_v} \cdot \frac{\rho(\text{constante})}{\pi} \cdot (E_{direct} + E_{diffus}) + L_{parasite}$$

On rappelle que les termes d'éclairement tiennent déjà compte de l'absorption par l'atmosphère entre le soleil et le sol. Le terme $e^{-\tau^{\uparrow}/\cos\theta_v}$ sert à prendre en compte l'absorption entre le sol et l'avion. τ^{\uparrow} est l'épaisseur optique de l'atmosphère entre le sol et l'avion, et θ_v est l'angle zénithal de visée. Dans cette équation, E_{direct} et E_{diffus} sont les éclairements direct et diffus déterminés par lancer de rayons. $L_{parasite}$ est l'ensemble des énergies « parasites » ne venant pas de la surface considérée. Ce terme est détaillé au paragraphe 5.1 et évalué par la méthode décrite au paragraphe 5.2. L_{image} correspond aux luminances mesurées sur les images, et est donc connu. τ^{\uparrow} est fourni par les simulations issues de 6S. Nous pouvons donc obtenir une approximation de l'albédo ρ de chaque surface à l'aide de cette équation.

Nous utilisons alors la même technique de lancer de rayons que précédemment. Cette fois-ci, aussi bien le ciel que le soleil sont pris en compte comme sources lumineuses éclairant la scène. Toutes les surfaces sont décrites comme étant constituées d'un matériau lambertien utilisant les albédos qui viennent d'être déterminés. On prend en compte cette fois la première réflexion de l'énergie sur les surfaces, ce qui signifie que la profondeur de récursion est supérieure d'une unité aux deux cas précédents. Ce lancer de rayons nous permet ainsi d'obtenir une image contenant en

chaque point la somme de E_{direct} , E_{diffus} et $E_{réfléchi}$ avec les albédos approximatifs évalués précédemment. En soustrayant du résultat obtenu les éclairements directs venant du soleil et du ciel, E_{direct} et E_{diffus} , nous obtenons finalement une estimation des interréflexions entre les facettes. On peut ensuite raffiner le résultat obtenu en prenant en compte le $E_{réfléchi}^0$ obtenu pour améliorer la détermination des albédos ρ en écrivant l'équation :

$$L_{image} = e^{-\tau^{\uparrow}/\cos\theta_v} \cdot \frac{\rho(\text{constante})}{\pi} \cdot (E_{direct} + E_{diffus} + E_{réfléchi}^0) + L_{parasite}$$

On peut ainsi réitérer le processus décrit, afin d'obtenir une évaluation meilleure $E_{réfléchi}^1$. Cependant, l'expérience montre que la première détermination est suffisante dans la pratique.

4. Etude du cas réel d'une rue en centre-ville

Nous nous sommes intéressés au cas d'une rue d'Amiens, dont l'environnement est typique d'un milieu urbain dense de centre-ville. Comme on peut le voir sur la **Figure 3**, cette rue apparaît comme très encaissée entre deux bâtiments assez grands. La prise de vue (et la simulation) a eu lieu en mai 2001, pour une hauteur du soleil de 60°. La rue est ainsi en partie à l'ombre. L'angle azimuthal solaire est d'environ 160°, tandis que la rue considérée est orientée approximativement selon un axe 105° N- 285° N. La visibilité horizontale est fixée à 18 km. La **Figure 3** montre également le côté éclairé de la rue sur une autre image aérienne et sur une photographie prise depuis le sol : on peut constater que la façade est plutôt réfléchissante, avec une composante rouge supérieure aux composantes verte et bleue.

Grâce à l'outil décrit précédemment, nous pouvons calculer l'importance relative des différents termes sur chacune des facettes, et obtenir les cartes des éclairements E_{direct} , E_{diffus} et $E_{réfléchi}$ comme on peut le voir sur la **Figure 4**. En particulier, on s'est intéressé aux valeurs obtenues le long du profil indiqué en gras sur la **Figure 3**. Les résultats sont indiqués ci-dessous sur la **Figure 5**.

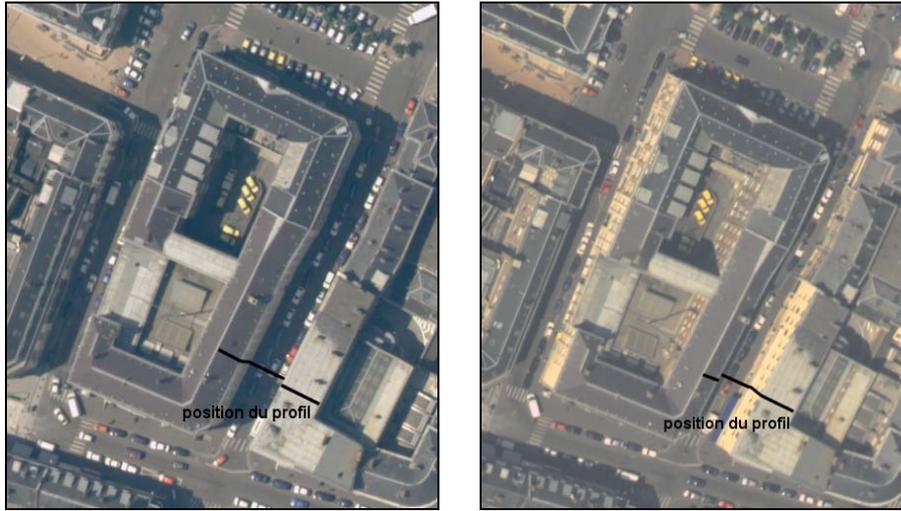


Figure 3 : cas réel d'une rue en centre-ville ; En bas, photographie de la façade de droite au soleil.

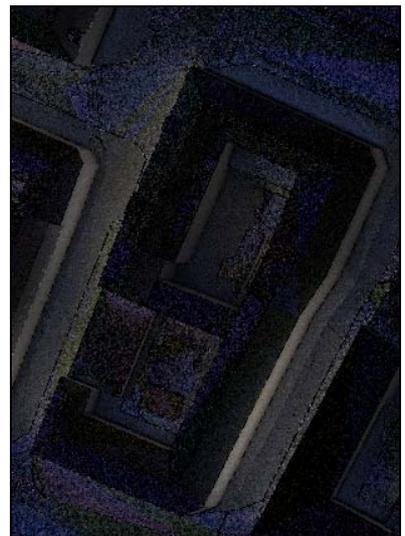
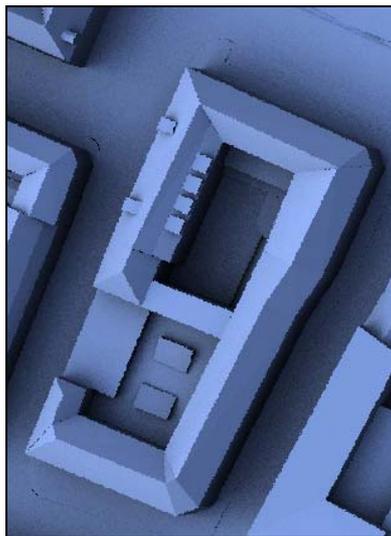
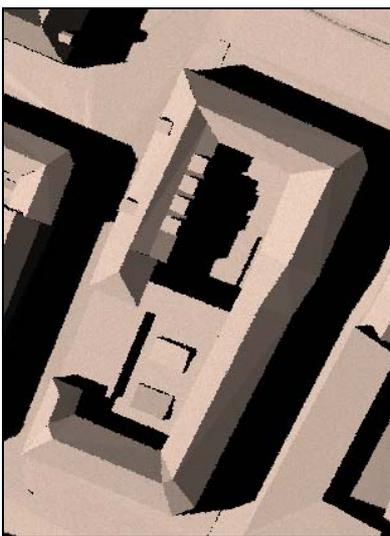


Figure 4 : Simulation des termes d'éclairage obtenus par lancer de rayons ; de gauche à droite : E_{direct} , E_{diffus} et $E_{réfléchi}$.

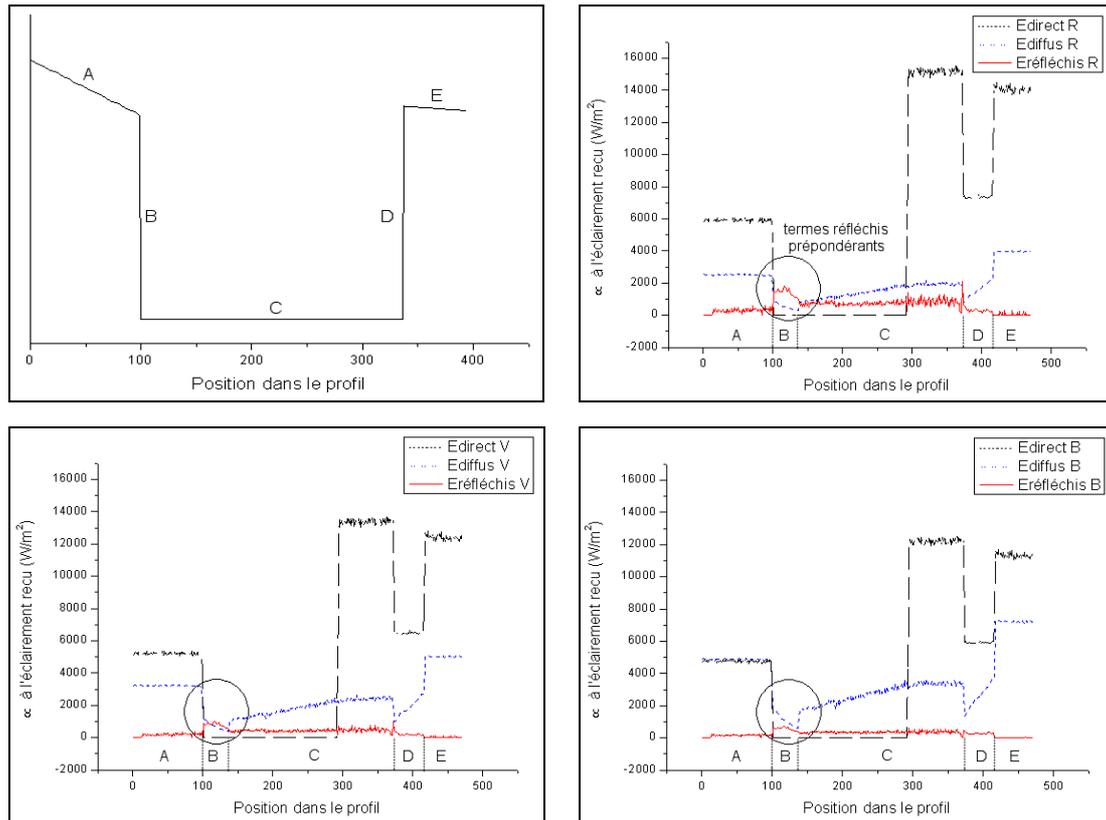


Figure 5 : vue schématique du profil de la rue, et valeurs des différents termes d'éclairéments le long du profil dans les trois canaux R, V, B.

4.1. Terme E_{direct}

En ce qui concerne le terme E_{direct} , on observe fort logiquement différents paliers, correspondant respectivement au toit pentu à gauche (surface « A » sur la **Figure 5**, en éclairage plutôt rasant, $\theta_s = 70^\circ$), à l'ombre projetée sur le mur vertical (surface « B ») et sur une partie de la rue, à l'éclairage reçu par le fond de la rue au soleil (surface « C »), à celui reçu par la façade au soleil (surface « D ») et enfin à celui reçu par le toit plat à droite de la rue (surface « E »). Les facettes étant planes, on obtient des paliers qui correspondent à la variation d'angle entre la normale à la facette et la direction du soleil.

4.2. Terme E_{diffus}

Après le plateau correspondant à l'énergie diffuse reçue par le toit en pente « A », on observe une très forte décroissance du terme E_{diffus} sur le mur vertical « B ». Les valeurs sont jusqu'à plus de 10 fois inférieures à celles reçues par le toit en pente (notamment tout en bas de la façade). Cela s'explique par le fait que la portion d'angle solide du ciel vue par cette façade est plus faible que pour le toit en pente, d'autant plus que l'on se situe en bas de la façade. D'autre part, au fond de la rue, l'énergie décroît plus on entre dans l'ombre. En effet, l'énergie émise par le ciel est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de la position du soleil. Ce phénomène d'ombres d'autant plus sombres que l'on se rapproche d'un bâtiment apparaît

nettement sur des images aériennes réelles. La nécessité de prendre en compte cette anisotropie des éclairéments venant du ciel est également mise en évidence par la comparaison de la façade éclairée à celle qui est à l'ombre. Nous pouvons constater que l'énergie diffuse sur la façade au soleil « D » est 2 à 3 fois plus élevée que celle arrivant sur la façade à l'ombre « B ». Une approximation lambertienne du ciel, qui est parfois utilisée dans la littérature pour accélérer des calculs (cf. par exemple [BOLDO 02]), conduirait à deux énergies égales. Nous montrons ici dans quelle mesure cette approximation n'est pas valide.

4.3. Terme $E_{réfléchi}$

En ce qui concerne les termes $E_{réfléchi}$, les résultats sont particulièrement intéressants. Bien évidemment, ces termes sont nuls sur les deux toits « A » et « E » puisqu'aucune surface n'est susceptible de leur renvoyer de la lumière. C'est dans la rue elle-même qu'apparaissent les résultats les plus instructifs. Considérons tout d'abord la façade à l'ombre « B ». L'essentiel de l'angle solide qu'elle intercepte correspond à la façade en regard « D », qui, elle, est en plein soleil. Le rayonnement provenant de cette façade est donc particulièrement important : c'est ce terme qui devient prépondérant, devant E_{diffus} . De plus, un biais colorimétrique est introduit, puisque le rayonnement réfléchi présente la couleur de la façade au soleil. Au fond de la rue, le terme $E_{réfléchi}$ conserve une grande

importance par rapport à E_{diffus} , notamment dans le rouge. Il n'est donc absolument pas négligeable. Ce n'est que dans les zones au soleil que l'importance relative de ce terme devient faible.

5. Correction des ombres

5.1. Principe

Les simulations précédentes donnent une idée précise des ordres de grandeur relatifs des différents termes d'éclairement. Si les évaluations de ces différents termes sont en accord avec la réalité, il doit être possible de « rééclairer » les zones à l'ombre dans les images aériennes réelles correspondant à la scène simulée, et ainsi d'obtenir une teinte réaliste en accord avec les zones au soleil proches. Ce faisant, nous effectuons à travers la correction des ombres une validation indirecte des évaluations.

Afin de réaliser cette correction, nous ferons les hypothèses suivantes. Nous ne connaissons pas *a priori* les propriétés de réflectances directionnelles des matériaux à l'ombre. Aussi nous supposons qu'ils sont lambertiens pour effectuer les corrections. Dans ce cadre, l'équation reliant les luminances des images aux éclairissements reçus s'écrit :

$$L = e^{-\tau^{\uparrow} / \cos \theta_v} \cdot \frac{\rho(\text{constante})}{\pi} \cdot (E_{direct} + E_{diffus} + E_{réfléchis}) + L_{parasite}$$

avec ρ l'albédo (constant) du matériau.

Le terme $L_{parasite}$ correspond à l'ensemble de l'énergie « parasite » ne venant pas de la surface que l'on corrige. Il se décompose en la somme des termes suivants :

- $L_{atmosphère}$, l'énergie diffusée par l'atmosphère qui ne parvient pas au sol, mais est directement rétrodiffusée vers le capteur.
- $L_{direct-diffus}$, le rayonnement solaire direct, réfléchi par l'environnement de la surface considérée, et qui contribue malgré tout à l'énergie semblant venir de la surface en raison de la diffusion par l'atmosphère.
- $L_{diffus-diffus}$, l'énergie provenant de l'ensemble du ciel, et réfléchi par l'environnement de la même manière que la précédente.
- les autres termes (réflexions multiples, couplage avec l'atmosphère, etc.) provenant également de l'environnement.

Puisque dans l'approximation lambertienne, l'albédo est constant, nous pouvons écrire :

$$L_{ombre} = e^{-\tau^{\uparrow} / \cos \theta_v} \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot (E_{diffus} + E_{réfléchis}) + L_{parasite}$$

$$L_{soleil}(\text{cherché}) = e^{-\tau^{\uparrow} / \cos \theta_v} \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot (E_{direct} + E_{diffus} + E_{réfléchis}) + L_{parasite}$$

D'où :

$$\frac{L_{soleil} - L_{parasite}}{L_{ombre} - L_{parasite}} = 1 + \frac{E_{direct}}{E_{diffus} + E_{réfléchis}}$$

C'est cette dernière équation qui nous permet de « rééclairer » les zones à l'ombre. Dans cette équation, la luminance L_{ombre} est connue puisqu'issue des images, tandis que les termes d'éclairement E_{direct} , E_{diffus} et $E_{réfléchi}$ sont issus de simulations. Reste à déterminer le terme $L_{parasite}$, qui joue un rôle plus important qu'il n'y paraît comme nous allons le montrer dans le paragraphe suivant.

5.2 Importance et modélisation du « voile » $L_{parasite}$

Outre des valeurs réalistes de simulations d'éclairissements, une bonne connaissance du « voile » d'énergie parasite est indispensable pour obtenir une correction satisfaisante des ombres. En effet, comme on peut le constater dans l'équation ci-dessus, ce terme est soustrait des radiances à l'ombre, et le résultat est ensuite multiplié par le terme de droite, qui est un grand nombre en général. Or, les radiances à l'ombre sont par définition faibles. Ainsi, une petite erreur sur la détermination de $L_{parasite}$ peut conduire à de très grandes erreurs sur le résultat final. Une bonne évaluation de ce terme est donc cruciale.

Malheureusement, cette évaluation est difficile. On utilise souvent la méthode dite du « point noir » pour évaluer $L_{parasite}$ [KAUFMAN, SENDRA 88]. Il s'agit de trouver un point à l'ombre, sur une surface la plus sombre possible (de l'eau par exemple). On peut ainsi considérer que l'énergie provenant de la zone elle-même est pratiquement négligeable, et on ne mesure que le terme $L_{parasite}$. Cependant, la valeur de ce terme est très variable au sein d'une même image, si bien qu'il est nécessaire de modéliser cette variabilité. Considérons à titre d'illustration la Figure 6 pour laquelle la dynamique a été ajustée afin de mettre en évidence les valeurs des ombres.

L'effet prédominant immédiatement visible est le phénomène de « hot spot », à savoir que la scène semble plus claire lorsque la direction d'observation se rapproche de la direction du soleil (à droite sur l'image). Cela est dû notamment aux ombres qui disparaissent lorsque l'on s'approche de la direction du soleil. S'il ne s'agissait que de cela, le « hot spot » ne serait qu'une impression visuelle. En réalité, les radiométries de la scène, et en particulier celles des ombres, sont plus élevées du côté du « hot spot ». Cela est dû notamment aux fonctions de phase des molécules et des aérosols qui présentent des maxima locaux dans la direction de rétrodiffusion. Des approximations du terme $L_{parasite}$ obtenues par modélisation du transfert radiatif ([BOLDO 02], [DESCHAMPS et al 83]) mettent effectivement en évidence cette caractéristique.

En conséquence, nous avons utilisé des modèles suivant prioritairement la forme du « hot spot » pour rendre compte de l'évolution des radiométries dans les ombres au sein des images de scènes urbaines. Nous avons ainsi comparé les résultats obtenus avec trois modèles, le premier issu d'une modélisation du transfert radiatif, les deux autres étant plus empiriques.

- Nous avons d'abord retenu le modèle issu de la modélisation décrite dans [LE MEN 96], qui s'écrit après simplification :

$$L_{parasite} = \frac{K}{\cos(\theta_v)} \cdot (a - b \cdot \cos g + 3 \cdot (1 - a) \cdot \cos^2 g),$$

où K , a et b sont trois paramètres à déterminer, θ_v est l'angle zénithal de visée, et g est l'angle de phase.

- Un autre modèle de hotspot, empirique, a été proposé par [LE MEN, BOLDO 00], et s'écrit :

$$L_{parasite} = K \cdot \left(k + (1 - k) \cdot \frac{1 - e \cdot \cos \theta_s}{1 - e \cdot \cos g} \right),$$

où K , k et e sont trois paramètres à déterminer, θ_s est l'angle zénithal du soleil.

- Le troisième modèle de « hot spot » évalué est celui utilisant le noyau de Hapke [HAPKE 81], divisé par $\cos(\theta_v)$ afin de tenir compte de la variation de l'épaisseur optique traversée. Il s'écrit :

$$L_{parasite} = \frac{K / \cos(\theta_v)}{1 + 1/h \cdot \tan(g/2)},$$

où K et h sont deux paramètres à déterminer.

Pour évaluer les paramètres, nous découpons l'image en grandes dalles régulières (par exemple 100 m par 100 m), et cherchons le minimum de radiométrie dans chacune de ces dalles. Le modèle est alors obtenu par minimisation par moindres carrés.

A titre d'exemple, pour l'image visible sur la **Figure 7** à gauche, nous obtenons les résultats contenus dans le Tableau 1, ainsi que les cartes de résidus (sur le canal rouge) pour les différents modèles (cf. **Figure 7**).



Figure 6 : mise en évidence de la valeur relative des ombres dans une image (plus clair = plus d'énergie).

| modèle | paramètres R | paramètres V | paramètres B | res. moy. R | res. moy. V | res. moy. B |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Le Men | K=12156; a=0,656; b=1,293 | K=18442; a=0,670; b=1,315 | K=11832; a=0,712; b=0,939 | 347 | 377 | 391 |
| Le Men-Boldo | K=3673; k=0,795; e=0,966 | K=4962; k=0,851; e=0,979 | K=6486; k=0,773; e=0,907 | 354 | 375 | 410 |
| Hapke/cos(θ_v) | K=5749; h=0,50 | K=7290; h=0,60 | K=8350; h=0,89 | 330 | 360 | 387 |

Tableau 1 : résultats obtenus avec les différents modèles de $L_{parasite}$ (image 16bits).

Nous pouvons constater que les trois modèles donnent des résidus moyens sensiblement équivalents. Les cartes des résidus semblent cependant montrer que les modèles de Le Men et Hapke sont préférables au modèle de Le Men-Boldo, pour lequel les forts résidus sont répartis moins uniformément. Notons que le résidu très important visible à droite sur les trois cartes est dû à la présence d'un parc aquatique très étendu dans l'image, pour lequel on ne trouve pas de valeur d'ombre pertinente.

Le modèle de Le Men a l'avantage d'être linéaire, ce qui permet d'obtenir directement le résultat de la minimisation par moindres carrés. Cependant, son utilisation sur différentes images montre une instabilité des paramètres obtenus.

Le modèle de Hapke est quant à lui non linéaire par rapport à h , mais l'interprétation de ses paramètres est immédiate : K correspond à l'« intensité » du voile, et h détermine son « extension » dans l'image. Les paramètres obtenus montrent que l'intensité du voile augmente lorsque l'on passe du canal rouge au canal bleu, ce qui est conforme à l'augmentation de la diffusion de Rayleigh plus les longueurs d'onde sont courtes. De même, on constate que h augmente lorsque l'on passe du canal rouge au bleu. C'est bien ce à quoi l'on s'attend, puisque la fonction de phase de l'effet Rayleigh entraîne une diffusion importante dans toutes les directions, contrairement aux fonctions de phase des aérosols (effet Mie), qui correspondent à une diffusion essentiellement vers l'avant. Nous retenons ce modèle pour modéliser le terme $L_{parasite}$. Sur une grande

partie de l'image, nous pouvons constater que les résidus sont inférieurs à 150 niveaux (sur 16 bits), soit moins de 5 % de la valeur de l'ombre. Nous verrons plus loin que cette précision est suffisante pour notre application.

D'autre part, pour des images successives correspondant à des scènes urbaines, nous obtenons les résultats contenus dans le **Tableau 2**.

| images successives | paramètres R | paramètres V | paramètres B |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | K=5675; h=0,49 | K=7162; h=0,67 | K=7768; h=1,10 |
| 2 | K=5313; h=0,57 | K=7007; h=0,74 | K=7738; h=1,18 |
| 3 | K=5749; h=0,50 | K=7290; h=0,60 | K=8350; h=0,89 |
| 4 | K=5103; h=0,48 | K=6900; h=0,64 | K=8072; h=0,84 |
| 5 | K=4913; h=0,52 | K=6600; h=0,68 | K=7629; h=0,99 |

Tableau 2 : résultats sur plusieurs images successives.

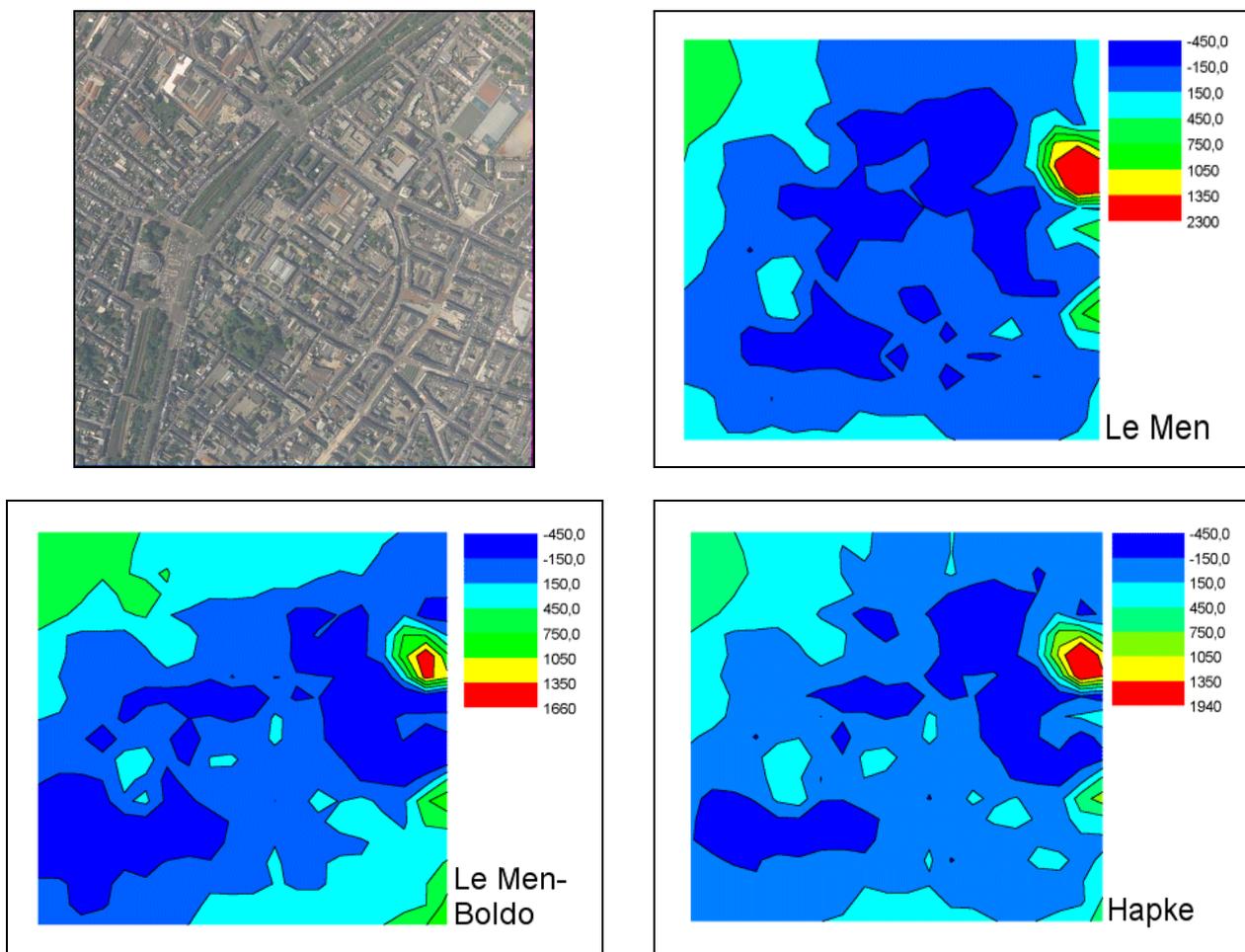


Figure 7 : image initiale et résidus obtenus avec les modèles de Boldo, Le Men, et Hapke/ $\cos(\theta_v)$

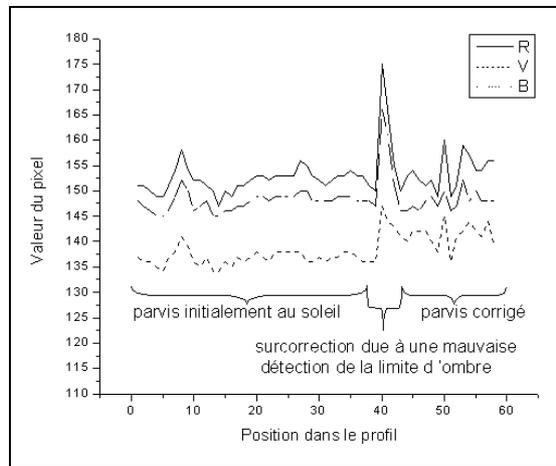


Figure 8 : correction d'ombres sur le parvis de la cathédrale d'Amiens.

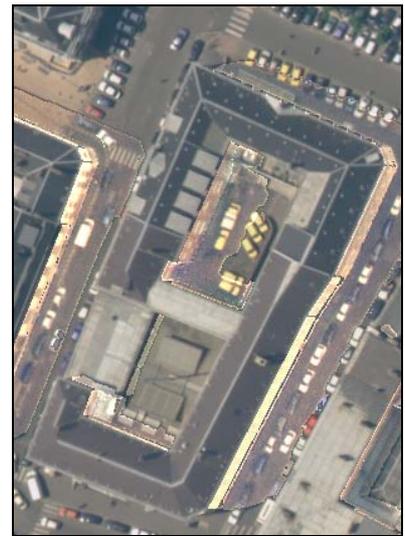


Figure 9 : correction des ombres dans la rue encaissée.
A gauche, image initiale ; au milieu, image corrigée avec $E_{\text{réfléchi}}$; à droite, image corrigée sans $E_{\text{réfléchi}}$.



Figure 10 : correction des ombres sur une zone plus large du centre-ville d'Amiens.
En haut, image initiale ; en bas, image corrigée.

En dépit de la variabilité des scènes urbaines vues dans chaque image, les paramètres trouvés restent relativement stables entre chaque image. Cette constatation est satisfaisante, puisque l'environnement et l'atmosphère restent constants entre deux prises de vue rapprochées dans une même bande. En revanche, dès que l'on se situe à la limite entre des scènes urbaines et des scènes rurales, le modèle ne converge plus. Cette approche et cette méthode de détermination du modèle semblent pratiquement caractéristiques des scènes urbaines.

5.3. Exemples de correction des ombres

Disposant du modèle ci-dessus pour le terme $L_{parasite}$ et des simulations des éclairagements dans nos conditions de prises de vue, nous pouvons « éclairer » les ombres grâce aux équations décrites précédemment.

Avant d'étudier la rue encaissée décrite plus haut, commençons par considérer le parvis de la cathédrale d'Amiens. Il est intéressant d'étudier cette zone particulièrement vaste et dégagée. La façade de la cathédrale étant à l'ombre, il n'y a pratiquement pas d'énergie réfléchi sur le parvis, ce qui nous permet de vérifier les importances relatives de E_{direct} et E_{diffus} uniquement. Nous obtenons le résultat visible sur la **Figure 8**. Seule l'ombre projetée par la cathédrale est corrigée, car nous disposons uniquement du modèle 3D de la cathédrale, et pas de celui des bâtiments entourant la place. De même, le bâtiment situé en bas à droite est corrigé comme s'il appartenait au parvis, car il n'est pas inclus dans la base de données. Si l'on se focalise sur les radiométries obtenues sur le parvis lui-même, on peut constater que le résultat visuel est plutôt satisfaisant, comme le confirme le profil réalisé le long de la ligne indiquée sur l'image précédente (cf. **Figure 8**). Une légère surcorrection dans le bleu est cependant visible, qui est probablement due à notre méconnaissance des conditions atmosphériques exactes. Cependant, l'erreur de correction nous semble suffisamment faible pour considérer que les importances relatives des termes E_{direct} et E_{diffus} sont raisonnablement cohérentes avec la réalité.

Venons en maintenant au cas de la rue encaissée. En prenant en compte l'ensemble des termes E_{direct} , E_{diffus} , $E_{réfléchi}$ évalués précédemment, nous obtenons le résultat visible sur la **Figure 9** au milieu. Ce résultat est relativement satisfaisant, les teintes des trottoirs étant plutôt bien conservées. On constate cependant qu'il reste une légère tendance rougeâtre dans la rue la plus à droite de l'image, probablement due à un défaut de correction du terme $E_{réfléchi}$ malgré nos efforts. Pour mieux se rendre compte de la qualité de cette correction, il est intéressant de voir l'image obtenue sans tenir compte du terme $E_{réfléchi}$, qui est le plus difficile à calculer. On obtient le résultat visible à droite sur la **Figure 9**. Comme on pouvait s'y attendre, la façade est complètement saturée, puisque sur cette façade le terme dominant est le terme $E_{réfléchi}$. On

constate également que le fond de la rue apparaît beaucoup plus rouge que précédemment. Même dans cette zone, il est nécessaire de tenir compte du terme $E_{réfléchi}$ pour obtenir un résultat visuellement acceptable.

Enfin, un résultat sur une zone plus large est visible sur la **Figure 10**. L'image corrigée a été obtenue avec l'ensemble des termes d'éclairément décrits précédemment. Les temps de calcul des termes d'éclairément E_{direct} et E_{diffus} sont relativement faibles, de l'ordre de quelques heures sur un Pentium IV à 1,4 GHz. En revanche, le calcul du terme $E_{réfléchi}$ est très consommateur en temps de calcul, puisqu'il est nécessaire de tenir compte des réflexions entre facettes. L'obtention d'un $E_{réfléchi}$ faiblement bruité nécessite alors environ une semaine de temps de calcul pour notre image (1500x1500 pixels et scène composée d'environ 15 000 polygones).

L'image est corrigée du voile, c'est-à-dire que le terme $L_{parasite}$ n'a pas été ajouté à l'issue du rééclairage. Seuls les modèles 3D des bâtiments ont été utilisés, ce qui explique que des arbres situés dans les ombres projetées des bâtiments soient surcorrigés. Quelques ombres subsistent (notamment en haut à droite) pour les bâtiments dont on ne dispose pas du modèle 3D. Ce résultat montre notamment que le modèle utilisé pour $L_{parasite}$ semble suffisant sur une large zone, puisque les teintes des zones corrigées restent relativement homogènes pour un même matériau sur l'ensemble de l'image. Cependant, on constate également qu'une image dont les ombres sont toutes corrigées devient plus difficilement interprétable, car l'image apparaît sans « relief ».

6. Conclusion

A l'aide de l'outil de simulation que nous avons développé, nous avons pu obtenir des valeurs relatives des éclairagements arrivant sur une scène urbaine cohérentes avec la réalité. Ces simulations montrent notamment que les termes d'éclairéments réfléchis sont dominants dans certaines ombres. L'application sur des images réelles à la correction des ombres confirme ce résultat. Il est ainsi absolument indispensable de tenir compte des termes d'éclairéments réfléchis en milieu urbain à grande échelle.

Dans l'optique d'une application pratique à la correction des ombres, cette conclusion est évidemment gênante, puisque ce terme est long et délicat à calculer précisément. Néanmoins, on peut se demander si une correction complète des ombres est souhaitable pour améliorer la qualité de la visualisation. En effet, la compréhension globale de la scène est en définitive diminuée lorsque toutes les ombres sont corrigées, l'image apparaissant sans « relief ». Il serait donc peut-être plus souhaitable de ne corriger que partiellement les ombres, auquel cas les différents termes d'énergies pourraient éventuellement nécessiter une précision moindre.

Plus généralement, la bonne connaissance des différents effets radiométriques décrits précédemment nous semble particulièrement important, puisque leur modélisation constitue un premier pas vers la prise en compte d'effets encore plus complexes, tels que les effets de réflectances bidirectionnels des matériaux par exemple. Une maîtrise complète de l'ensemble de ces effets permettrait, entre autres applications, de générer à volonté des images réalistes dans des conditions d'éclaircements données, différentes de celles de la prise de vue initiale.

Références

- [BEKAERT et al 01] Bekaert P., Suykens de Laet F., Peers P., Masselus V., RenderPark : a test-bed system for global illumination, World Wide Web, <http://www.renderpark.be>, 2001.
- [BOLDO 02] Boldo D., Fabrication conjointe de MNS et d'ortho-images pour la visualisation perspective de scènes urbaines. Thèse de l'université René Descartes – Paris V, 2002.
- [DESCHAMPS et al 83] Deschamps P.Y., Herman M., Tanre D., Modélisation du rayonnement réfléchi par l'atmosphère et la Terre entre 0.35 et 4 microns. Final report, ESA contract 4393/80/F/DD(SC), 1983.
- [GASCON et al 01] Gascon F., Gastellu-Etchegorry J.P., Lefèvre M. J., Radiative Transfer Model for Simulating High-Resolution Satellite Images, IEEE Geoscience and Remote Sensing 39(9):1922-1926, 2001.
- [GASTELLU-ETCHEGORRY et al 03] Gastellu-Etchegorry J.P., Martin E., Gascon F., DART : a 3-D model for simulating satellite images and surface radiation budget, International Journal of Remote Sensing 25(1):75-96, 2003.
- [HAPKE 81] Hapke, B., Bidirectional reflectance spectroscopy, 1. Theory, Journal of Geophysical Research 86:3039-3054, 1981.
- [KAUFMAN,SENDRA 88] Kaufman Y.J., Sendra C., Algorithm for Atmospheric Corrections. Int. J. Rem. Sens., 9:1357-1381, 1988.
- [LE MEN 96] Le Men H., Cartographie semi-automatique de l'évolution de l'occupation des sols par télédétection, Habilitation à diriger les recherches de l'université René Descartes – Paris V, 1996.
- [LE MEN, BOLDO 00] Le Men H., Boldo D., Mosaïque automatique d'orthophotographies. Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), volume III, pages 325-336, février 2000.
- [LE MEN et al 02] Le Men H., Trévisan J., Boldo D., Automatic extraction of landcover themes on digital orthophotos in mountainous area for mapping at 1/25K, Proceedings of ISPRS Commission II, volume XXXIV, tome 2, Xi'an (Chine), août 2002.
- [LOSCOS et al 98] Loscos C., Drettakis G., Robert L., Interactive Modification of Real and Virtual Lights for Augmented Reality, Technical Sketch, SIGGRAPH'98, Orlando (FL), juillet 1998.
- [MAYER, KYLLING 01] Mayer, B., A. Kylling, Three-dimensional radiative transfer over inhomogeneous terrain, IAMAS 2001 assembly, Innsbruck, juillet 2001.
- [MIESCH et al 00] Miesch C., Briottet X., Kerr Y., Cabot F., Radiative Transfer Solution for Rugged and Heterogeneous Scene Observations, Applied Optics, 39(36):6830-6846, 2000.
- [MIESCH, BRIOTTET 01] Miesch C., Briottet X., Radiance coming from shaded areas in urban scene, IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Rome, novembre 2001.
- [VERMOTE et al 97] Vermote E.F., Tanré D., Deuze J.L., Herman M., Morcrette J.J., Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum : an overview, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35(3):675-686, 1997.