

B.1 Effets radiométriques en milieu urbain à grande échelle et correction des ombres

Gilles Martinoty

Introduction

Les avancées récentes dans le domaine des caméras aériennes permettent actuellement d'obtenir sans difficulté des images numériques à très haute résolution, avec un pixel pouvant facilement atteindre une résolution de l'ordre de 20 cm. De même, le domaine des nouveaux capteurs satellitaires haute résolution (résolution meilleure que le mètre), tels que Pléiades, QuickBird ou Ikonos, est en plein développement. Ces nouveaux capteurs apportent de nombreuses nouvelles informations, à la fois géométriques et radiométriques. En effet, avec l'amélioration de la résolution apparaissent de nouveaux phénomènes liés à la structure tridimensionnelle de la scène observée. Dans cet article, nous nous intéressons 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 des ombres. Cela implique un environnement « rugueux », ce qui entraîne diverses spécificités radiométriques. On peut tout d'abord noter l'omniprésence que le terme d'éclairement direct n'est pas toujours présent et que les termes d'éclairement diffus peuvent devenir prépondérants. D'autre part, l'existence du sursol implique de tenir compte des phénomènes d'inter-réflexion notamment entre les bâtiments en vis-à-vis dans les « canyons » formant les rues. On parle souvent dans ce cas de « rétro-éclairage » des façades.

Ces caractéristiques, propres aux images haute résolution, n'ont commencé à être prises en compte que récemment. Nous rappellerons quelques travaux antérieurs concernant ces problèmes dans le paragraphe suivant. Pour notre part, nous avons développé un outil de simulation des éclaircissements reçus sur une scène quelconque, décrite par un modèle vecteur 3D, que nous détaillerons dans le paragraphe « *Description de l'outil de simulation* », page suivante. Nous avons utilisé cet outil pour évaluer l'importance des différents termes dans le cas réel d'une rue du centre-ville d'Amiens (chapitre « *Étude du cas réel d'une rue au centre-ville* », page 13). L'intérêt de se placer dans un cas réel est que l'on peut effectuer une validation des ordres de grandeur obtenus avec les éclaircissements réels notamment par le biais de correction des ombres sur les images.

En effet, si les simulations sont en accord avec la réalité, il doit être possible de « ré-éclairer » 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 situées à proximité. Nous verrons comment et pour quels résultats au chapitre « *Correction des ombres* », page 15. Ce faisant, nous pourrions également évaluer l'importance relative des différents termes de radiométrie sur la qualité visuelle du résultat. La correction des ombres présentant un intérêt intrinsèque pour une meilleure visualisation des images, il sera intéressant de voir si tous les termes d'éclairement sont nécessaires pour obtenir une correction des ombres satisfaisante, sachant que le traitement de grandes zones avec l'outil développé n'est pas envisageable pour des questions de temps calcul.

Travaux antérieurs

Du fait de l'émergence récente des capteurs permettant d'obtenir les images à très haute résolution, les travaux s'intéressant aux problèmes radiométriques décrits précédemment ne sont apparus que récemment. Initialement, les modèles classiques de transfert radiatif tels que 6S [VERMOTE et al 97] étaient adaptés au contexte satellitaire basse résolution avec une approximation en sol plat. Ces modèles ont été réutilisés ou étendus afin de prendre en compte des scènes présentant du relief et des zones aux propriétés radiométriques hétérogènes, 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 utilisées pour modéliser une scène urbaine. Le code Amaris [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 d'obtenir par simulation l'importance relative des différents termes de luminance au niveau du capteur (Cf. [MIESCH, BRIOTTET 01]) à l'ombre et au soleil sur un profil de rue. 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 divers codes ont jusqu'à présent surtout été utilisés en tant qu'outils de pure simulation permettant de choisir les propriétés de futurs capteurs (contraste potentiellement obtenu [GASCON et al 01], choix de bandes spectrales adaptées [MIESCH, BRIOTTET 01], etc.

Description de l'outil de simulation

Termes simulés

Les différents termes d'éclairement que l'on souhaite pouvoir simuler sont indiqués sur la figure B.1.1, ci-dessous. La source primaire de lumière correspond bien évidemment au soleil. Pour une surface plane, nous pouvons alors identifier trois contributions à l'éclairement d'un point (Cf. figure B.1.1, à gauche) :

- tout d'abord, le terme le plus évident est l'éclairement direct du soleil (E_{direct}), pour lequel il faut simplement tenir compte de l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère ;
- deuxièmement, l'atmosphère n'atténue pas seulement les rayons solaires, mais les diffuse également. Une deuxième source d'éclairement correspond donc à l'éclairement diffus provenant de l'ensemble du ciel (E_{diffus}) ;
- troisièmement, il existe un couplage entre le sol et l'atmosphère, 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'éclairement. Ce terme est d'un ordre de grandeur bien inférieur aux précédents et ne sera pas simulé dans notre outil.

Lorsque l'on tient compte de la rugosité de la scène, deux termes supplémentaires sont à prendre en compte, correspondant à de l'énergie réfléchiée sur une surface avant d'atteindre le point considéré (Cf. figure B.1.1, à droite) :

- l'énergie directe du soleil peut se réfléchir sur une façade et constituer un 4^{ème} terme d'éclairement ($E_{\text{direct-réfléchi}}$) ;
- de même, l'énergie diffuse du ciel réfléchiée par un bâtiment contribue à un 5^{ème} terme d'éclairement ($E_{\text{diffus-réfléchi}}$).

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

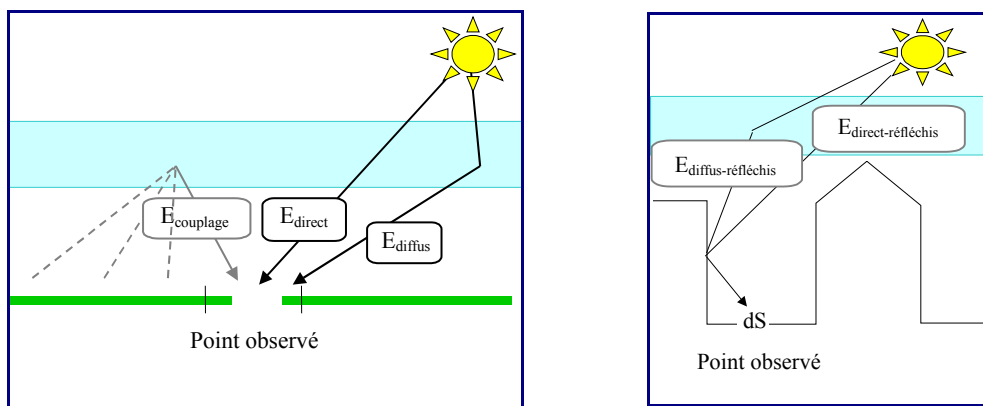


figure B.1.1 : à gauche : sources d'éclairement d'un point en sol plat.
À droite : sources d'éclairement supplémentaires dues au sursol.

Modélisation des éclairagements

Afin d'obtenir un processus physique, nous avons utilisé les modèles du soleil et du ciel qui ont été validés dans le code 6S [VERMOTE et al 97]. Celui-ci nécessite 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 réel d'une mission aérienne standard, il est bien évident que nous n'avons pas accès à l'ensemble de ces paramètres. Si l'on souhaite comparer les simulations obtenues avec les éclairagements qui ont illuminé une image aérienne réelle, il est nécessaire d'utiliser des hypothèses simplificatrices. Fort heureusement, les missions aériennes n'ont lieu que par temps dégagé, avec une grande visibilité horizontale (~20 km), ce qui constitue une simplification forte. Ainsi, pour obtenir des éclairagements potentiellement cohérents avec une mission aérienne donnée, nous utilisons dans 6S un modèle d'aérosols urbains standards, avec la visibilité comme seul paramètre.

La visibilité est facile à obtenir, puisque c'est une information sauvegardée par les aéroports. De plus, les réponses spectrales des trois caméras utilisées sont également prises en compte comme paramètres dans 6S. Ainsi, comme résultats de 6S, nous obtenons le spectre solaire et les éclairagements émis par le ciel dans les conditions de la mission aérienne. Pour gérer des géométries tridimensionnelles complexes et tenir compte des modèles précédents issus de 6S, nous avons décidé d'utiliser un logiciel de raytracing physique, tel que Renderpark [BEKAERT et al 01]. On dispose de modèles vectoriels tridimensionnels des bâtiments formant la scène que l'on considère. Les sources lumineuses que sont le soleil et le ciel sont introduites dans la simulation selon la méthode décrite dans la suite.

Modélisation du ciel

Le ciel se comporte comme une source hémisphérique non homogène englobant l'ensemble de la scène. Nous discrétisons la voûte céleste en une multitude de facettes, chacune émettant une énergie donnée par un modèle de ciel obtenu avec 6S (cf. figure B.1.2, page suivante).

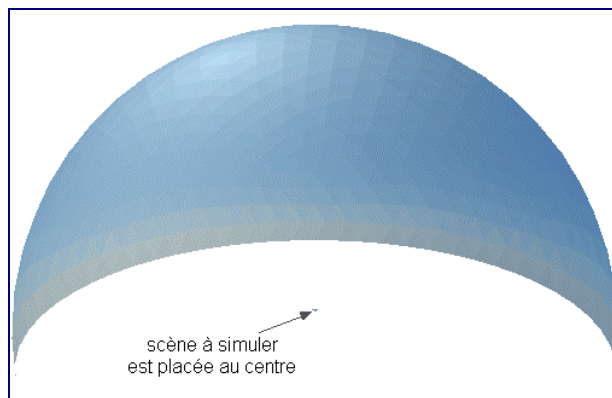


figure B.1.2 : éclairements du ciel obtenus avec 6S formant la voûte céleste dans un raytracer

Modélisation du soleil

Le soleil est inclus dans notre scène sous la forme d'une sphère lambertienne placée aux coordonnées obtenues à partir de la date et de l'heure souhaitées. Les proportions de cette sphère par rapport à son éloignement de la scène sont respectées, de sorte que l'angle solide apparent du soleil correspond bien à l'angle solide réel.

Obtention des termes d'éclairagements souhaités

Pour obtenir les termes d'éclairément E_{direct} , E_{diffus} , $E_{réfléchi}$, il suffit de réaliser les simulations suivantes par raytracing. Pour obtenir E_{direct} , on ne met que le soleil dans la simulation et l'on ne permet pas de réflexion sur les facettes. De même pour E_{diffus} , on met uniquement le ciel sans réflexion. L'obtention des termes $E_{réfléchi}$ est plus délicate, car elle implique de connaître les propriétés de réflexion des matériaux constituant la scène. Pour une pure simulation, on peut mettre les modèles que l'on souhaite. Par contre, dans le cas d'une scène réelle, nous proposons la méthode suivante pour s'approcher des valeurs effectives présentes dans la scène. Nous utilisons les images réelles en tant que sources pour obtenir des estimations grossières des albedos des matériaux, en les considérant comme lambertiens. Nous utilisons alors la même technique que précédemment, en éclairant la scène obtenue avec le ciel et le soleil. En soustrayant du résultat obtenu les éclairements directs venant du ciel et du soleil E_{direct} et E_{diffus} , nous obtenons finalement une estimation des inter-réflexions entre les facettes. Bien entendu, ce n'est qu'une approximation en raison de l'hypothèse lambertienne utilisée, mais qui devrait être suffisante dans de nombreux cas.

Étude 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 en centre-ville. Comme on peut le voir sur la figure B.1.3, cette rue apparaît comme très encaissée entre deux bâtiments assez grands. La prise de vue (et la simulation) a eu lieu en mai 2001, ce qui correspond à une hauteur du soleil de 60° . La rue est ainsi en partie à l'ombre. La visibilité est fixée à 18 km. La figure B.1.3 montre également sur une autre image le côté éclairé de la rue : on peut constater que la peinture est plutôt bien réfléchissante, avec une composante rouge prépondérante.

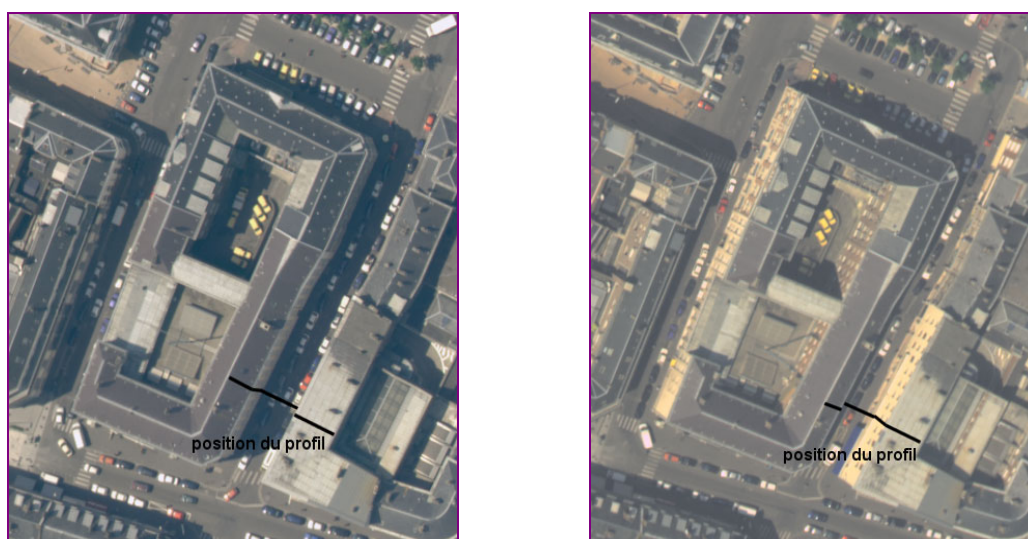


figure B.1.3 : cas réel d'une rue en centre-ville

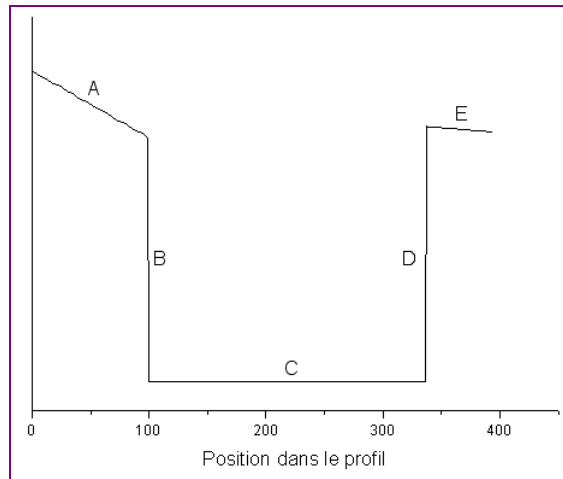


figure B.1.4 : vue schématique du profil de la rue

En utilisant l'outil précédemment décrit, nous pouvons obtenir l'importance relative des différents termes sur les différentes facettes, et notamment le long du profil indiqué en gras sur la figure B.1.3. Les résultats sont indiqués ci-dessous sur la figure B.1.5.

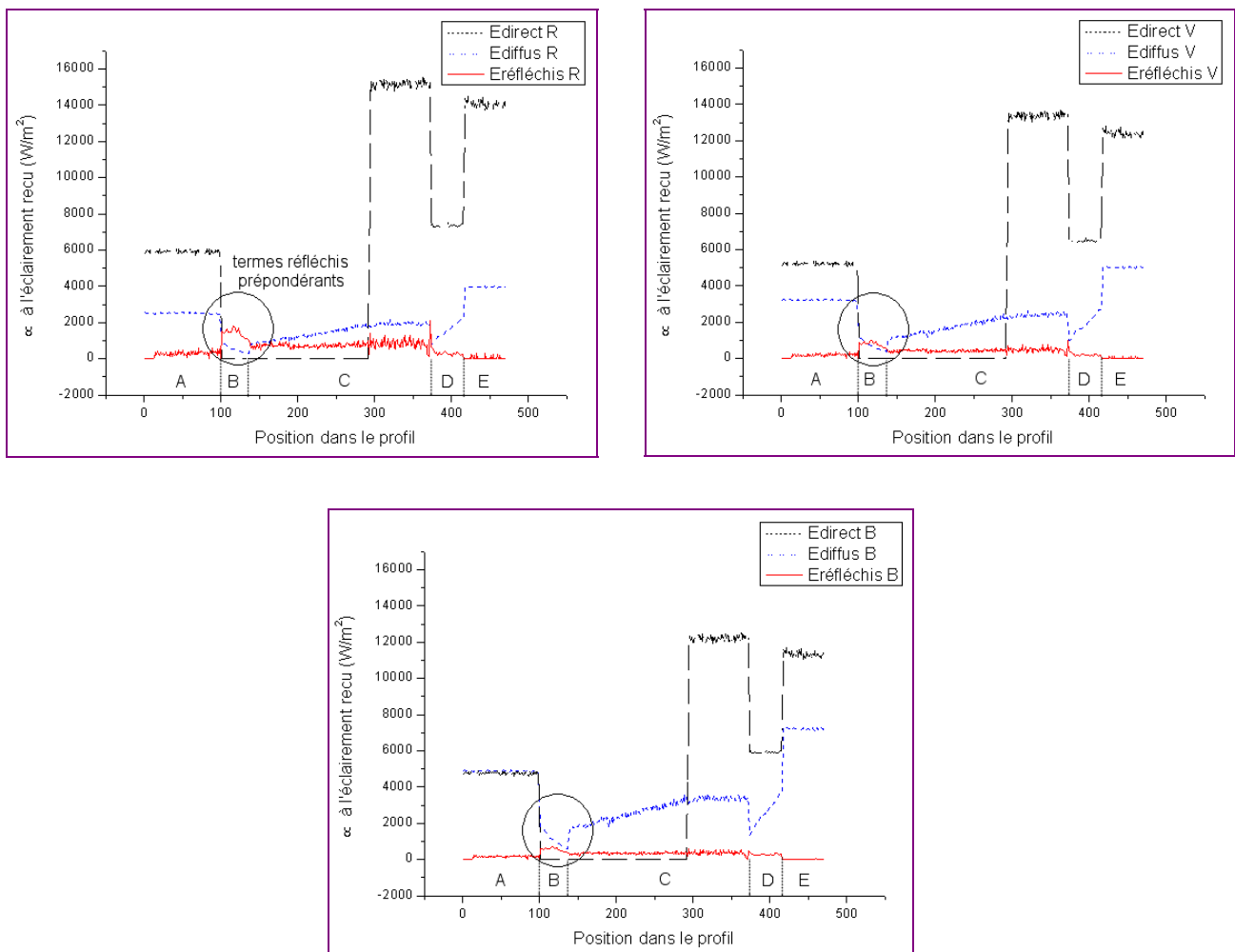


figure B.1.5 : valeurs des différents termes d'éclairages le long du profil dans les trois canaux R,V,B

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

Terme E_{direct}

En ce qui concerne le terme E_{direct} , on observe fort logiquement différents paliers, correspondant respectivement au toit pentu à gauche (en éclairage plutôt rasant, $\theta_s \sim 70^\circ$), à l'ombre projetée sur le mur vertical et sur une partie de la rue,

à l'éclairement reçu par le fond de la rue au soleil, à celui reçu par la façade au soleil et enfin à celui reçu par le toit plat à droite de la rue. Les facettes étant à chaque fois plates, on obtient des paliers qui correspondent à la variation de l'angle entre la normale à la facette et la direction du soleil.

Terme E_{diffus}

Après le plateau correspondant à l'énergie diffuse reçue par le toit en pente, on observe une très forte décroissance du terme E_{diffus} sur le mur vertical. Les valeurs sont jusqu'à plus de dix fois inférieures à celles reçues par le toit en pente (notamment tout en bas de la façade). Cela s'explique par le fait que l'énergie émise par la portion du ciel vue par cette façade est faible, puisqu'à l'opposé de la position du soleil. De plus, on observe qu'entre le haut et le bas de la façade, l'énergie reçue varie de près d'un facteur 2 sous l'effet de la diminution de la portion d'angle solide du ciel vu depuis la façade. De même, au fond de la rue, l'énergie décroît plus on entre dans l'ombre, puisque de moins en moins de ciel est vu. Ce phénomène d'ombres d'autant plus sombres que l'on se rapproche d'un bâtiment est facilement constatable sur des images aériennes réelles. La façade au soleil met en évidence également l'importance de la variation d'angle solide entre le bas et le haut du mur.

Terme $E_{\text{réfléchis}}$

En ce qui concerne les termes $E_{\text{réfléchis}}$, les résultats sont particulièrement intéressants. Bien évidemment, ces termes sont nuls sur les deux toits puisqu'aucune surface n'est susceptible de réfléchir un rayonnement vers ces surfaces. C'est dans la rue elle-même qu'apparaissent les résultats les plus instructifs. Considérons tout d'abord la façade à l'ombre. L'essentiel de l'angle solide qu'elle intercepte correspond à la façade en regard, qui, elle, est en plein soleil. Le rayonnement en provenance de cette façade est donc particulièrement important : c'est ce terme qui devient largement 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 $E_{\text{réfléchis}}$ 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.

Correction des ombres

Principe

Les simulations précédentes ont un intérêt en elles-mêmes, afin d'avoir une idée précise des ordres de grandeur des différents termes d'éclairement. De plus, nous pouvons utiliser ces simulations afin de réaliser des corrections des ombres sur les images de la prise de vue aérienne. Ce faisant, nous effectuons également un contrôle indirect des simulations, puisque les zones ré-éclairées doivent avoir une teinte réaliste par rapport à leur environnement.

Afin de réaliser cette correction, nous utilisons les hypothèses suivantes. Nous ne connaissons pas *a priori* les propriétés de réflectances directionnelles des matériaux à l'ombre. Aussi nous plaçons-nous dans une hypothèse de matériaux lambertiens pour effectuer les corrections. Dans ce cadre, l'équation reliant les radiances des images aux éclairagements reçus s'écrit :

$$L = \rho (\text{constante}) / \pi \cdot (E_{\text{direct}} + E_{\text{diffus}} + E_{\text{réfléchis}}) + L_{\text{parasite}}, \text{ avec } \rho \text{ l'albédo (constant) du matériau.}$$

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

- $L_{\text{atmosphère}}$, l'énergie diffusée par l'atmosphère qui ne touche pas le sol, mais est directement (rétro-)diffusée vers le capteur ;
- $L_{\text{direct-diffus}}$, l'énergie venant directement du soleil, réfléchi par l'environnement de la surface que l'on considère, et qui contribue malgré tout à l'énergie semblant venir de la surface en raison de la diffusion par l'atmosphère ;
- $L_{\text{diffus-diffus}}$, l'énergie venant de l'ensemble du ciel, et réfléchi par l'environnement de la même manière que l'énergie précédente ;
- les autres termes (réflexions multiples, couplage avec l'atmosphère, etc) venant également de l'environnement.

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

$$L_{\text{ombre}} = \rho / \pi \cdot (E_{\text{diffus}} + E_{\text{réfléchis}}) + L_{\text{parasite}}$$

$$L_{\text{soleil}} (\text{cherché}) = \rho / \pi \cdot (E_{\text{direct}} + E_{\text{diffus}} + E_{\text{réfléchis}}) + L_{\text{parasite}}$$

D'où :

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

