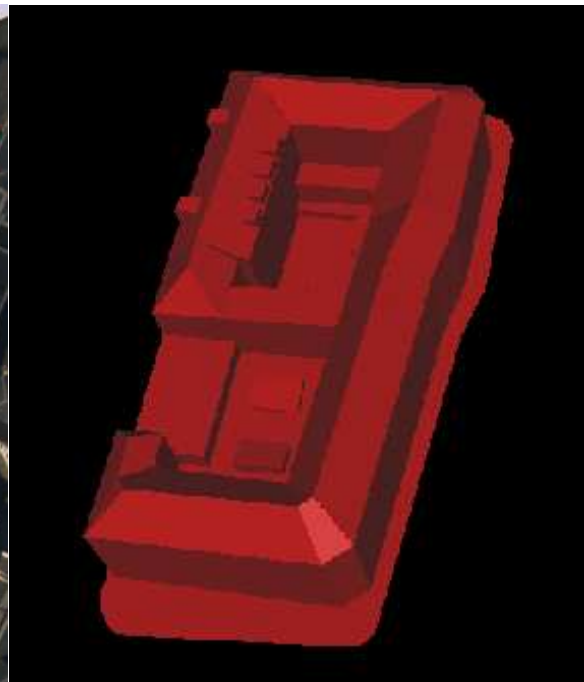




Étude de modèles de BRDF adaptés au milieu urbain à haute résolution



(1)

Stage du DESS *optique et matériaux* de l'université de Paris VII
encadré par Didier BOLDO et Gilles MARTINOTY

Mathieu JACQUES

février-août 2002

Remerciements

Je souhaiterais commencer ce rapport par un remerciement général, destiné à toutes les personnes du MATIS pour leur disponibilité et leur gentillesse, mais aussi par quelques remerciements personnels.

Didier Boldo et Gilles Martinoty, mes responsables, pour, tout d'abord, m'avoir permis de réaliser ce stage (je n'avais jamais fait de C++ ni de traitement de l'image), pour leur aide en programmation et tout le temps qu'il m'ont consacré.

Grégoire Maillet et Franck Jung pour, respectivement, son cours et ses travaux pratiques de C++ des premiers mois.

Emmanuel Frisch pour son aide mathématique, Nesrine et Frédéric.

Table des matières

1	Présentation de l'entreprise	6
1.1	L'Institut Géographique National	6
1.2	La recherche à l'IGN	7
I	Introduction	8
II	État de l'art des modèles de BRDF	12
2	But de l'état de l'art	14
3	Fonctions récurrentes dans les modèles	15
4	Les différents modèles de BRDF	19
4.1	Les modèles génériques pour les surfaces isotropes	19
4.1.1	Les modèles utilisant la superposition de noyaux	19
4.1.2	Les modèles non décomposables	22
4.2	Les modèles génériques pour les surfaces anisotropes	27
4.3	Les modèles dédiés à l'étude de la végétation	29
4.3.1	Les modèles utilisant la superposition de noyaux	29
4.3.2	Les modèles non décomposables	32
4.4	Les modèles dédiés à l'étude des surfaces multicouches	35
5	Les modèles choisis pour l'étude en milieu urbain	37
5.1	Les critères de sélection	37
5.1.1	Un modèle générique	37
5.1.2	Un modèle avec peu de paramètres	37
5.1.3	Les autres exclus	38
5.2	Les modèles retenus	38
5.2.1	Les noyaux de Snyder(7) et Cook-Torrance(6)	38
5.2.2	Le modèle de Torrance-Sparrow(4)-Oren-Nayar(3)	38
5.2.3	Le modèle de Dymond-Qi(19)	38
5.2.4	Le modèle de Staylor-Suttles(11)	38

5.2.5	Le modèle de Phong(5)	39
5.2.6	Les modèles de Shibayama(9) et Walthall(10)	39
5.2.7	Le modèle de Rahman-Pinty-Verstraete(13)	39
5.2.8	Le modèle de Hapke(8)	39
III	Validation et capacités d'interpolation des modèles	40
6	Validation des modèles	42
6.1	Etude qualitative des modèles	42
6.1.1	Elimination intuitive	42
6.2	Validation quantitative des modèles	45
6.2.1	Régression des modèles de BRDF	45
6.2.2	Obtention des paramètres	46
6.2.3	Exploitation des résultats	46
6.2.4	Discussion sur les modèles	54
6.3	Conclusions sur la pertinence des modèles	58
7	Capacité d'interpolation du modèle de TSON	60
7.1	Rappel du problème initial	60
7.2	Vérification des capacités d'interpolation du modèle	61
7.2.1	Technique de vérification et obtention des paramètres	61
7.2.2	Importance de la répétition de l'échantillonnage	61
7.2.3	Second problème : des paramètres différents pour le même matériau	63
IV	Essais du modèle de TSON sur des images à haute résolution	70
8	Présentation des outils	72
8.1	Introduction	72
8.2	Les images réelles	72
8.3	Les scènes en 3D	72
9	Test du modèle sur les images réelles	74
9.1	Déroulement du test	74
9.2	Simulations sur les images haute résolution	76
9.2.1	Présentation des scènes choisies	76
9.2.2	Discussion autour des résultats obtenus	80
V	Conclusions générales	84
	Bibliographie	88

Chapitre 1

Présentation de l'entreprise

1.1 L'Institut Géographique National

L'Institut Géographique National (IGN), fut créé en 1940. C'est un établissement public, à caractère administratif et commercial, sous la tutelle du Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.

Cet établissement regroupe plus de 2000 personnes réparties dans divers sites : la Direction Générale (Paris), IGN France International (Paris), IGN Espace (Toulouse), les Services techniques (Saint-Mandé), la base aérienne (Creil), et 15 agences commerciales régionales. Le budget de fonctionnement est de 130 000 000 euros, assumé à hauteur de 55% par l'État.

Les missions de l'IGN sont :

- Exécuter les travaux nécessaires à l'implantation et à l'entretien d'un réseau géodésique ¹ et de nivellement ² de précision.
- Accomplir des travaux relatifs à la télédétection aérienne et spatiale à caractère géographique, à la numérisation des données et à l'élaboration de cartes thématiques.
- Effectuer des recherches d'intérêt général (activité en liaison avec d'autres organismes scientifiques et techniques).
- Assurer la couverture photographique aérienne du territoire français (renouvelée tous les 5 ans).
- Établir, publier, diffuser et vendre des documents sous format graphique, photographique ou numérique et gérer la documentation liée à ces activités.
- Assurer le fonctionnement de l'ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques).

Le principal site de production est Saint-Mandé, avec une imprimerie intégrée permettant l'édition de 10 millions de cartes par ans.

¹Science de la mesure des dimensions et de la forme de la terre. La géodésie intervient en amont des travaux de cartographie. Des points de repère couvrent le territoire français, formant un canevas géodésique ; leurs coordonnées (x, y, z) sont déterminées par triangulation ou grâce au GPS.

²Technique permettant de déterminer l'altitude de points caractéristiques

1.2 La recherche à l'IGN

Les services de recherche, également situés à St-Mandé, regroupent 53 personnes (dont 46 chercheurs), et se divisent en 4 laboratoires :

- **Le laboratoire d'Opto-Electronique et de Micro-Informatique**

Le LOEMI conduit les recherches relatives aux équipements optiques et électroniques (conception et production d'une caméra numérique).

- **Le laboratoire Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique**

Le COGIT prend en charge les recherches relatives à la gestion, à l'exploitation et à la représentation de l'information géographique (modélisation, gestion des données, généralisation de l'information géographique, cartographie automatique ...).

- **Le Laboratoire de REcherche en Géodésie**

Le LAREG travaille sur l'amélioration des systèmes de référence terrestre et les techniques de positionnement. Il participe notamment à l'établissement d'un système de référence mondial.

- **Le laboratoire Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution**

Les recherches poursuivies au MATIS portent sur l'interprétation de scènes, la reconnaissance et la restitution d'objets géographiques, ainsi que sur leur mise à jour. Elles comprennent l'évaluation des processus tant dans le domaine de la précision, de la fiabilité et de l'exhaustivité des résultats, que dans les domaines de la performance et de l'acceptabilité pour l'opérateur de production. Les recherches s'articulent actuellement autour de quelques thèmes principaux :

- l'extraction et restitution du bâti,
- la détection de changements pour la mise à jour de bases de données topographiques,
- l'évaluation de la qualité des données 3D,
- la radiométrie ³,
- les modèles numériques d'elevation et la corrélation automatique.
- la lecture automatique couplée des cartes et des images.

En outre, des études antérieures ont permis au MATIS d'acquérir des compétences sur les sujets tels que l'extraction et la restitution du réseau routier, ainsi que l'aérotriangulation, qui, expliqué simplement, permet de déterminer les paramètres d'orientation d'une photographie aérienne ainsi que les coordonnées des points mesurés dans un système de coordonnées spécifique.

C'est dans ce dernier laboratoire que j'ai décidé d'effectuer, pendant 6 mois, le stage de la formation que je suis actuellement, le DESS "Laser, matériaux et milieux biologiques" de la faculté de Paris VII à Jussieu.

³Science qui a pour objet de déterminer la puissance du rayonnement électromagnétique dans le domaine du rayonnement optique (longueurs d'onde comprises entre 100 nm et 100 μm environ)

Première partie

Introduction

Les progrès récents réalisés dans le domaine de la prise de vue numérique ont permis d'accéder à de nouvelles images couleur particulièrement intéressantes. En effet, la caméra numérique de l'IGN a permis d'acquérir des images couleur à grande échelle (pixel de l'ordre de 25 cm) avec de forts recouvrements entre images. Dans ce cadre, une action de recherche visant à l'identification de matériaux en milieu urbain à partir d'images aériennes en multi-recouvrements est en cours. L'objectif est d'être capable d'associer aux différentes régions issues d'une segmentation un type de matériau (goudron, tuile, ardoise, etc.). Pour atteindre ce but, la radiométrie des matériaux constitue la principale source d'informations. Précisément, la réussite de l'entreprise passe par l'étude et la modélisation de la fonction de réflectance bidirectionnelle d'un matériau (BRDF), dont l'expression est détaillée dans la suite de cette partie. L'idée principale est la suivante : grâce au fort recouvrement entre les images, un même point est vu sur de multiples images différentes, c'est-à-dire à partir de différents points de vue. On pourra alors avoir accès aux mesures de la BRDF dans ces directions, et ainsi remonter au type de matériau de la surface. Pour cela, on propose de suivre le chemin suivant.

- La BRDF apparaît comme une fonction "résumant" l'ensemble des propriétés de réflectance d'un matériau à une échelle donnée. Vu son importance notamment en synthèse d'images et en télédétection, cette fonction a fait l'objet de nombreuses études, tant expérimentales que théoriques, et de nombreux modèles ont été proposés. A partir de l'abondante littérature portant sur la BRDF, on se propose, tout d'abord, d'établir un état de l'art de l'ensemble des modèles existants (tant empiriques que physiques), en soulignant les différentes hypothèses et simplifications physiques, les avantages et les limites des modélisations.
- Dans un deuxième temps, nous évaluerons ces différents modèles dans le cadre de l'application à notre problème particulier en milieu urbain. Nous utiliserons, dans cette partie, une base de données de mesures de la BRDF pour des matériaux que l'on trouve en milieu urbain. L'objectif sera double. D'une part, il sera nécessaire de se rapprocher le plus possible des valeurs expérimentales, et d'autre part, il faudra favoriser les modèles les plus simples, sachant que ces modèles devront être "inversés" dans le cadre du processus global. Pour réaliser cette évaluation, nous mettrons au point un algorithme de régression permettant d'estimer les paramètres des modèles connaissant les données expérimentales.
- Dans un troisième temps, et en cas de succès des opérations précédentes, nous nous intéresserons aux capacités d'interpolation des modèles. En effet, un même point ne peut être vu habituellement qu'à partir d'une dizaine de points de vue au maximum. Il s'agira donc de vérifier que les modèles peuvent être calculés avec peu de points, et d'étudier dans quelles conditions ils permettent de discriminer les différents matériaux.

- Et enfin, dans l'hypothèse d'un bon déroulement de toutes ces étapes, nous testerons les modèles sur de vraies images à haute résolution, prises par la caméra numérique de l'IGN.

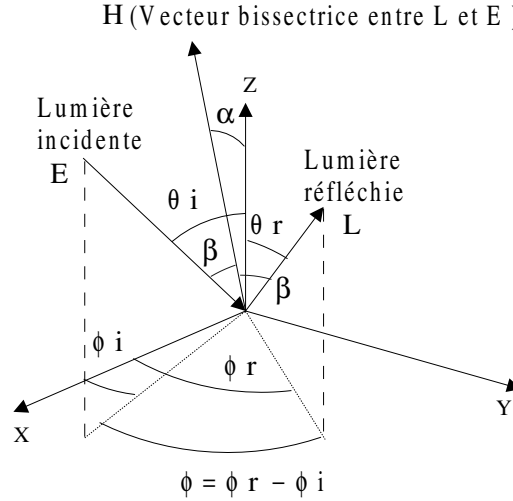


FIG. 1.1 – Angles et vecteurs définissant la BRDF

Comme nous l'avons écrit dans la présentation du plan, la réussite de notre entreprise passe par la modélisation de la BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function). Pour caractériser la manière dont une surface réfléchit la lumière, on utilise cette fonction définie par le rapport entre la luminance réfléchie dans la direction d'un observateur, et l'éclairement reçu par la surface provenant de la source. La luminance $L_r(\theta_r, \phi_r)$ est le flux énergétique émis par une surface dans une direction donnée, par unité de surface et par unité d'angle solide projeté, tandis que l'éclairement $E(\theta_i, \phi_i)$ est le flux énergétique par unité de surface, arrivant sur une surface. Cette fonction a pour unité le sr^{-1} .

$$\rho(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \quad (1.1)$$

Deuxième partie

État de l'art des modèles de BRDF

Chapitre 2

But de l'état de l'art

Le problème auquel nous avons à faire face est de retenir des modèles de BRDF adaptés au milieu urbain. Or, la définition de la BRDF laissant beaucoup de libertés, il existe un grand nombre de modèles ayant, à leur manière, caractérisé la réflexion de la lumière sur une surface : l'état de l'art va justement permettre de recenser un grand nombre de modèles existants. Au final, on ne gardera que ceux dont les caractéristiques correspondent le mieux à la modélisation de la réflexion de la lumière sur un objet de l'environnement urbain.

Chapitre 3

Fonctions récurrentes dans les modèles

Dans nombre de modèles, certaines fonctions apparaissent de façon récurrente. Ceci est notamment dû à des modifications de modèles, ou à l'utilisation de ces derniers par d'autres personnes. Ainsi, pour éviter une présentation trop encombrante, nous allons exposer certaines de ces fonctions.

Le paramètre D

Ce paramètre, qui ne dépend que des angles d'observation et d'éclairement, s'écrit :

$$D = [\tan^2 \theta_i + \tan^2 \theta_r - 2 \tan \theta_i \tan \theta_r \cos \phi]^{1/2}$$

L'angle de diffusion ξ

C'est l'angle entre les rayons incidents et réfléchis. Il est défini par :

$$\cos \xi = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \phi$$

On précise également que $\xi = 2\beta$ (cf. figure 1.1).

La fonction de phase

La fonction de phase caractérise la direction de la lumière réfléchie de manière diffuse sur une particule. Elle dépend de la nature du milieu rencontré, i.e. de la taille, de l'orientation, du caractère diélectrique des particules, mais aussi de la longueur d'onde de l'onde incidente. Si les particules sont de taille inférieure à la longueur d'onde, la fonction de phase est donnée par la formule de Rayleigh, et, si elles ont une taille supérieure, elle est donnée par la formule de Mie. Cependant, la plupart des matériaux contiennent des particules de tailles différentes et, c'est pourquoi, on décrit la fonction de phase par la formule empirique d'Henye-Greenstein :

$$P(g, \xi) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{[1 + g^2 - 2g \cos(\pi - \xi)]^{1.5}} \quad (3.1)$$

Cette formule ne dépend que d'un paramètre g ($|g| \leq 1$), appelé facteur d'asymétrie. On note que si $g = 0$ la diffusion est isotrope, tandis qu'une valeur positive (resp. négative) de g indique une tendance à une diffusion vers l'avant (resp. vers l'arrière, ou rétrodiffusion).

La paramétrisation de Goudriaan

Certains modèles de BRDF modélisent une surface naturelle par un sol qui réfléchit la lumière de manière parfaitement lambertienne par exemple, surmonté d'un couvert végétal modélisé par une répartition aléatoire de feuilles. Afin de pouvoir modéliser un grand nombre de milieux végétaux différents, l'orientation des feuilles est déterminée par le paramètre de Goudriaan κ_x . On note, dans la littérature, l'existence de 2 paramètres de Goudriaan différents. Pour D. Jupp [Jupp, 1998], ce paramètre vaut :

$$\begin{aligned}\kappa_x &= \Psi_1 + \Psi_2 \cos \theta_x \\ \Psi_1 &= 0.5 - 0.489\chi_1 - 0.33\chi_1^2 \\ \Psi_2 &= 1 - 2\Psi_1\end{aligned}$$

tandis que pour F.Cabot [Cabot, 1995], il est égal à :

$$\begin{aligned}\kappa_x &= \Psi_1 + \Psi_2 \cos \theta_x \\ \Psi_1 &= 0.5 - 0.6333\chi_1 - 0.33\chi_1^2 \\ \Psi_2 &= 0.877(1 - 2\Psi_1)\end{aligned}$$

Dans ces expressions, θ_x représente la direction d'observation ou d'éclairement selon le cas, et χ_1 est un paramètre caractérisant l'orientation des feuilles. χ_1 varie de 0.4, pour une forêt constituée d'arbres élancés, à 0.6 pour une forêt faite d'une végétation relativement plane.

La fonction de réflexions multiples

Un nombre important de modèles prennent en compte les réflexions multiples à l'intérieur d'un couvert. Pour cela, on a introduit une fonction qui contient 1 paramètre, ω , l'albédo de simple diffusion. Cette fonction s'écrit sous la forme :

$$H(x, \omega) = \frac{1 + 2x}{1 + 2x\sqrt{1 - \omega}} \quad (3.2)$$

x est une variable, dépendante des angles d'illumination et d'observation, dont on précisera la valeur dans chaque modèle.

Le facteur d'atténuation géométrique (\mathcal{GAF})

Une partie des modèles de BRDF représente les surfaces comme étant recouvertes d'une infinité de cavités en forme de V, chaque cavité étant constituée de 2 facettes planes (cf. Figure 3.1). Le \mathcal{GAF} traduit le fait qu'il y ait des zones éclairées de la cavité, masquées pour l'observateur ainsi que des zones non éclairées. On introduit alors les termes d'ombrage et de masquage (cf. Figure 3.2).

En posant $M=\text{Max}$ et $m=\text{min}$, le facteur s'écrit :

$$\mathcal{GAF} = M \left[0, m \left[1, \frac{2 \cos \theta_i \cos \theta_a}{\cos \theta_i \cos \theta_a + \sin \theta_i \sin \theta_a \cos(\phi_i - \phi_a)}, \frac{2 \cos \theta_r \cos \theta_a}{\cos \theta_r \cos \theta_a + \sin \theta_r \sin \theta_a \cos(\phi_r - \phi_a)} \right] \right]$$

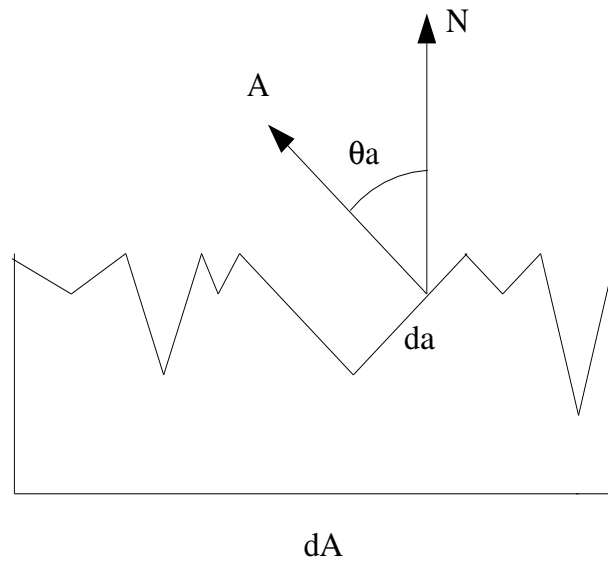


FIG. 3.1 – Modélisation de la surface par des cavités “en V”

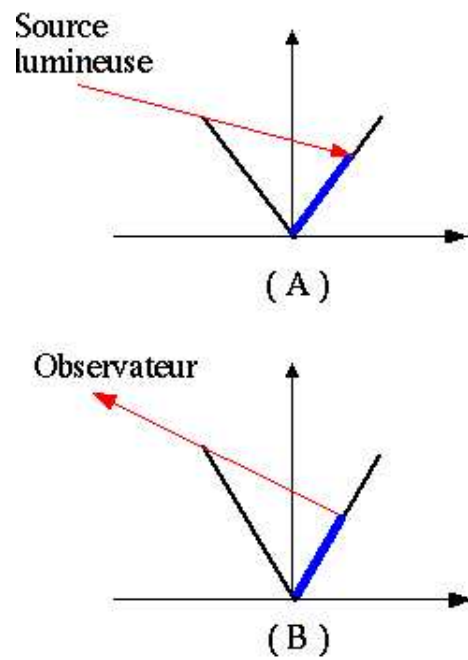


FIG. 3.2 – (A) : ombrage (B) : masquage

θ_a est la normale à la surface d'une facette. Lorsqu'on considère une facette parfaitement spéculaire (un miroir parfait), cette normale est le vecteur bissectrice entre les directions d'illumination et d'observation (l'angle sous lequel arrive la lumière est le même que celui sous lequel elle est réfléchie dans le cas d'un miroir).

Le facteur de Fresnel

C'est un coefficient qui donne la proportion de lumière réfléchie sur la surface de normale \vec{H} d'un matériau purement diélectrique. Ce facteur contient 2 paramètres n_1 et n_2 qui sont les indices des milieux dans lesquels se propagent respectivement l'onde incidente et l'onde transmise. Sa formule pour une onde électromagnétique non polarisée s'écrit :

$$F(c, \beta) = \frac{1}{2} \frac{(c - \cos \beta)^2}{(c + \cos \beta)^2} \left[1 + \frac{[\cos \beta (c + \cos \beta) - 1]^2}{[\cos \beta (c - \cos \beta) + 1]^2} \right]$$

avec $c = \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 + \cos^2 \beta} - 1$. Comme l'onde incidente que nous considérons se propage dans l'air, on pose $n_1 = 1$ et $n_2 = n$, n étant l'indice du matériau.

Chapitre 4

Les différents modèles de BRDF

Les multiples modèles de BRDF sont basés sur des considérations plus ou moins physiques selon les cas. On distingue 4 types différents de modèles :

- Les modèles *physiques* : ils découlent de modélisations de l'optique géométrique et du transfert radiatif ;
- Les modèles *semi-empiriques* : bien qu'étant empiriquement déterminés, leurs paramètres ont un sens physique, souvent relié à la surface étudiée ;
- Les modèles *empiriques* : ils n'ont été fondés sur aucune loi physique et, de plus, certains ne respectent pas la conservation d'énergie (des modèles créent de l'énergie!) ;
- Les modèles *mathématiques* : ce sont, par exemple, des polynômes, des développements limités ...

4.1 Les modèles génériques pour les surfaces isotropes

4.1.1 Les modèles utilisant la superposition de noyaux

Idée de la superposition de noyaux

Le principe de cette méthode de modélisation est de donner une forme générale pour l'expression de la BRDF, afin qu'il y ait une importante collection de termes qui puisse s'adapter à cette formulation. La réflexion de la lumière sur de nombreuses surfaces réelles se décompose en deux noyaux : un noyau pour la réflexion spéculaire, i.e. dans la direction opposée à la lumière incidente par rapport à la normale à la surface. L'autre concerne la réflexion diffuse, i.e. dans tout l'espace. Grâce à de nombreuses combinaisons de termes, l'intérêt est de pouvoir reproduire l'interaction lumière-matière pour un maximum de type de surfaces étudiées. L'équation générale de ce type de BRDF a pour forme :

$$\rho = k_d \rho_{diff} + k_s \rho_{spc} \quad (4.1)$$

où k_d et k_s sont 2 paramètres représentant les fractions de la surface se comportant respectivement comme un réflecteur diffus, ou comme un réflecteur spéculaire. Et comme deux surfaces ne se

ressemblent pas, chaque noyau possèdent en plus ses propres paramètres, lui permettant de représenter au mieux chaque type de surface.

Les différentes fonctions noyaux-partie diffuse

1. Le modèle de Lambert [Lambert, 1760]

Ce modèle, créé au *XVIII*ème siècle par Lambert, constitue le premier pas en matière d'interaction lumière-matière. Néanmoins, il ne représente pas forcément un cas réaliste en considérant que la surface est un diffuseur parfait (elle réémet la lumière isotropiquement). La partie diffuse de la BRDF s'écrit :

$$\rho_{diff} = \frac{\rho_{albedo}}{\pi} \quad (4.2)$$

Il y a **2 paramètres** : ρ_{albedo} l'albédo de surface, qui est la fraction de particules renvoyées de manière diffuse après réflexion sur une surface, et k_d la partie diffuse de la surface.

2. Le modèle de Minnaert [Minnaert, 1941]

Ce modèle, vieux de plus de 60 ans, a été mis en place de façon à étudier les réflexions de la lumière solaire sur la surface de la lune. Le noyau, qui comporte **3 paramètres** ρ_L , k_d la partie diffuse de la surface, et k , a pour forme :

$$\rho_{diff} = \rho_L \frac{k+1}{2} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{k-1} \quad (4.3)$$

Bien qu'empirique, il présente l'intérêt de respecter la symétrie en θ_i , θ_r .

3. Le modèle d'Oren-Nayar [Oren and Nayar, 1993]

Ce n'est qu'en 1993 que quelqu'un a réellement créé un modèle de surface permettant de simuler la réflexion diffuse de la lumière de manière plus réaliste qu'en utilisant le modèle de Lambert. A l'aide d'une modélisation de surface par des cavités en forme de V aléatoirement orientées, Oren et Nayar ont réalisé un modèle physique comprenant **3 paramètres** : σ la rugosité du matériau, ρ_{albedo} l'albédo de surface, et k_d la partie diffusante de la surface. Le noyau s'écrit alors :

$$\rho_{diff} = \frac{\rho_{albedo}}{\pi} (A + B \max[0, \cos(\phi_r - \phi_i)] \sin \alpha \tan \beta) \quad (4.4)$$

avec

$$A = 1.0 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}, \quad B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \quad \text{et où } \alpha = \max(\theta_i, \theta_r) \text{ et } \beta = \min(\theta_i, \theta_r)$$

Les différentes fonctions noyaux-partie spéculaire

4. Le modèle de Torrance-Sparrow [Torrance and Sparrow, 1967]

C'est un noyau créé pour traduire, de façon assez complète, la réflexion spéculaire de la lumière sur une surface. Ce modèle physique, basé sur la même modélisation de surface que celle réutilisée ultérieurement par Oren et Nayar, comporte **3 paramètres** : k_s la partie spéculaire de la surface, σ rugosité de la surface et n indice du matériau (n est présent dans le facteur de Fresnel F , chapitre 3). Les termes \mathcal{GAF} et θ_a , qui ne sont pas des paramètres, sont également définis au chapitre 3. Le noyau créé a pour forme :

$$\rho_{spc} = \frac{F(c, \xi) \mathcal{GAF}}{\cos \theta_i \cos \theta_r \cos \theta_a} c e^{-\frac{\theta_a^2}{2\sigma^2}} \quad (4.5)$$

On précise que

$$1/c = \int_{\theta_a=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi_a=0}^{2\pi} e^{-\frac{\theta_a^2}{2\sigma^2}} \sin \theta_a d\phi_a d\theta_a$$

5. Le modèle de Phong [Phong, 1975]

Ce modèle ne contient que **2 paramètres** qui sont k_s la partie spéculaire de la surface, et n un exposant spéculaire propre au modèle. Il en découle le noyau suivant :

$$\rho_{spc} = \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \alpha \quad (4.6)$$

Bien qu'étant très succinct et non physique, c'est le modèle dont se servent les cartes graphiques actuelles pour simuler la réflexion spéculaire.

6. Le modèle de Cook-Torrance [Cook and Torrance, 1981]

Le modèle présenté ici est une amélioration du noyau créé par Phong (cf. modèle 5) quelques années auparavant, dans le sens où il inclut, dans ses variétés de surface, les métaux (ce que Phong ne faisait pas). Le modèle créé a pour forme :

$$\rho_{spc} = \frac{D(\alpha) F(c, \beta) \mathcal{GAF}}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (4.7)$$

$D(\alpha)$, qui est la fonction de distribution des pentes des facettes, a pour expression

$$D(\alpha) = \frac{e^{-\left(\frac{\tan \alpha}{\sigma}\right)^2}}{\sigma^2 \cos^4 \alpha} \quad , \text{ où } \sigma \text{ représente le coefficient de rugosité.}$$

On précise que \mathcal{GAF} et $F(c, \beta)$ sont définis au chapitre 3. En résumé, ce modèle comprend **3 paramètres**, k_s la partie spéculaire de la surface, m le coefficient de rugosité et n , l'indice du matériau, qui est présent dans le facteur de Fresnel.

7. Le modèle spéculaire de Snyder [Snyder and Wan, 1998]

Snyder a développé 3 modèles de BRDF dont un dédié aux surfaces ayant un fort comportement spéculaire, telles que des étendues d'eau découvertes ou cachées par de la végétation, mais aussi des surfaces gelées ou enneigées. Ce modèle semi-empirique recèle **3 paramètres** : n l'indice du matériau sur lequel se réfléchit la lumière (contenu dans le facteur de Fresnel), σ la rugosité de la surface, et k_s la partie spéculaire de la surface.

$$\rho_{spc} = \frac{1}{4} \frac{F(c, \xi) P(\theta_n, \sigma)}{\cos \theta_i \cos \theta_r \cos^4 \theta_n} \quad (4.8)$$

où $P(\theta_n, \sigma) = \frac{1}{\pi \sigma^2} e^{\left(-\frac{\tan \theta_n}{\sigma^2}\right)}$ est la fonction de probabilité d'observation d'une réflexion spéculaire dans une direction donnée. On a noté $\theta_n = \arccos \left[\frac{\cos \theta_r + \cos \theta_i}{2 \cos(\xi/2)} \right]$ la direction de la normale à la surface des facettes.

4.1.2 Les modèles non décomposables

A l'opposé de la partie précédente, il existe nombre de modèles de BRDF génériques dont l'expression n'est pas décomposable en sous parties. Nous allons les détailler dans les paragraphes qui suivent.

8. Le modèle de Hapke [Hapke, 1981]

Créé en 1981, le modèle de Hapke a été spécialement construit pour étudier des surfaces planétaires. Il est semi-empirique, car basé en partie sur la théorie du transfert radiatif, et permet de simuler l'effet de hot spot. Cet effet traduit la rétrodiffusion de la lumière sur une surface, lorsque la source lumineuse est derrière l'observateur. Il y a **4 paramètres** qui sont ω l'albédo de simple diffusion, h l'étalement du hot spot, $S(0)$ la puissance du hot spot et g le paramètre de la fonction de phase. La BRDF relative à ce modèle s'écrit :

$$\rho = \frac{\omega}{4} \frac{1}{\cos \theta_r + \cos \theta_i} [(1 + B(\xi)) P(g, \xi) + H(\cos \theta_i, \omega) H(\cos \theta_r, \omega) - 1] \quad (4.9)$$

Il faut préciser que $B(\xi)$, fonction de rétrodiffusion, s'écrit : $B(\xi) = \frac{S(0)}{\omega P(g, 0)} \frac{1}{[1 + (1/h) \tan(\xi/2)]}$ et que $H(x, \omega)$, la fonction de réflexions multiples, et $P(g, \xi)$, la fonction de phase, sont définis au chapitre 3.

9. Le modèle de Shibayama-Weigand [Shibamaya and Wiegand, 1985]

Dans la lignée des modèles empiriques très simples, on trouve ce modèle, dont l'équation est :

$$\rho = \rho_0 + \rho_0 \sin \theta_r \left[\beta_0 + \beta_1 \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) + \frac{\beta_2}{\cos \theta_i} \right] \quad (4.10)$$

Il comporte également **4 paramètres** ρ_0 , β_0 , β_1 et β_2 .

10. Le modèle de Walthall [Walthall et al., 1985]

Le modèle de Walthall, complètement empirique et pourvu de **4 paramètres** p_0 , p_1 , p_2 , p_3 , est de la forme :

$$\rho = p_0 + p_1(\theta_i^2 + \theta_r^2) + p_2\theta_i^2\theta_r^2 + p_3\theta_i\theta_r \cos \phi \quad (4.11)$$

Ce modèle, qui n'inclue pas l'effet hotspot, a été modifié plus tard par Liang (cf. modèle 15), afin de tenir compte de la rétrodiffusion.

11. Le modèle de Staylor-Suttles [Staylor and Suttles, 1986]

Il existe un grand nombre de modèles empiriques dont celui de Staylor-Suttles qui, selon ses auteurs, est pratique et converge rapidement. Il renferme **4 paramètres** nommés Y_0 , Y_1 , C_{SW} et N .

$$\rho = \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \left[Y_0 + Y_1 \left(\frac{\cos \theta_i \cos \theta_r}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \right)^N \right] \frac{1 + C_{SW} \cos^2 \xi}{1 + C_{SW} [\cos^2 \theta_i \cos^2 \theta_r + (\sin^2 \theta_i \sin^2 \theta_r)/2]} \quad (4.12)$$

Il faut préciser que Y_0 et Y_1 sont des paramètres linéaires, tandis que C_{SW} et N nécessitent un processus d'inversion non-linéaire.

12. Le modèle de He-Torrance-Sillion-Greenberg [He et al., 1991]

Ce modèle de BRDF est la somme de 3 composantes distinctes, une composante diffuse unidirectionnelle ρ_{spc} , une composante diffuse directionnelle ρ_{dd} , et une composante diffuse uniforme ρ_{du} .

$$\rho = \rho_{spc} + \rho_{du} + \rho_{dd} \quad (4.13)$$

Cette expression de la BRDF est très complète car elle tient compte à la fois de la polarisation de la lumière, de la conservation de l'énergie, de la rugosité de la surface ainsi que d'un effet d'ombrage (dû à la surface). L'expression des trois termes a pour forme :

$$\begin{aligned}\rho_{spc} &= \frac{|F(c, \beta)|^2 e^{-g} S}{\cos \theta_i d\omega_i} \\ \rho_{du} &= \frac{1}{\pi} \\ \rho_{dd} &= \frac{\pi \tau^2}{4\lambda^2} \frac{|F(c, \beta)|^2 S \mathcal{GAF}}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m e^{-g}}{m!m} e^{-\left(\frac{h}{4m}\right)}\end{aligned}$$

Quelques précisions sont nécessaires pour comprendre chacun des termes. Dans le terme ρ_{spc} , on a $F(c, \beta)$ le facteur de Fresnel, S une fonction d'ombrage, et $g = \left[\frac{2\pi\sigma}{\lambda}(\cos \theta_i + \cos \theta_r)\right]^2$ une fonction de rugosité du matériau à l'intérieur de laquelle σ est la rugosité effective du matériau. Tandis que le terme diffus unidirectionnel est simplement une contribution lambertienne, le terme ρ_{dd} est plus compliqué. \mathcal{GAF} est le coefficient d'atténuation géométrique (cf. chapitre 3), et $h = \left(\frac{2\pi\tau}{\lambda}\right)^2 [(\sin \theta_i \cos \phi_r - \sin \theta_i)^2 + (\sin \theta_r \sin \phi_r)^2]$ une autre fonction du modèle contenant le paramètre de surface τ .

Pour conclure, on remarque que ce modèle est très complet, ce qui nécessite la mise en place de **4 paramètres** : σ est la rugosité effective du matériau, n (présent dans le facteur de Fresnel) l'indice du second milieu, τ un paramètre de surface, et S le coefficient d'ombrage.

13. Le modèle de Rahman-Pinty-Verstraete [Rahman et al., 1993a]

Ce modèle semi-empirique développé pour l'étude de n'importe quelle surface, présente l'avantage d'une part de tenir compte de l'effet hot spot, et d'autre part de ne comporter que **3 paramètres**. La BRDF a une expression relativement simple qui est :

$$\rho = \rho_0 P(g, \xi) \left(2 + \frac{1 - \rho_0}{1 + D}\right) [\cos \theta_i \cos \theta_r (\cos \theta_i + \cos \theta_r)]^{k-1} \quad (4.14)$$

Cette relation comprend **3 paramètres** : ρ_0 l'intensité de la réflectance du couvert étudié, g le facteur d'asymétrie la fonction d'Henyeey-Greenstein, et k un paramètre rendant compte de l'anisotropie de la surface.

14. Le modèle de Martonchik-Rahman-Pinty-Verstraete [Rahman et al., 1993b]

Ce modèle consiste en une modification du modèle précédent, suggérée par J.V. Martonchik. Ce changement est, d'une part, l'approximation de l'expression d'Henyeey-Greenstein qui devient $P(g, \xi) = e^{-b_M \cos \xi}$, et d'autre part l'introduction de $\bar{\rho}$ pour que l'expression ait la forme suivante :

$$\rho = \bar{\rho} e^{-b_M \cos \xi} \left(1 + \frac{1 - \bar{\rho}}{1 + D} \right) [\cos \theta_i \cos \theta_r (\cos \theta_i + \cos \theta_r)]^{k-1} \quad (4.15)$$

Il y a toujours **3 paramètres** à déterminer.

15. Le modèle de Walthall modifié par Liang [Liang and Strahler, 1994]

$$\rho = \rho_{Walthall} + p_4 e^{p_5 (\theta_i \theta_r)^2} \quad (4.16)$$

Voici donc la forme du modèle, toujours empirique, de Liang, qui tient compte de l'effet hot spot. Cette modification du modèle de Walthall entraîne l'apparition de 2 nouveaux paramètres p_4 et p_5 , faisant passer le total à **6 paramètres**.

16. Le modèle de Pickup-Chewings [Pickup et al., 1995]

Ce modèle, également empirique, était destiné, à l'origine, à la correction d'images vidéo. D'ailleurs, le terme en \cos^4 a été introduit afin de tenir compte des effets de lentille. La BRDF s'écrit :

$$\rho = p_0 + p_1 \xi + p_2 \xi^2 + p_3 \cos^4 \theta_r \quad (4.17)$$

Le modèle contient **4 paramètres** : p_0 , p_1 , p_2 , et p_3 .

17. Le modèle de Meister [Meister et al., 1996]

La BRDF s'écrit :

$$\rho = p_0 + p_1 (\theta_i^2 + \theta_r^2) + p_2 \theta_i^2 \theta_r^2 + p_3 \theta_i \theta_r \cos \phi + p_4 e^{p_5 (\theta_i \theta_r)^2} e^{-p_6 r^2} \quad (4.18)$$

Ce modèle, dont les bases sont les modèles de Walthall puis de Liang, contient **7 paramètres** afin de pouvoir simuler un pic gaussien lors de la réflexion spéculaire. Il a les mêmes caractéristiques que le modèle de Liang, donc tient compte de l'effet hot spot. Les paramètres sont donc ceux du modèle de Liang auxquels il faut rajouter p_6 un coefficient quelconque.

18. Le modèle de Koenderink et al. [Koenderink et al., 1996]

Ce modèle purement mathématique, imaginé par Koenderink et al., est en fait un développement en série sur une base orthonormée. On arrive à l'expression de la BRDF suivante :

$$\rho = \sum_{nml} a_{nl n' l'} \left[K_n^l(\theta_i, \phi_i) K_{n'}^{l'}(\theta_r, \phi_r) + K_{n'}^{l'}(\theta_i, \phi_i) K_n^l(\theta_r, \phi_r) \right] \quad (4.19)$$

avec $K_n^l(\theta, \phi) = \Theta_n^l(\theta) G^l(\phi)$ où $\Theta_n^l(\theta)$ est une fonction polaire et $G^l(\phi)$ une fonction azimutale. On précise également que :

$$\begin{cases} \Theta_n^l(\theta) = \sqrt{\frac{n+1}{2\pi}} R_n^l(\sqrt{2} \sin \frac{\theta}{2}) \\ G^l(\phi) = e^{il\phi} \end{cases} \quad (4.20)$$

avec :

$$R_n^{\pm l}(\tau) = \sum_{s=0}^{(n-l)/2} (-1)^s \frac{(n-s)! \tau^{n-2s}}{s! [(n+l)/2 - s]! [(n-l)/2 - s]!}$$

Ce modèle contient donc **5 paramètres** si on arrête le développement limité à l'ordre 2, et **55** si on l'arrête à l'ordre 8.

19. Le modèle de Dymond-Qi [Dymond and Qi, 1997]

Ce modèle est semi-empirique, car basé sur la physique des transferts radiatifs. Il a deux avantages non négligeables : il prend en compte l'effet hotspot, et il n'a que **3 paramètres** : ρ_0 , h et $R = \frac{\sigma_i}{\sigma_r}$.

$$\rho = \frac{4\rho_0}{3\pi^2} \left[\sin \xi + \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos \xi \right] \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + R \cos \theta_r} K(\xi, \theta_i) \quad (4.21)$$

On rajoute que

$$K(\xi, \theta_i) = \begin{cases} 2e^{-\tan(\xi/2)/h\theta_i} & \text{si } \xi < \pi/2, \\ 2e^{-\tan(\pi/4)/h\theta_i} & \text{si } \xi \geq \pi/2. \end{cases}$$

20. Le modèle de Lafortune [Lafortune et al., 1997]

Ce modèle empirique est une généralisation du modèle du lobe de cosinus, lui même basé sur le modèle de Phong. Cette amélioration est due au fait que, dans le modèle du lobe de cosinus, l'intensité du pic spéculaire va en diminuant pour des incidences rasantes, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Le modèle, qui satisfait au principe de réciprocité et conserve l'énergie, est construit comme une somme de fonctions simples, et il apparaît sous la forme :

$$\rho = \sum_i [C_{x,i} u_x v_x + C_{y,i} u_y v_y + C_{z,i} u_z v_z]^{n_i} \quad (4.22)$$

Dans cette équation, u et v sont les vecteurs représentant, respectivement, les directions d'illumination et d'observation. n l'exposant de Phong ainsi que $C_{x,i}(=C_{y,i}$ pour une diffusion isotrope) et $C_{z,i}$ sont **3 paramètres**, propres à chaque fonction, à déterminer.

4.2 Les modèles génériques pour les surfaces anisotropes

De la même manière que des modèles génériques ont été créés pour modéliser la réflexion de la lumière sur des surfaces isotropes, des modèles spécifiques ont été développés pour les surfaces anisotropes. La caractéristique d'une surface anisotrope est qu'elle réémet la lumière dans une direction privilégiée comme, par exemple, le velours ou la tôle ondulée.

21. Le modèle de Poulin-Fournier [Poulin and Fournier, 1990]

Dans ce modèle physique (car normalisé), l'anisotropie est simulée par de petits cylindres phongiens (additionnés ou soustraits) répartis sur une surface. L'ampleur de l'anisotropie est réglée par la distance d qui sépare le centre de 2 cylindres adjacents et par h la hauteur de laquelle est élevée le sol. Pour le modèle de Phong, la partie diffuse de la BRDF est définie par $(N.L)$ et la partie spéculaire par $(N.H)^n$, dont les expressions obtenues sont écrites ci-dessous.

(a) Expression de la partie diffuse

Le but consiste à rendre compte de l'anisotropie dans $(N.L)$ qui détermine la partie réfléchie de manière diffuse par la surface. Pour toute la partie éclairée et visible du cylindre, on a :

$$\begin{aligned} \int_{\phi_i}^{\phi_s} (N.L) \cos(\phi_E - \phi) d\phi &= \frac{L_n}{2} \cos \phi_E (\sin^2 \phi_s - \sin^2 \phi_i) \\ &+ \frac{L_n}{2} \sin \phi_E (\phi_s - \phi_i - \sin \phi_s \cos \phi_s + \sin \phi_i \cos \phi_i) \\ &+ \frac{L_b}{2} \sin \phi_E (\sin^2 \phi_s - \sin^2 \phi_i) \\ &+ \frac{L_b}{2} \cos \phi_E (\phi_s - \phi_i + \sin \phi_s \cos \phi_s + \sin \phi_i \cos \phi_i) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Il est nécessaire de normaliser cette solution, du fait de l'apparition du terme correctif $\cos(\phi_E - \phi)$, présent à cause de la direction d'observation. Cette normalisation vaut :

$$\int_{\phi_i}^{\phi_s} \cos(\phi_E - \phi) d\phi = \cos \phi_E (\sin \phi_s - \sin \phi_i) + \sin \phi_E (\cos \phi_i - \cos \phi_s)$$

(b) Expression de la partie spéculaire

$$\begin{aligned}
\int_{\phi_i}^{\phi_s} (N.L)^n \cos(\phi_E - \phi) d\phi &= (H \cos \phi_p)^n \int_{\alpha_0 - \phi_i}^{\alpha_0 - \phi_s} \cos^n \alpha \cos(\phi_E + \alpha - \alpha_0) d\alpha \\
&= (H \cos \phi_p)^n [\cos \phi_E (\cos \alpha_0 \int \cos^{n+1} \alpha d\alpha + \sin \alpha_0 \int \cos^n \alpha \sin \alpha d\alpha) \\
&\quad - \sin \phi_E (\cos \alpha_0 \int \cos^n \alpha \sin \alpha d\alpha - \sin \alpha_0 \int \cos^{n+1} \alpha d\alpha)]
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Dans cette solution, $\int \cos^{n+1} \alpha d\alpha$ est approximée via les polynômes de Chebyshev, et $\int \cos^n \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{-\cos^{n+1} \alpha}{n+1}$.

L'avantage de ce modèle est, comme celui de Phong, de n'avoir que **3 paramètres** : k_d la partie diffuse de la surface, k_s la partie spéculaire et n l'exposant spéculaire de Phong.

22. Le modèle de Ward [Ward, 1992]

Le modèle développé par Ward est réservé aux surfaces anisotropes (en ce qui concerne la réflexion spéculaire). Il a **4 paramètres** : k_d et k_s les parties diffuses et spéculaires de la surface, mais surtout m et n qui règlent l'anisotropie de la surface. Plus ces paramètres sont différents, plus la surface est anisotrope. La BRDF a pour expression :

$$\rho = \frac{k_d}{\pi} + k_s \frac{1}{4\pi mn \sqrt{\cos \theta_i + \cos \theta_r}} e^{\left[\frac{\cos^2 \alpha - 1}{\cos^2 \alpha} \left(\frac{\cos^2 \phi}{m^2} + \frac{\sin^2 \phi}{n^2} \right) \right]} \tag{4.25}$$

Pour justement créer cette anisotropie, Ward a remplacé la symétrie de rotation de la BRDF d'une surface isotrope, par une asymétrie de type elliptique d'excentricité variable.

23. Le modèle de Schlick pour les matériaux simples [Schlick, 1994]

Le modèle de Schlick différencie 2 types de matériaux : les matériaux simples et les matériaux doubles. L'auteur nomme matériaux simples les matériaux ayant des propriétés optiques homogènes : c'est le cas des métaux, du verre, du tissu, du papier de verre (Nous verrons dans la partie destinée aux modèles de BRDF pour les surfaces multicouches, le modèle pour les matériaux doubles). Ce modèle, considéré comme semi-empirique par l'auteur, respecte des règles physiques (réciprocité, conservation de l'énergie, théorie des microfacettes) et prend en compte de nombreux phénomènes comme les réflexions multiples, l'anisotropie... Spécialement conçu pour le rendu d'images sur ordinateur, l'expression de la BRDF est :

$$\rho = S(\beta) D(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi) \tag{4.26}$$

$$\begin{cases} S(\beta) = C(\lambda) + [1 - C(\lambda)](1 - \cos \beta)^5 \\ D(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi) = \frac{a}{\pi} + \frac{b}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r} B(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi) + \frac{c}{dL \cos \theta_i} \Delta \end{cases} \quad (4.27)$$

$S(\beta)$ est un terme spectral dans lequel $C(\lambda)$ est un facteur de réflexion à la longueur d'onde λ et β un angle défini dans la figure (1.1). $D(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi)$ est un facteur directionnel composé de 3 termes réflecteurs, dans le but de créer un continuum entre la situation d'une réflexion parfaitement diffuse et d'une réflexion parfaitement spéculaire. On précise que :

$$B(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi) = \frac{G(\theta_i)G(\theta_r)}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r} Z(\alpha) A(\phi) + \frac{1 - G(\theta_i)G(\theta_r)}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r}$$

ou $B(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi)$ est une approximation du facteur de Fresnel

$$G(\theta) = \frac{\cos \theta}{r - r \cos \theta + \cos \theta}$$

$$Z(\alpha) = \frac{r}{1 + r \cos^2 \alpha - \cos^2 \alpha}$$

$$A(\phi) = \sqrt{\frac{p}{p^2 - p^2 \cos^2 \phi + \cos^2 \phi}}$$

Par ailleurs, on note que $a + b + c = 1$ et que Δ est une fonction de Dirac valant 1 dans le cône de l'angle solide d'illumination, et 0 ailleurs.

L'auteur rend le modèle extrêmement simple en proposant de donner des valeurs fonctions de r la rugosité de la surface, aux 3 poids a , b , c du terme directionnel. Si $r \leq 0.5$, alors

$$\begin{cases} a = 4r(1 - r) \\ b = 0 \\ c = 1 - a \end{cases} \quad (4.28)$$

sinon

$$\begin{cases} a = 4r(1 - r) \\ b = 1 - a \\ c = 0 \end{cases} \quad (4.29)$$

Au final, on se retrouve avec un modèle très complet ne contenant que **3 paramètres** : p le facteur d'anisotropie, r la rugosité de la surface, et $C(\lambda)$ facteur de réflexion à la longueur d'onde λ . On rajoutera que r et p varient de 0 à 1, $r = 0$ représentant une surface réfléchissant de manière parfaitement spéculaire et $p = 0$ traduisant une surface parfaitement anisotrope.

4.3 Les modèles dédiés à l'étude de la végétation

4.3.1 Les modèles utilisant la superposition de noyaux

[Jupp, 1998]

Pour les modèles concernés par l'étude de la végétation, on peut mettre l'expression de la BRDF sous une somme de noyaux, chacun émanant soit de la physique des transferts radiatifs, soit de l'optique géométrique. De plus, ils sont multipliés par un coefficient dont le poids dépend de la surface à modéliser. Le modèle de BRDF prend la forme suivante :

$$\rho = f_{iso} + f_{geo}k_{geo} + f_{vol}k_{vol} \quad (4.30)$$

Les termes k_{geo} et k_{vol} sont les noyaux en question, tandis que f_{geo} et f_{vol} sont leurs facteurs respectifs (f_{iso} est une contribution isotrope). Cette formulation de la BRDF permet ainsi de représenter un grand nombre de surfaces par la combinaison de différents noyaux, dont les expressions sont présentées ci-dessous.

$$\begin{aligned} \text{Ross-thin} \quad k_{vol} &= \frac{(\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_i \cos \theta_r} - \frac{\pi}{2} \\ \text{Ross-thick} \quad k_{vol} &= \frac{(\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} - \frac{\pi}{4} \\ \text{Roujean} \quad k_{vol} &= \frac{1}{2\pi}[(\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi] \tan \theta_i \tan \theta_r - \frac{1}{\pi}(\tan \theta_i + \tan \theta_r + D) \\ \text{Li-sparse} \quad k_{geo} &= O - (\cos \theta'_i)^{-1} - (\cos \theta'_r)^{-1} + \frac{1}{2}(1 + \cos \xi')(\cos \theta'_r)^{-1} \\ \text{Li-dense} \quad k_{geo} &= \frac{(1 + \cos \xi')(\cos \theta'_r)^{-1}}{(\cos \theta'_i)^{-1} + (\cos \theta'_r)^{-1} - O} - 2 \\ \text{Roujean} \quad k_{geo} &= \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \cos \xi + \sin \xi \right] - \frac{1}{3} \\ \text{Cox/Munk} \quad k_{geo} &= \begin{cases} \frac{1}{\cos \theta_i} \left[1 - \frac{\tan^2 \theta_n}{\sigma^2} \right] - 1 & \text{si } \frac{\tan^2 \theta_n}{\sigma^2} \leq 1 \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

On indique que :

$$\begin{aligned} O(b/r, h/b, \theta_i, \theta_r, \phi) &= \frac{1}{\pi} [t - \sin t \cos t] [(\cos \theta'_r)^{-1} + (\cos \theta'_i)^{-1}], \quad \cos^2 \theta_n = \frac{1}{2} \left[\frac{(\cos \theta_i + \cos \theta_r)^2}{1 + \cos \phi} \right], \\ \cos t &= \min \left[1, \frac{h}{b} \frac{\sqrt{D'^2 + (\tan \theta'_i \tan \theta'_r \sin \phi)^2}}{(\cos \theta'_r)^{-1} + (\cos \theta'_i)^{-1}} \right], \quad \theta'_r = \tan^{-1} \left(\frac{h}{r} \tan \theta_r \right), \quad \theta'_i = \tan^{-1} \left(\frac{h}{r} \tan \theta_i \right) \end{aligned}$$

Remarques :

Le noyau de Ross-thin est applicable à l'étude d'une surface constituée d'un sol surmonté par une canopée de feuilles fines, mais également d'une canopée extrêmement dense. Dans ce cas précis, la couche de feuilles située en dessous du sommet de la canopée peut jouer le rôle d'un arrière-plan uniforme.

Le noyau de Roujean considère la surface comme étant une répartition aléatoire de parallélépipèdes dont les surfaces sont lambertiennes. Dans ce cas, les ombres sont considérées comme totalement noires.

Les noyaux de Li modélisent la surface par une couche recouverte de sphères. La BRDF tient compte de l'ombrage et du masquage par les sphères, et suppose que les ombres sont totalement

noires et que chaque sphère est éclairée de la même manière.

Le noyau de Li-dense prend en compte, de surcroît, l'ombrage mutuel entre les sphères. Dans le but de maximiser l'effet de l'optique géométrique au sein d'une canopée dense, le noyau considère une distribution aléatoire des dimensions des sphères.

Le noyau de Cox-Munk est spécialement conçu pour l'étude des réflexions de la lumière sur l'eau. En effet, on a, comme paramètre, $\sigma^2 = 0.003 + 0.00512w$ la variance de la pente des vagues avec w la vitesse du vent.

Comme nous venons de voir les différents noyaux existants, présentons certaines des combinaisons possibles et les coefficients qui s'y rattachent. Pour plus de clarté, on précisera, à côté du modèle, le nombre de paramètres qu'il contient, et leurs expressions.

A. Ross-thin+Roujean (**5 paramètres** $\rho_s, \alpha, s, LAI, \frac{h}{b}$)

$$\begin{cases} f_{iso} = \alpha\rho_s + (1 - \alpha) \left[\frac{sLAI}{3} + \rho_s \right] \\ f_{geo} = \alpha\rho_s \frac{h}{b} \\ f_{vol} = (1 - \alpha) \frac{2sLAI}{3\pi} \end{cases} \quad (4.31)$$

B. Ross-thick+Roujean (**6 paramètres** $\rho_s, \alpha, s, LAI, \frac{h}{b}, B$)

$$\begin{cases} f_{iso} = \alpha\rho_s + (1 - \alpha) \left[\frac{s}{3} + (\rho_s - \frac{s}{3})e^{-LAI \cdot B} \right] \\ f_{geo} = \alpha\rho_s \frac{h}{b} \\ f_{vol} = (1 - \alpha) \frac{4s}{3\pi} (1 - e^{-LAI \cdot B}) \end{cases} \quad (4.32)$$

C. Ross-thin+Li-sparse (**8 paramètres** $\rho_s, \alpha, s, LAI, \lambda, C, n, r$)

$$\begin{cases} f_{iso} = \alpha\rho_s + (1 - \alpha) \left[\frac{sLAI}{3} + \rho_s \right] \\ f_{geo} = \alpha\lambda nr^2 C \\ f_{vol} = (1 - \alpha) \frac{2sLAI}{3\pi} \end{cases} \quad (4.33)$$

D. Ross-thick+Li-sparse (**9 paramètres** $\rho_s, \alpha, s, LAI, \lambda, C, n, r, B$)

$$\begin{cases} f_{iso} = \alpha\rho_s + (1 - \alpha) \left[\frac{s}{3} + (\rho_s - \frac{s}{3})e^{-LAI \cdot B} \right] \\ f_{geo} = \alpha\lambda nr^2 C \\ f_{vol} = (1 - \alpha) \frac{4s}{3\pi} (1 - e^{-LAI \cdot B}) \end{cases} \quad (4.34)$$

E. Ross-thin+Li-dense (**5 paramètres** $\rho_s, \alpha, s, LAI, C$)

$$\begin{cases} f_{iso} = \alpha C + (1 - \alpha) \left[\frac{sLAI}{3} + \rho_s \right] \\ f_{geo} = \alpha \frac{C}{2} \\ f_{vol} = (1 - \alpha) \frac{2sLAI}{3\pi} \end{cases} \quad (4.35)$$

F. Ross-thick+Li-dense (**5 paramètres** $\rho_s, \alpha, s, LAI, B, C$)

$$\begin{cases} f_{iso} = \alpha C + (1 - \alpha) \left[\frac{s}{3} + (\rho_s - \frac{s}{3}) e^{-LAI \cdot B} \right] \\ f_{geo} = \alpha \frac{C}{2} \\ f_{vol} = (1 - \alpha) \frac{4s}{3\pi} (1 - e^{-LAI \cdot B}) \end{cases} \quad (4.36)$$

On précise que s est la réflectance d'une feuille, LAI l'indice foliaire, ρ_s la réflectance du sol, B la moyenne des sécantes des angles d'illumination et d'observation possibles, h et b respectivement la hauteur et la profondeur des briques servant à la modélisation de la surface dans le modèle de Roujean, C la brillance de la surface ensoleillée et λ le nombre de sphères par unités de surface (cf. modèle 29). Enfin, α représente le poids donné à la composante diffuse du modèle utilisé, selon le type de couvert que l'on veut modéliser.

4.3.2 Les modèles non décomposables

24. Le modèle de Ross [Ross, 1981]

Le modèle suivant est un des premiers exemples de BRDF adaptée au milieu végétal. Basé sur des considérations géométriques qui modélisent le couvert comme un empilement de couches, il a pour forme :

$$\rho = \frac{P(g, \xi)}{\kappa_i \cos \theta_r + \kappa_r \cos \theta_i} \left[1 - e^{-LAI \left(\frac{\kappa_r}{\cos \theta_r} + \frac{\kappa_i}{\cos \theta_i} \right)} \right] + \rho_{sol} e^{-L \left(\frac{\kappa_r}{\cos \theta_r} + \frac{\kappa_i}{\cos \theta_i} \right)} \quad (4.37)$$

On constate que le modèle contient **4 paramètres** : χ_1 représente l'orientation des feuilles (présent dans le paramètre de Goudriaan), g le facteur d'asymétrie de la fonction d'Henry-Greenstein, LAI l'indice foliaire, et ρ_{sol} la réflectance du sol.

25. Le modèle simplifié de Ross [Wanner et al., 1995][Roujean et al., 1992]

Une simplification du modèle précédent de Ross a été développée par Roujean et Wanner pour arriver à la forme suivante :

$$\rho = \frac{4\rho_L (\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{3\pi \cos \theta_i + \cos \theta_r} \left[1 - e^{-\frac{LAI}{2} [(\cos \theta_i)^{-1} + (\cos \theta_r)^{-1}]} \right] + \rho_{sol} e^{-\frac{LAI}{2} [(\cos \theta_i)^{-1} + (\cos \theta_r)^{-1}]} \quad (4.38)$$

Dans ce modèle physique, **3 paramètres** sont à déterminer : LAI l'indice foliaire, ρ_{sol} la réflectance du sol, et ρ_L la réflectance d'une seule feuille.

26. Le modèle de Verstraete-Pinty-Dickinson [Verstraete et al., 1990]

La BRDF donnée par ce modèle est basée sur une approche physique du transfert radiatif dans un milieu poreux. Son expression est de la forme :

$$\rho = \frac{\omega}{4} \frac{\kappa_i}{\kappa_i \cos \theta_r + \kappa_r \cos \theta_i} \left[P_v(D) P(g, \xi) + H \left(\frac{\cos \theta_i}{\kappa_i}, \omega \right) H \left(\frac{\cos \theta_r}{\kappa_r}, \omega \right) - 1 \right] \quad (4.39)$$

avec

$$P_v(D) = \frac{1}{1 + V_p(D)}$$

$$V_p(D) = 4 \left(1 - \frac{4}{3\pi} \right) \frac{D}{2r\Lambda} \frac{\cos \theta_r}{\kappa_r}$$

A l'intérieur de l'expression de la BRDF, **4 paramètres** sont à déterminer : ω albedo de simple diffusion, χ_1 présent dans la paramétrisation de Goudriaan, g le facteur d'asymétrie de la fonction d'Henyeey-Greenstein, et $2r\Lambda$ un paramètre lié à la surface d'interception du milieu. Il est à noter que ce modèle tient compte de l'effet hot spot.

27. Le modèle de Deering [Deering et al., 1990]

Modèle physique dérivé de considérations géométriques, le modèle de Deering a été créé afin de calculer la BRDF d'un environnement composé d'une base lambertienne, recouverte par des protusions en forme de cylindres verticaux.

$$\rho = R_g e^{-S(\tan \theta_r + \tan \theta_i)} + R_p [1 - e^{-S(\tan \theta_r + \tan \theta_i)}] \quad (4.40)$$

avec

$$R_g = (1 - f) \frac{r(\sin \phi - \phi \cos \phi) + t[(\phi - \pi) \cos(\phi - \pi) - \sin(\phi - \pi)]}{4(\cot \theta_i + \cot \theta_r)} + f.r_0$$

$$R_p = \frac{r_p(\sin \phi - \phi \cos \phi)}{4(\cot \theta_i + \cot \theta_r)} + f.r_0$$

La BRDF contient **6 paramètres** qui sont : r et t , la réflectance et la transmittance d'une facette, f la contribution lambertienne à la lumière diffusée, r_0 la réflectance applicable à cette contribution, S la surface projetée des obstacles et r_p la réflectance d'une protusion.

28. Les modèle de Snyder-Wan [Snyder and Wan, 1998]

Il s'agit de l'élaboration de deux modèles, dans le but d'étendre la modélisation de la réflexion de la lumière à l'IR thermique ($3\mu m - 14\mu m$). Chacun de ces modèles, destiné à un type

de surface particulier, est présenté sous forme d'une somme de noyaux un peu particulière, chaque terme provenant de la même approche physique (alors que précédemment un terme était destiné à une approche radiative, et un autre à une approche géométrique). La BRDF a pour formulation :

$$\rho = c_1 k_1 + c_2 k_2 + c_3 \quad (4.41)$$

(a) Le modèle géométrique

Le modèle de couvert végétal utilisé ici est un sol lambertien de réflectance ρ_g sur lequel sont distribuées des sphères lambertiennes de réflectance ρ_c , de densité n et de rayon r . 3 termes et **4 paramètres** composent donc ce modèle. Le terme k_{geo}^g est tiré du noyau de Li-Sparse [Li and Strahler, 1992] tandis que l'autre provient d'un travail de Wanner [Wanner et al., 1995]. La fonction de BRDF est donnée par :

$$\begin{cases} k_1 = \frac{1}{\pi}[t - \sin t \cos t][(\cos \theta_r)^{-1} + (\cos \theta_i)^{-1}] - (\cos \theta_r)^{-1} - (\cos \theta_i)^{-1} + 1 \\ k_2 = (\cos \theta_r)^{-1}(\cos \theta_i)^{-1} \cos^2(\xi/2) - 1 \\ c_1 = nr^2 \rho_g \\ c_2 = \frac{2}{3}nr^2 \rho_c \\ c_3 = \left[\frac{1}{\pi} - nr^2\right] \rho_g + \frac{2}{3}nr^2 \rho_c \end{cases} \quad (4.42)$$

(b) Le modèle volumique

Le modèle de couvert relatif à cette BRDF est une distribution isotrope de facettes de pentes différentes, chacune ayant une réflectance ρ et une transmittance τ , au dessus d'un sol de réflectance ρ_0 . On a aussi F , une constante de structure reliée à l'indice foliaire, qui contient des informations relatives à la densité de facettes et à la hauteur de la canopée. Ces **3 paramètres** interviennent dans l'expression de la BRDF :

$$\begin{cases} k_1 = \frac{(\pi - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} - \frac{\pi}{2} \\ k_2 = \frac{-\pi \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \\ c_1 = \frac{2\rho}{3\pi^2} \left[1 - e^{-\frac{1}{2}(\cos \theta_i + \cos \theta_r)F} \right] \\ c_2 = \frac{2\tau}{3\pi^2} \left[1 - e^{-\frac{1}{2}(\cos \theta_i + \cos \theta_r)F} \right] \\ c_3 = \frac{\rho}{3\pi} \left[1 - e^{-\frac{1}{2}(\cos \theta_i + \cos \theta_r)F} \right] + \frac{\rho_0}{\pi} e^{-\frac{1}{2}(\cos \theta_i + \cos \theta_r)F} \end{cases} \quad (4.43)$$

29. Le modèle de Strahler-Jupp [Strahler and Jupp, 1991]

Le modèle suivant est une combinaison de 4 types de couverts possibles, pour une direction donnée : la canopée éclairée (symbole C), la canopée ombragée (symbole T), l'arrière plan éclairé (symbole G), et l'arrière plan ombragé (symbole Z). Chaque couvert a sa propre réflectance R_x , et chaque réflectance est pondérée par un coefficient k_x adapté. Ce qui donne la fonction suivante :

$$\rho = k_C R_C + k_T R_T + k_G R_G + k_Z R_Z \quad (4.44)$$

Le modèle est semi-empirique et, on précise que pour $x=C,T,G,Z$, on a $k_x > 0$ et $\sum k_x = 1$. Outre ces données, des simplifications sont faites pour calculer les différents termes.

$$\begin{cases} k_G = e^{-\lambda \bar{A}[(\cos \theta_i')^{-1} + (\cos \theta_r')^{-1} - O]} \\ k_C + k_T = 1 - e^{-\lambda \bar{A}(\cos \theta_r')^{-1}} \\ \frac{k_C}{k_C + k_T} = \frac{1}{2}(1 + \cos \xi') \end{cases} \quad (4.45)$$

Pour écrire la dernière équation, l'auteur se permet de faire une approximation : la proportion d'arbres de la canopée, éclairés et visibles par l'observateur, est la même que si il n'y avait qu'un seul arbre. Malgré cette hypothèse, il reste **7 paramètres** à déterminer : R_C , R_T , R_G , et R_Z les réflectances de chacun des types de couvert, $\frac{b}{r}$ et $\frac{b}{b}$ (contenus dans O), ainsi que $\lambda \bar{A}$ un paramètre spécifique aux forêts. Pour les autres simplifications possibles, on se reportera au document [Strahler and Jupp, 1991].

30. Le modèle de Li [Li and Strahler, 1992]

Ce modèle est une amélioration du modèle précédent dans le sens où il tient compte du fait que lorsque la densité d'arbre augmente, la partie ombragée devient invisible. L'étude se porte alors sur la partie ensoleillée, i.e le dessus de la canopée. On a ainsi la modification suivante :

$$\frac{k_C}{k_C + k_T} = \frac{\frac{1}{2}(1 + \cos \xi')(\cos \theta_r')^{-1}}{(\cos \theta_i')^{-1} + (\cos \theta_r')^{-1} - O} \frac{1 - e^{-\lambda \bar{A}[(\cos \theta_i')^{-1} + (\cos \theta_r')^{-1} - O]}}{1 - e^{-\lambda \bar{A}(\cos \theta_r')^{-1}}}$$

Cette modification n'entraîne pourtant pas une modification de nombre de paramètre qui reste à **7**.

4.4 Les modèles dédiés à l'étude des surfaces multicouches

31. Le modèle de Beard-Maxwell [Beard and Maxwell, 1973]

$$\rho = \frac{F(c, \beta) \rho_f \cos^2 \theta_N}{F(c, 0) \cos \theta_r \cos \theta_i} \left[\frac{1 + \theta_N}{1 + \frac{\theta_N}{\Omega} e^{-2\beta/\tau}} \right] + \rho_d + \frac{2\rho_v}{\cos \theta_r + \cos \theta_i} \quad (4.46)$$

Ce modèle, relativement ancien, est très complet. En effet, en plus de modéliser une surface multicouches, il tient compte des problèmes d'ombrage, de masquage, et de polarisation. Tout cela fait que le modèle contient **6 paramètres** qui sont : n l'indice du substrat (présent dans le facteur de Fresnel), ρ_f la réflectance de la première surface, ρ_d la réflectance diffuse, ρ_v la

réflectance volumique, Ω et τ les paramètres d'ombrage et de masquage.

32. Le modèle de Hanrahan-Krueger [Hanrahan and Krueger, 1993]

C'est le seul modèle adapté aux surfaces multicouches qui prend en compte la transmission de la lumière à travers le matériau étudié. L'étude de la réflexion sur ce type de surface est complète car elle prend en compte les réflexions multiples. La BRDF est constituée de 2 termes : le premier concerne la réflexion de l'onde sur la surface, et le second prend en compte l'onde ressortant après avoir interagité avec une particule de la couche. On néglige les termes au delà de la seconde réflexion, étant donné leur faible contribution à l'intensité totale. On a alors :

$$\rho = \frac{1}{d\omega_i} \left[\frac{R^{12}}{\cos \theta_i} + WT^{12}T^{21}P(g, \xi) \frac{[1 - e^{-\tau_d(1/\cos \theta_i + 1/\cos \theta_r)}]}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \right] \quad (4.47)$$

Dans le premier terme, qui représente la luminance due à la première réflexion, on a **1 paramètre** (R^{ij}) qui est le coefficient de réflexion (en intensité) de Fresnel du milieu i vers le milieu j . Dans le second terme, qui représente la luminance due à la seconde réflexion, on a **4 paramètres** : W l'albedo, g le facteur d'asymétrie de la fonction d' Henyey-Greenstein, T^{ij} le coefficient de transmission (en intensité) de Fresnel du milieu i vers le milieu j , $\tau_z = \int_0^z \sigma_t dz$ la profondeur optique. Mais, lorsque σ_t , la section totale de coupe, est constante, alors on a $\tau_z = \tau_d = \sigma_t d$, d étant l'épaisseur de la couche.

33. Le modèle de Schlick pour les matériaux doubles [Schlick, 1994]

A l'inverse du modèle créé pour retranscrire la réflexion de la lumière sur des matériaux dits simples, l'auteur met en place un modèle pour les matériaux doubles. Il appelle matériaux doubles, ceux étant composés de plusieurs couches, chacune faite d'un matériau simple. On peut prendre pour exemples le plastique ou la peau. La BRDF peut alors s'énoncer comme suit :

$$\rho = S(\beta)D(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi) + [1 - S(\beta)]S'(\beta)D'(\theta_i, \theta_r, \beta, \phi) \quad (4.48)$$

Tous les termes présents dans cette expressions ont été définis, au préalable, dans le modèle numéro (23).

Chapitre 5

Les modèles choisis pour l'étude en milieu urbain

L'état de l'art que nous venons ainsi d'effectuer permet d'avoir un regard d'ensemble sur tous les modèles construits. Ceci nous laisse le choix pour sélectionner les modèles qui nous semblent les plus adaptés à l'étude de la réflexion de la lumière sur une surface de l'environnement urbain.

5.1 Les critères de sélection

5.1.1 Un modèle générique

Tous les modèles que nous avons répertoriés ont été classés selon certains critères, dont nous allons nous servir. Tout d'abord, sachant que notre étude est destinée à l'environnement urbain, on ne peut pas sélectionner les modèles spécifiques à la végétation. En effet, les modèles de surfaces utilisés ne peuvent en aucun cas être adaptés à notre environnement : une distribution de sphères sur un sol lambertien, par exemple, n'est pas envisageable pour bien modéliser une surface urbaine. C'est pourquoi on ne sélectionnera pas les modèles de la partie (4.3.1), ainsi que les modèles (24), (25), (26), (27), (28), (29), et (30).

Ensuite, on ne peut pas utiliser de modèle spécifique à une surface multicouche, comme les modèles (31), (32), et (33) car, dans l'environnement urbain, cela ne représente qu'une faible proportion des couverts étudiés. Pour faire un traitement efficace d'une image contenant des bâtiments de toutes sortes, on ne peut pas se permettre d'utiliser un type de modèle pour chaque bâtiment rencontré. Cette remarque est également valable en ce qui concerne les modèles destinés aux surfaces anisotropes, i.e. les modèles (21), (22), (23).

5.1.2 Un modèle avec peu de paramètres

Un autre critère important, qui intervient dans la sélection de nos modèles, est le nombre de paramètres. Ceci est un argument essentiel car, dans la réalité, le bâtiment ne sera photographié que selon une dizaine de points de vue. Le modèle, qui doit, par un algorithme de régression, retrouver les caractéristiques du matériau, n'arrivera pas à converger s'il contient trop de paramètres. C'est

pourquoi on décide de limiter leur nombre à 4, ce qui exclut les modèles (12), (15), (17), (18), et (20) .

5.1.3 Les autres exclus

Tous les critères cités précédemment sont des conditions indispensables pour mener à bien notre étude. Cependant, quelques modèles ne seront pas, non plus, utilisés, et ce, pour d'autres raisons. On ne retiendra pas les modèles (2) et (1) du fait de leur faible capacité à rendre compte de façon réaliste la BRDF d'une surface. Pas sélectionné non plus, le modèle (16) pour sa mauvaise adaptation à notre problème.

5.2 Les modèles retenus

Suite à la selection de critères nécessaires pour notre étude, nous avons sélectionner certains modèles semblant coller au mieux à notre problématique. La partie qui suit présente donc les différents modèles retenus.

5.2.1 Les noyaux de Snyder(7) et Cook-Torrance(6)

Ces 2 noyaux, qui modélisent la partie spéculaire de la BRDF, ont des expressions très proches et ne contiennent que **3 paramètres** chacun. Il serait intéressant de les tester en leur rajoutant un membre qui modélise la partie diffuse de la réflexion, afin de caractériser leurs capacités à calculer la BRDF d'une surface.

5.2.2 Le modèle de Torrance-Sparrow(4)-Oren-Nayar(3)

En couplant les 2 noyaux ci-dessus, on peut créer un modèle ne comprenant que 3 paramètres. En effet, en supposant qu'il y ait conservation de l'énergie, alors $k_d + k_s = 1$. Par soucis de simplicité, on peut négliger le facteur de Fresnel. Partant de là, on se retrouve avec un modèle à **3 paramètres** : σ la rugosité, k_d (ou k_s) la partie diffuse (ou spéculaire) de la surface, et ρ_{albedo} l'albédo de surface. Ainsi, on a un modèle physique qui modélise de façon assez réaliste la réflexion diffuse et spéculaire de la lumière sur une surface.

5.2.3 Le modèle de Dymond-Qi(19)

Dans la lignée des modèles à **3 paramètres**, on peut également retenir le modèle de Dymond-Qi. Il est semi-empirique, mais, comme il tient compte de l'effet de hot spot, en plus de sa simplicité, il peut être un bon candidat pour la résolution de notre problème.

5.2.4 Le modèle de Staylor-Suttles(11)

Ce modèle, bien qu'il soit complètement empirique et qu'il contienne **4 paramètres** (cf. modèle n°11), semble intéressant à tester du fait, selon son auteur, de sa rapide convergence.

5.2.5 Le modèle de Phong(5)

Sa popularité et ses **2 paramètres** font de ce modèle un candidat possible pour la résolution de notre problème.

5.2.6 Les modèles de Shibayama(9) et Walthall(10)

Bien qu'ayant **4 paramètres**, étant empiriques et ne tenant pas compte de l'effet hot spot, leur forme très simple pourrait entraîner une convergence rapide pour la détermination des paramètres recherchés.

5.2.7 Le modèle de Rahman-Pinty-Verstraete(13)

Le modèle de Rahman semble intéressant à plusieurs niveaux : il ne comporte que **3 paramètres**, et tient compte de l'effet hot spot. De plus, sa simplicité nous incite à opter en sa faveur. On ne retiendra pas, par contre, le modèle (14), qui n'apporte rien de plus que le modèle de Rahman.

5.2.8 Le modèle de Hapke(8)

Ce modèle, malgré les **4 paramètres** qu'il renferme, retient également notre attention car en plus de contenir la fonction de phase d'Henry-Greenstein, il modélise de façon assez complète le phénomène de rétrodiffusion.

Troisième partie

Validation et capacités d'interpolation des modèles

Chapitre 6

Validation des modèles

6.1 Etude qualitative des modèles

Nous avons choisi dans le chapitre 4, à partir de considérations purement analytiques, les modèles de BRDF qui nous semblent intéressants pour la suite de notre étude. Afin de mieux nous rendre compte de la forme de la BRDF (contient-elle un pic spéculaire ou a-t-elle une partie lambertienne?), nous plaçons les modèles choisis dans un logiciel de visualisation en 3 dimensions de la BRDF [brd, 1997]. Cette interface graphique nous permet, pour une direction d'illumination donnée, de connaître la valeur de la BRDF dans toutes les directions où la lumière est réémise, et ce pour n'importe quel jeu de paramètres du modèle. Ce critère de sélection est très qualitatif, néanmoins il permet d'économiser du temps en se passant de l'étude de modèles qui n'auraient probablement pas pu représenter correctement la BRDF d'une surface urbaine.

6.1.1 Elimination intuitive

Grâce à cette visualisation, nous constatons d'abord que les modèles très simples de Shibayama et Walthall ne conviennent pas. Ils sont tous deux incapables de représenter un pic dans la direction spéculaire, et ce quelque soit l'angle d'incidence de la lumière (voir figures 6.1 et 6.2).

Ensuite, le terme Y_0 du modèle de Staylor-Suttles fait diverger l'expression à partir du moment où il est non nul. Il est inutilisable, les valeurs de la BRDF étant infinies pour une grande partie des directions d'observation (cf. figure 6.3).

Enfin, nous n'utiliserons pas le modèle de Snyder. Bien que son noyau ressemble beaucoup à celui de Cook-Torrance, une différence les sépare : le terme d'atténuation géométrique est présent dans le noyau spéculaire de Cook-Torrance. Ceci entraîne qu'aux angles de vue de faible incidence, le modèle de Snyder ne peut pas corriger les problèmes d'ombrage et de masquage (cf. figure 6.4). Cependant, il reste très utilisé car, les problèmes décrits précédemment n'intervenant que pour les angles de visée rasants, il s'avère efficace lors d'une utilisation avec des angles de prise de vue verticaux.

A ce niveau de la sélection, il reste 6 modèles de BRDF : les modèles de Cook-Torrance, de Torrance-Sparrow-Oren-Nayar (que nous appellerons TSON par la suite), de Phong, de Rahman-Pinty-Verstraete (Rahman dans la suite), de Dymond et de Hapke. De plus, pour des raisons de

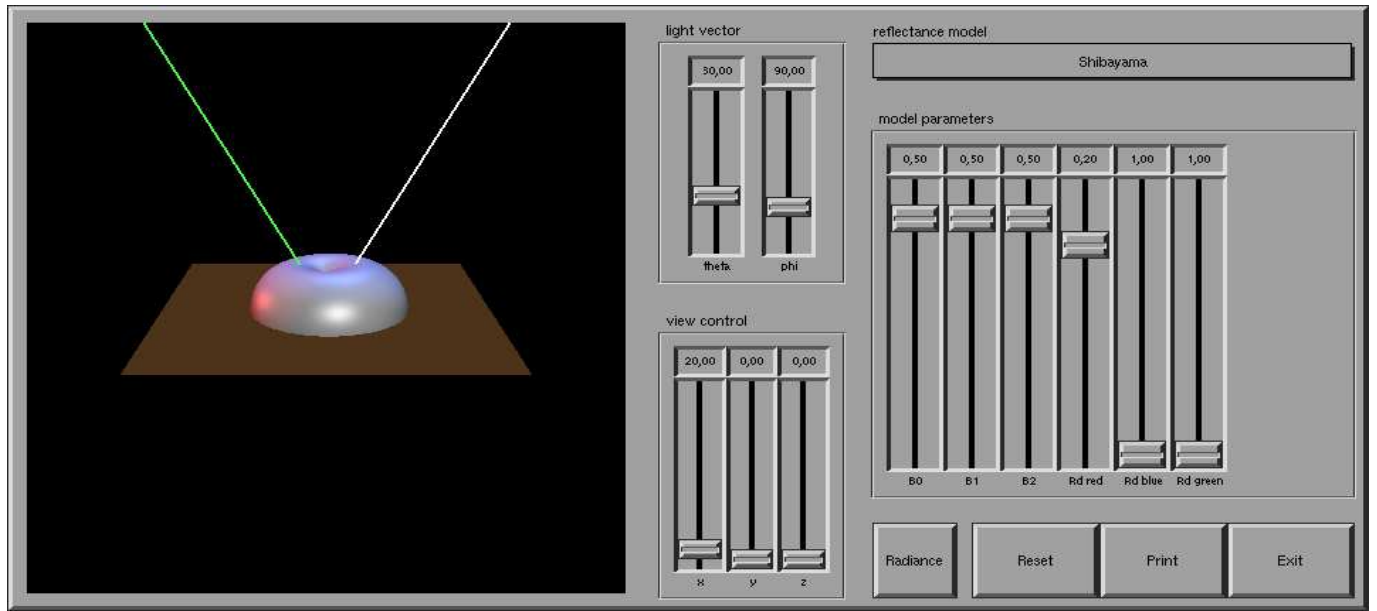


FIG. 6.1 – Tracé de la BRDF par le modèle de Shibayama-Weigand avec $B_0 = B_1 = B_2 = 0.5$ et $\rho = 0.2$.

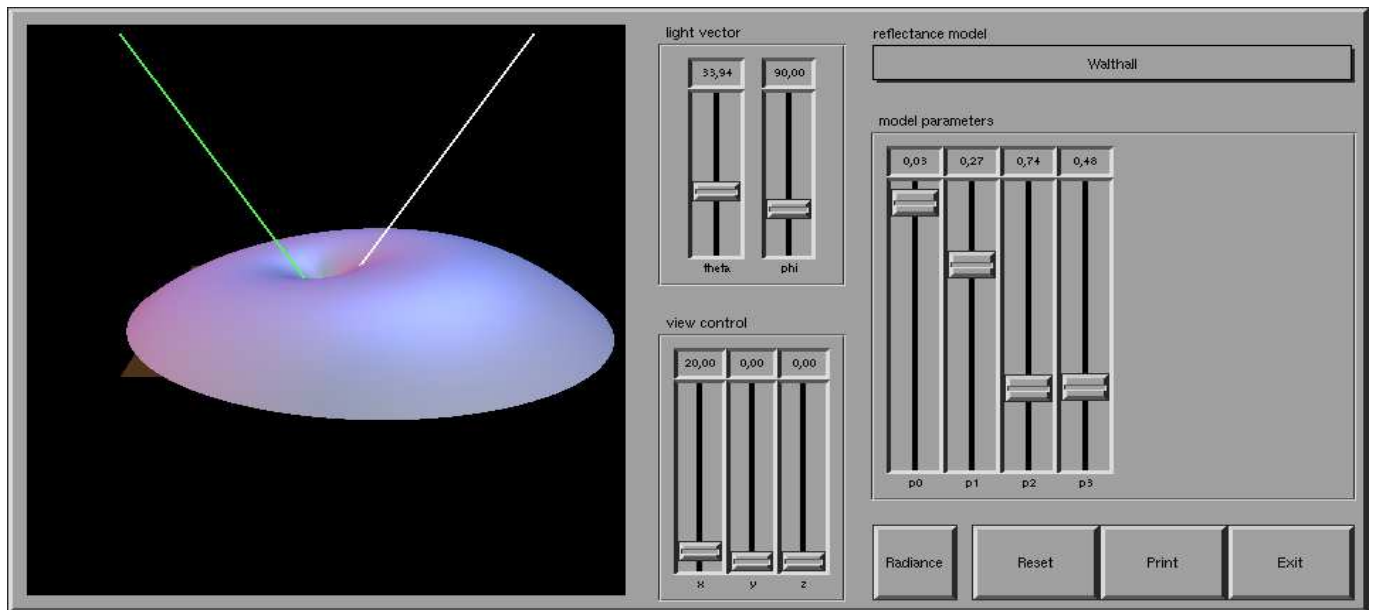


FIG. 6.2 – Tracé de la BRDF par le modèle de Walthall avec $p_0 = 0.03$, $p_1 = 0.27$, $p_2 = 0.74$ et $p_3 = 0.28$.

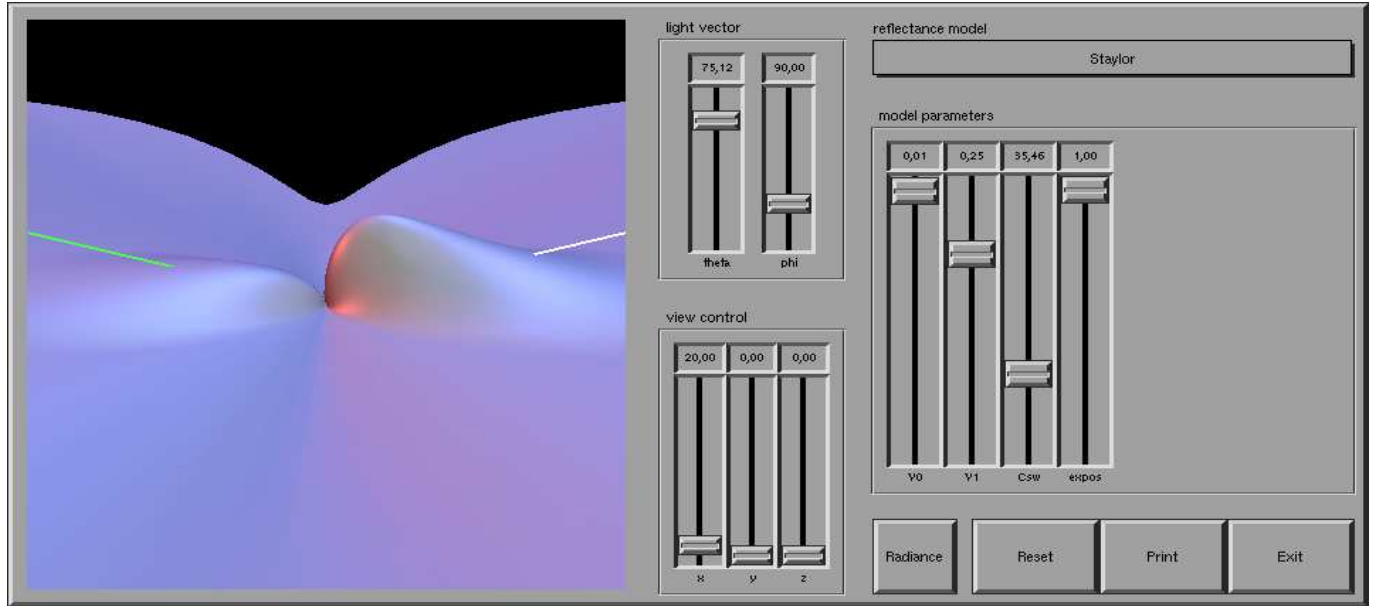


FIG. 6.3 – Tracé de la BRDF par le modèle de Staylor-Suttles avec $Y_0 = 0.01$, $Y_1 = 0.25$, $C_{sw} = 35.48$ et $expos = 1.0$.

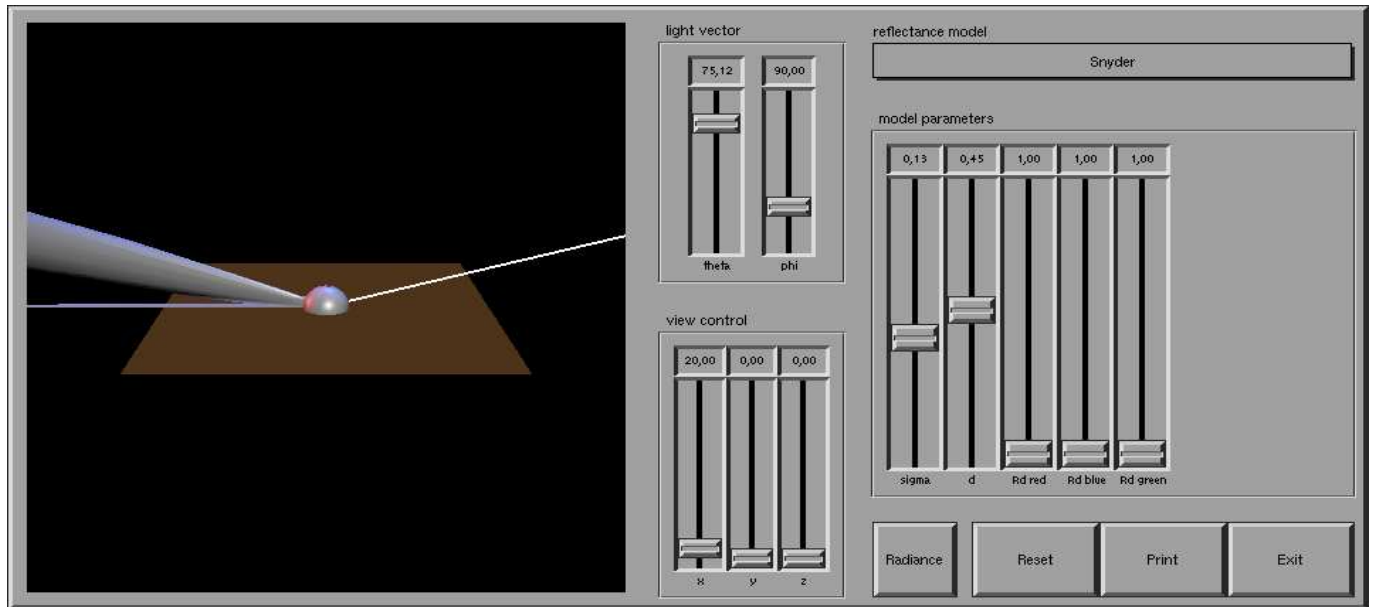


FIG. 6.4 – Tracé de la BRDF par le modèle de Snyder avec $\sigma = 0.13$, $d = 0.45$, $\rho = 1.0$. Nous remarquons une tâche au sol qui est la représentation graphique de la divergence du modèle pour les faibles angles de visée.

vérification des modèles que nous expliquerons plus tard, nous allons également procéder à la régression du modèle de Lambert, premier modèle décrit dans le chapitre 4.

6.2 Validation quantitative des modèles

Afin de tester les six modèles les plus intéressants et de les comparer entre eux, nous allons les introduire dans un programme de régression non linéaire du type Levenberg-Marquardt [Press et al., 1995], dont le principe est décrit dans le paragraphe suivant.

6.2.1 Régression des modèles de BRDF

Nous disposons, via internet, d'une base de données de mesures de BRDF : l'université de Columbia aux Etats-Unis, en collaboration avec l'université d'Utrecht aux Pays-bas, a réalisé en laboratoire des mesures de BRDF sur 61 matériaux différents et selon 205 combinaisons $(\theta_r, \theta_i, \Delta\Phi)$ pour chaque échantillon [Koenderink et al., 1996]. Mais nous n'utilisons pas l'intégralité des échantillons, étant donné que notre problème est confiné à un cadre urbain. Ainsi, les simulations suivantes sont réalisées sur 11 des 61 échantillons. Nous disposons d'herbe, de bardeau, de deux types d'ardoise et de brique, de bois, de tuile et de trois types de béton, comme le montre la figure 6.5.



FIG. 6.5 – Echantillons disponibles dans la base de données curet.

Grâce à l'algorithme de régression, le modèle, après une initialisation aléatoire, ajuste ses paramètres afin de trouver une valeur de la BRDF se rapprochant le plus de celle de la base de données. Les paramètres ainsi obtenus sont considérés comme étant les caractéristiques du matériau étudié. Un critère nous permet de quantifier l'écart entre la valeur de la BRDF trouvée par le modèle et celle qui provient de l'expérimentation : la somme des carrés des résidus. Pour chaque combinaison d'angle, la valeur la plus proche de la BRDF expérimentale est trouvée, et cet indicateur n'est autre que le carré de la différence entre la valeur obtenue par le modèle et celle trouvée en laboratoire. Le modèle dont la régression donne, pour chaque matériau, la somme des carrés des résidus la plus faible, est alors considéré comme celui modélisant le mieux la réflexion de la lumière sur une surface présente en milieu urbain.

Mais avant de lancer nos séries de régression, nous devons nous assurer du bon fonctionnement de notre algorithme de régression. Pour cela, nous proposons d'y introduire un polynôme $ax^3 + bx^2 + cx + d$ dont nous connaissons les valeurs des coefficients, et sa valeur pour une centaine de x différents. Constatant que le programme converge vers les coefficients (a, b, c, d) que nous avons définis, nous en concluons que la régression fonctionne normalement, et nous l'utilisons donc sur les modèles que nous avons choisis.

6.2.2 Obtention des paramètres

Après avoir vérifié la bonne marche de l'algorithme, nous le lançons sur tous les modèles, et pour chaque type de matériaux. Nous obtenons alors les paramètres résumés dans le tableau de la figure 6.6.

Nous n'avons mis aucune contrainte sur les paramètres, donc le programme de régression non-linéaire peut choisir librement les paramètres qui permettent d'approcher au mieux les valeurs de BRDF de la base de données. Mais, dans les publications scientifiques présentant les modèles, nous avons pu constater qu'il y avait des conditions sur les paramètres. C'est pourquoi dans le tableau de la figure 6.6, il apparaît, pour les bétons de type 1 et 2 dans le modèle de Phong, des cases marquées "non calculé-Phys." (Phys. pour physique), car les paramètres obtenus ne correspondent pas à des valeurs permises (la convergence donnait des valeurs négatives de l'exposant). Les autres cases notées "non calculé-conv." (con. pour convergence) renvoient, elles, à des problèmes de convergence, qui sont détaillés dans les paragraphes suivants.

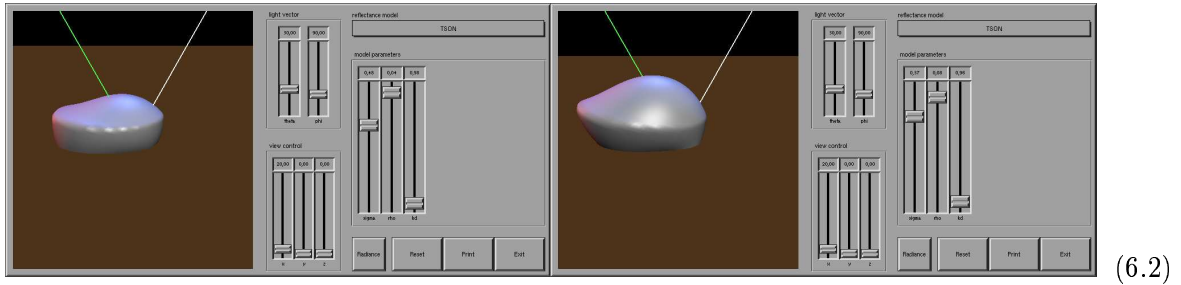
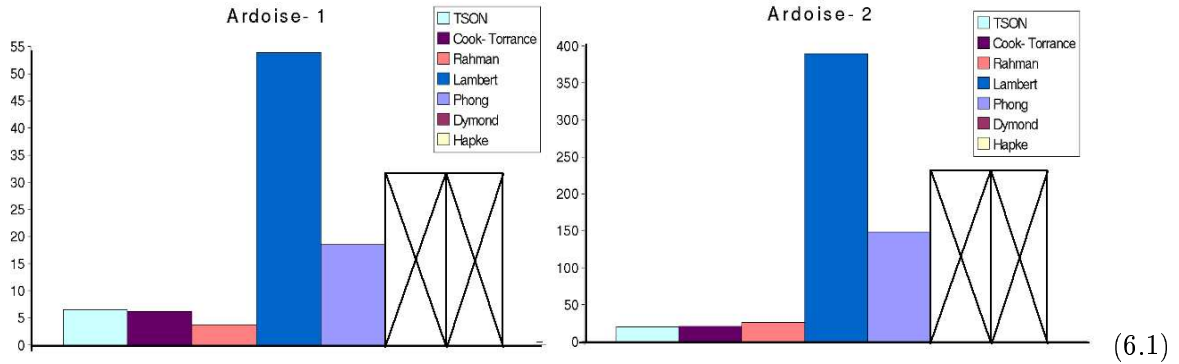
6.2.3 Exploitation des résultats

Nous nous sommes donnés comme critère de comparaison entre les modèles la somme des carrés des résidus. Nous avons donc représenté cette somme pour chaque matériau et chaque modèle dans un histogramme afin de pouvoir établir un classement entre les différents modèles utilisés. De plus, pour donner une idée de la forme de la BRDF associée au matériau étudié, nous avons présenté l'image de la BRDF que donne le logiciel de visualisation utilisé précédemment. Ainsi, chacun des paragraphes qui suit correspond à un matériau différent, et dans chacun d'eux est représentée la somme des carrés des résidus obtenue par chaque modèle et la BRDF du matériau correspondant. Sur ces histogrammes, le lecteur remarquera des barres cochées d'une croix : cela signifie que, pour ce matériau, le modèle n'a pas réussi à converger.

		Herbe	Bardeau	Tuile	Ardoise1	Ardoise2	Brique1	Brique2	Beton1	Beton2	Beton3	Bois
TSON	Kd	0,968	0,992	0,974	0,981	0,965	0,974	0,975	0,988	0,970	0,995	0,974
	Rho	0,040	0,195	0,449	0,040	0,075	0,144	0,075	0,669	0,648	0,768	0,395
	Sigma	1,510	0,748	0,231	0,480	0,366	0,920	0,340	0,600	0,317	0,516	0,344
RAHMAN	K	0,202	0,202	1,519	1,004	1,502	0,265	1,348	0,313	0,431	0,347	0,576
	G	-0,234	0,466	0,866	0,500	0,952	0,298	0,814	-0,411	-0,31	-0,402	-0,053
	Rdr	0,006	0,008	1,649	0,040	2,820	0,011	0,304	0,037	0,049	0,044	0,058
COOK	Kd	0,910	0,193	0,902	0,944	0,877	0,933	0,911	1,033	0,993	1,061	0,918
	Rho	0,050	0,168	0,503	0,023	0,094	0,145	0,085	0,665	0,657	0,747	0,446
	Sigma	1,378	0,998	0,305	0,585	0,481	1,266	0,454	1,078	0,230	1,009	0,461
LAMBERT	Rho_r	0,11008	0,17152	0,62482	0,119089	0,243191	0,185216	0,197752	0,660577	0,66651	0,74137	0,519803
PHONG	Kd	0,983		0,383	0,104	0,286	0,426	0,262				0,644
	Exposant	0,286	Non calculé	38,083	8,183	14,262	26,224	13,780	Non calculé	Non calculé	Non calculé	15,991
	Rho	0	Conv.	0,369	0,107	0,080	0,129	0,066	Phys.	Phys.	Conv.	0,196
DYMOND	R		0,239				0,042					
	H	Non calculé	3,294	Non calculé	Non calculé	Non calculé	28,648	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé
	Rdr	Conv.	0,091	Conv.	Conv.	Conv.	0,061	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.
HAPKE	S(0)											
	H	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé	Non calculé
	W	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.
	G											

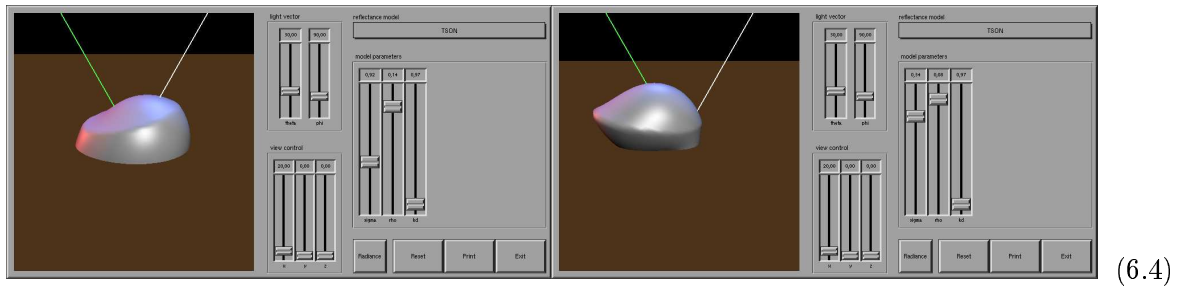
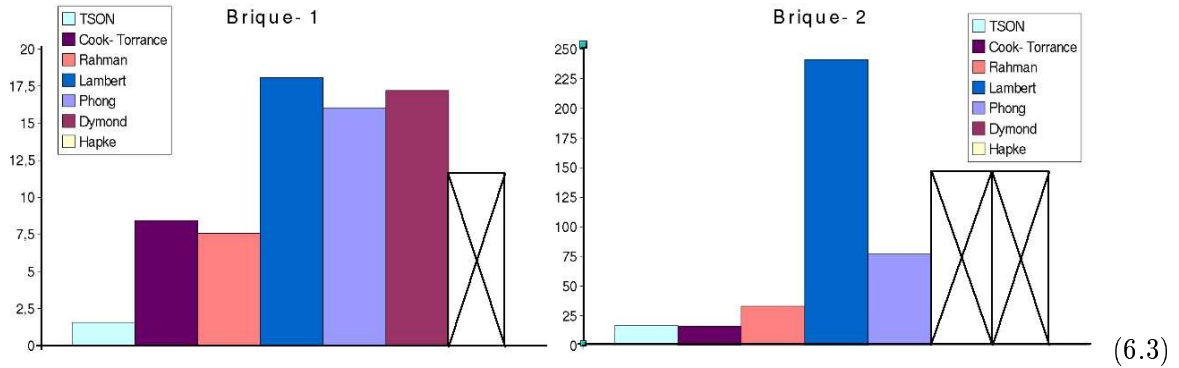
FIG. 6.6 – Paramètres caractéristiques de chacun des matériaux selon les différents modèles utilisés.

1. Les deux types d'ardoise



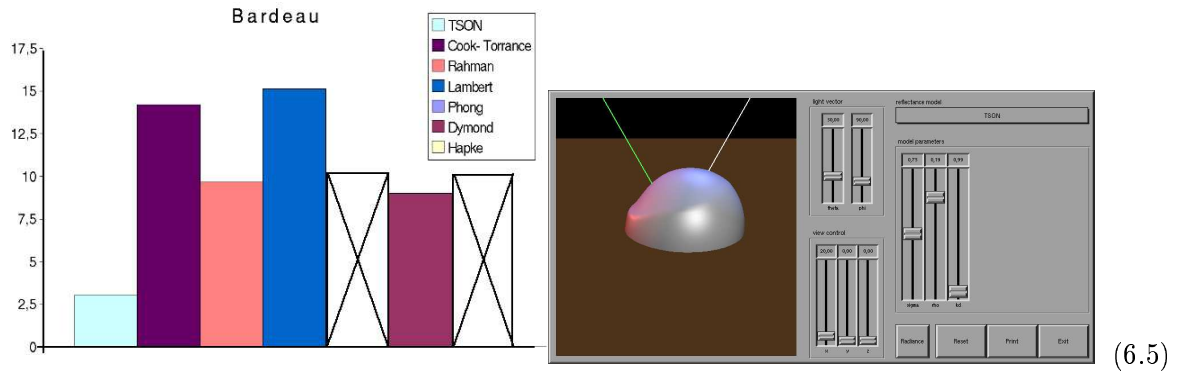
L'ardoise est, cela se conçoit bien, un matériau au caractère spéculaire prononcé. De la première lecture des graphiques de la figure 6.1, nous remarquons que la somme des carrés des résidus (SCR) du modèle de Lambert est sept fois supérieure dans le cas de l'ardoise de type 2, que dans le cas de l'ardoise de type 1. Or, comme le modèle de Lambert modélise toutes les surfaces en considérant la réflexion de la lumière sur elles comme isotrope, nous en déduisons que l'ardoise de type 1 est plus granuleuse (i.e. plus diffusante) que l'ardoise de type 2. Ceci se remarque d'ailleurs bien sur le tracé des BRDF des deux types d'ardoise sur lesquels nous voyons que la forme de la BRDF de l'ardoise de type 1 est plus aplatie que la BRDF de l'ardoise de type 2. Cela implique que la valeur de la BRDF dans la direction spéculaire est plus faible dans le cas de l'ardoise de type 1 que dans le cas de l'ardoise de type 2. Nous nous apercevons également que les proportions entre les SCR sont à peu près respectées d'un graphique à l'autre, sauf dans le cas du modèle de rahman, ce qui laisse penser que ce modèle reproduit bien le caractère spéculaire des matériaux, si ceux-ci ne le sont pas trop. Nous pouvons également noter que le modèle de Phong a des difficultés à représenter la specularité du matériau, mais que c'est sans commune mesure avec le modèle de Lambert. Nous sommes forcés de constater que les modèles de Dymond et de Hapke ne parviennent pas à modéliser les deux types d'ardoise présentes.

2. Les deux types de brique



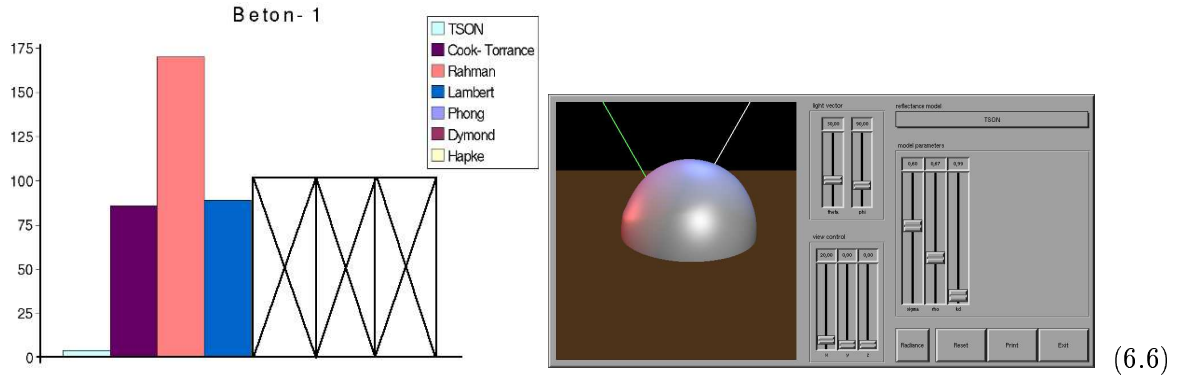
Les deux graphiques présentés sur les figures 6.3 et 6.4 sont issus du même type de matériau, la brique, mais avec des différences de granularité évidentes. Le premier indicateur est la différence de SCR entre les deux représentations par le modèle de Lambert. Nous nous rendons compte en comparant les graphiques des figures 6.3 et 6.4 que, comme précédemment, la brique de type 1 présente un caractère bien moins spéculaire que la brique de type 2. Au vu des images, c'est évident tellement la différence de forme est flagrante. Mais ces dessins de BRDF (tracés avec le modèle de TSON) nous apportent une information que nous n'avions pas, à première vue, sur les schémas des SCR. Cette découverte est la présence d'un caractère rétrodiffusif de la brique de type 1, ce qui explique notamment le fait que le modèle de Dymond puisse modéliser ce matériau (figure 6.3). La comparaison avec l'ardoise présentée dans le graphique précédent nous permet également de dire que l'ardoise de type 2 a une propriété de specularité bien plus prononcée que la brique de type 2, mais que l'ardoise de type 1 est moins granuleuse que ne l'est la brique de type 1. Plusieurs raisons nous permettent d'affirmer que la brique de type 1 possède un caractère assez diffus. Tout d'abord, le modèle de Dymond arrive à modéliser ce matériau, ce dont le modèle de Phong est incapable, et enfin la SCR dans le cas de Cook-Torrance n'est inférieure que de moitié à celle de Lambert.

3. Le bardeau

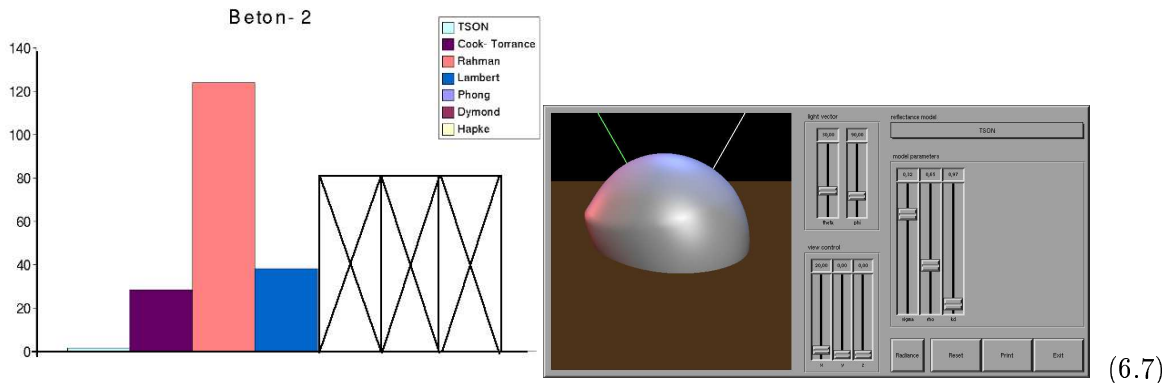


Les schémas de la figure 6.5 apportent encore plus d'enseignements sur les modèles étudiés. La première chose frappante est que les SCR des modèles de Cook-Torrance et de Lambert sont presque égales. Cela signifie que, étant donné que le modèle de Lambert représente parfaitement la réflexion diffuse de la lumière sur un matériau, la différence de modélisation de cette surface entre Torrance-Sparrow (partie diffuse du modèle de Cook-Torrance) et Lambert est infime. Cela nous indique clairement que le matériau est très diffusant. Nous pouvons vérifier cette conjecture en comparant les paramètres de rugosité du modèle de TSON, et s'apercevoir que le bardeau est un peu moins diffus que la brique de type 1, mais bien plus que les deux types d'ardoise vus précédemment. De plus, comme pour la brique de type 1 que nous venons d'étudier, nous constatons sur la figure de droite que le bardeau a un caractère rétrodiffusif, certes peu prononcé, mais présent quand même. Sinon, nous remarquons que le modèle de Dymond arrive à modéliser cette surface, justement parce qu'elle ne présente pas de fort caractère spéculaire, propriété qui, par contre, est défavorable à toute modélisation de surface par le modèle de Phong. Nous notons, outre ces propositions, que le modèle de TSON se comporte toujours bien, au contraire du modèle de Hapke, qui peine à représenter les matériaux proposés.

4. Les trois type de béton

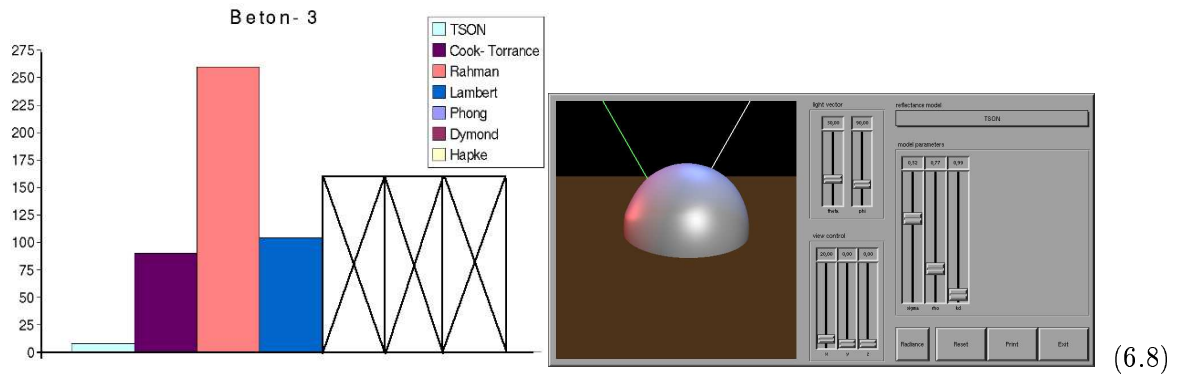


Passons à l'étude du graphique correspondant au béton de type 1. Nous pouvons dire qu'il est complémentaire du graphique du bardeau dans le sens où, lui aussi, montre une égalité presque parfaite entre les SCR des modèles de Lambert et de Cook-Torrance. Encore une fois, ceci nous renseigne sur le fort caractère diffus de la surface étudiée. Notre remarque est totalement justifiée car, sur la représentation de la BRDF du béton de type 1 (toujours avec le modèle de TSON), il est frappant de voir à quel point la réflexion de la lumière par une telle surface se rapproche d'une forme lambertienne. On remarque cependant que cette forme lambertienne n'est pas symétrique par rapport aux directions d'illumination et d'observation, ce qui dénote un léger signe de rétrodiffusion du matériau.



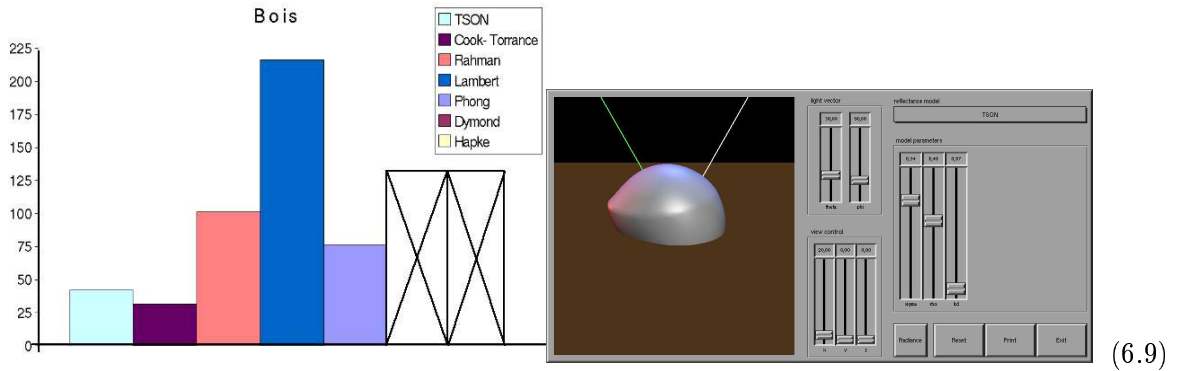
Le graphique de la figure 6.7 est issu du même matériau que ceux des figures 6.6 et 6.8, mais avec des compositions différentes. Nous entendons par là que ce qui permet de faire la distinction entre les trois types de béton, c'est la taille des particules qui les composent. Or, plus les particules sont grosses et plus la réflexion diffuse de la lumière sur une telle surface revêt un caractère important. La première remarque que nous pouvons faire est que, dans le cas présent, le modèle de Rahman a des difficultés à modéliser la réflexion de la lumière sur la surface. Et au vu de la SCR du modèle de Lambert, nous supposons que le matériau présente un caractère diffus certain. Une remarque importante que nous pouvons faire est que la partie

spéculaire du béton de type 2 n'est pas assez importante pour que Phong puisse la modéliser, et trop importante pour que Dymond puisse la représenter. Hapke n'arrive toujours pas à modéliser la moindre surface. En comparant avec le béton de type 1, on remarque cependant que le caractère spéculaire est plus prononcé dans le cas présent, ce qui nous laisse penser que ce type de béton de type 2 a une texture faite de grains plus fins que le béton précédent.



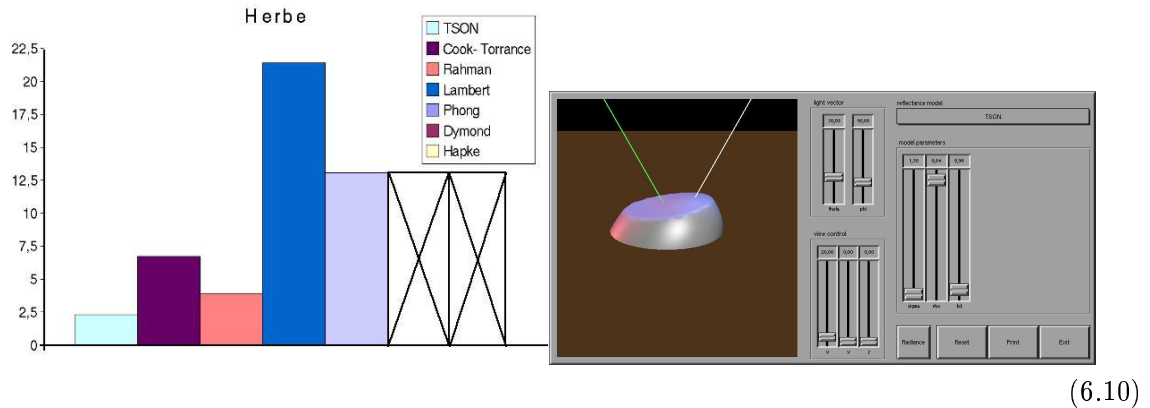
Au premier coup d'oeil, on remarque la similarité entre les béton de type 1 et de type 3. Certes la différence de "volume" de la BRDF existe (ce qui laisse imaginer une différence d'albédo entre les deux types de béton), néanmoins les compositions internes de ces deux matériaux sont quand même très proches. La forme très lambertienne de la BRDF implique un fort caractère diffus, et le léger décalage de celle-ci vers la direction d'illumination confirme (cf. béton de type 1) que le matériau est rétrodiffusif. Les trois figures représentant les SCR des trois types de béton nous apprennent, en tous cas, qu'il faut que le matériau ne soit pas très diffusant pour que Rahman puisse modéliser le matériau considéré.

5. Le bois



En tenant compte des remarques faites précédemment, nous voyons tout de suite que le bois qui nous est proposé d'étudier possède un revêtement particulier. En effet, le modèle de Lambert modélise relativement mal ce matériau (aussi mal que la brique de type 2 que nous avons considéré comme peu diffusante), et le modèle de Dymond n'arrive pas à modéliser le matériau choisi. Ceci nous incite à conclure que le bois étudié a un caractère spéculaire non négligeable, ce qui peut nous laisser penser qu'il est verni. Cette remarque est d'autant plus justifiée qu'au regard de la BRDF de ce matériau, on note une protubérance dans la direction d'observation.

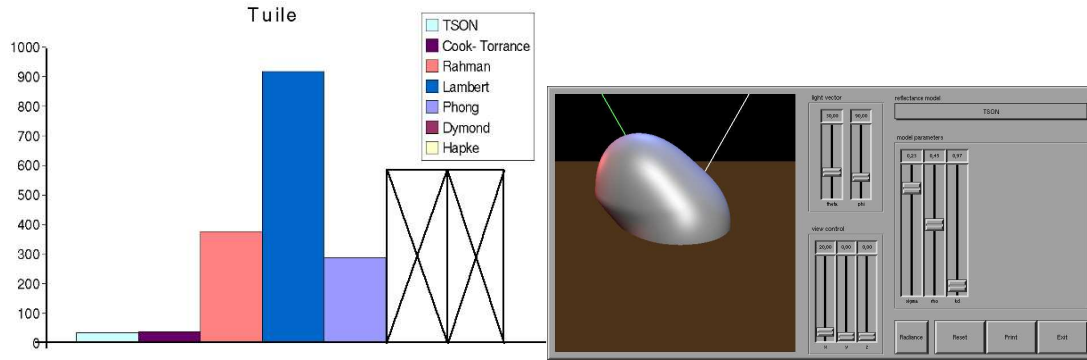
6. L'herbe



En ce qui concerne l'herbe, nous notons qu'elle est suffisamment spéculaire pour que Phong la modélise et pour que Rahman le fasse bien. Néanmoins, elle a une partie diffuse qui mérite que nous nous y intéressons, sachant que le modèle de Lambert a une SCR proche de celle que nous obtenions lors de l'étude, par exemple, de la brique de type 1. En outre, nous constatons que le caractère spéculaire de l'herbe est trop important pour que le modèle de Dymond puisse modéliser la surface, et que le modèle de Hapke est toujours incapable de représenter la réflexion de

la lumière sur une surface que nous étudions, ici l'herbe. Nous devons d'autre part préciser que le caractère spéculaire de l'herbe n'intervient pas aux angles de visée verticales, mais lorsque l'observateur regarde l'herbe "au ras du sol". Cela se voit sur le dessin de la BRDF, où nous notons comme un plateau pour les angles de visée non rasants.

7. La tuile



(6.11)

Le dernier matériau de l'étude est la tuile. Au regard, d'une part, de la SCR dans le cas du modèle de Lambert et, d'autre part, du coefficient de rugosité du modèle de TSON, nous supposons que c'est le matériau le plus spéculaire étudié lors de ces simulations. Cette importante specularité est, par ailleurs, très visible sur le dessin de la BRDF sur la figure 6.11. De plus, c'est un matériau qui peut être modélisé par Phong, ce qui requiert une specularité non négligeable. Nous pouvons également constater que la différence entre les SCR des modèles de TSON et de Cook-Torrance est infime, ce qui laisse penser que les noyaux de Torrance-Sparrow et de Cook-Torrance sont équivalents lors de conditions de specularité importantes. Ceci se vérifie d'ailleurs bien dans le cas de l'ardoise de type 2.

Nous venons de détailler chaque graphique en observant surtout l'influence du matériau sur le modèle choisi. Il est temps, maintenant, de conclure sur l'utilité et l'efficacité de chaque modèle, afin de ne retenir que celui (ou ceux) qui pourront être efficaces à la poursuite de notre étude.

6.2.4 Discussion sur les modèles

1. Le modèle de Lambert

Il est légitime, a priori, de se demander pourquoi nous avons décidé de faire des régressions sur le modèle de Lambert. Sa forme, extrêmement simple, ne pouvait nous fournir qu'un résultat assez éloigné de la réalité, et c'est pourtant en ce sens que c'est intéressant. En effet, Lambert a, il y a 250 ans de cela, décrit la réflexion de la lumière sur une surface parfaitement diffuse comme isotrope, i.e. la lumière est réémise de manière égale dans toutes les directions de l'espace

(cf. figure 6.7). Ceci est, évidemment, la description la plus sommaire (et la plus simple) de la réflexion de la lumière, mais également la plus utilisée par la majorité des auteurs . Nous espérons alors que les autres modèles choisis pour décrire le même phénomène le ferait de manière plus précise. Ce fut le cas, donnant alors de précieuses indications sur la texture des matériaux. La régression de la courbe lambertienne a donc permis une comparaison facile entre elle et les autres parties diffuses de BRDF que nous avons à étudier (Oren-Nayar surtout), ce qui nous a permis de mettre en évidence les cas où le matériau est très diffusant.

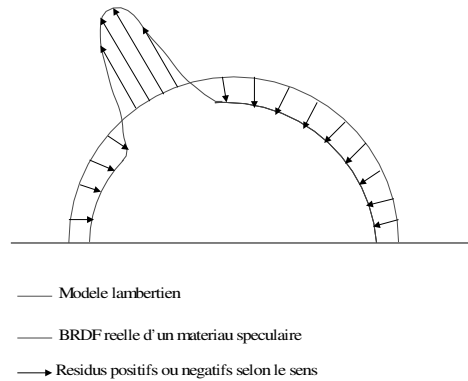


FIG. 6.7 – Résidus du modèle de Lambert.

2. Le modèle de Rahman

A la suite de la régression du modèle de Rahman avec 7 des 11 matériaux, nous remarquons que les valeurs de k obtenues sont inférieures à 1. Comme le terme qui contient le paramètre k est à la puissance $k - 1$, le modèle diverge, ce qui le rend inutilisable. Or, en se souvenant que c'était ce même genre de tâche qui avait rendu le modèle de Snyder inutilisable, nous avons eu l'idée d'affecter au modèle de Rahman divers facteurs. Nous avons d'ailleurs regroupé tous les stratagèmes utilisés et placé les résultats qu'ils donnaient dans le tableau figure 6.8, pour finalement constater qu'ils n'étaient pas intéressants. Bien que le meilleur modèle soit celui à l'intérieur duquel nous avons multiplié par le gain d'atténuation géométrique, la valeur élevée de la SCR pour chacun des matériaux indique clairement que le modèle de Rahman est peu efficace.

3. Les modèles de Cook-torrance et de TSON

Ils ne diffèrent que par leurs parties diffuses. Dans le modèle de TSON, la modélisation de la surface est réalisée par une distribution de cavités en forme de V dont les facettes sont purement spéculaires (des miroirs parfaits), tandis que pour le modèle de Cook-Torrance, la partie diffuse est représentée par une lambertienne. Lorsque nous lançons la régression avec chacun d'eux, nous nous apercevons immédiatement que le modèle de TSON est meilleur que le modèle de Cook-Torrance. Et cette différence intervient notamment sur les matériaux au caractère très rugueux comme la brique de type 1 ou les trois types de béton, ainsi que l'herbe (qui a le coefficient de rugosité le plus élevé selon les modèles de TSON et de Cook-Torrance). Ceci est dû au fait que le noyau d'Oren-Nayar permet de tenir compte de l'augmentation de l'intensité lumineuse lorsque nous nous rapprochons de la direction d'illumination. Ce phénomène est

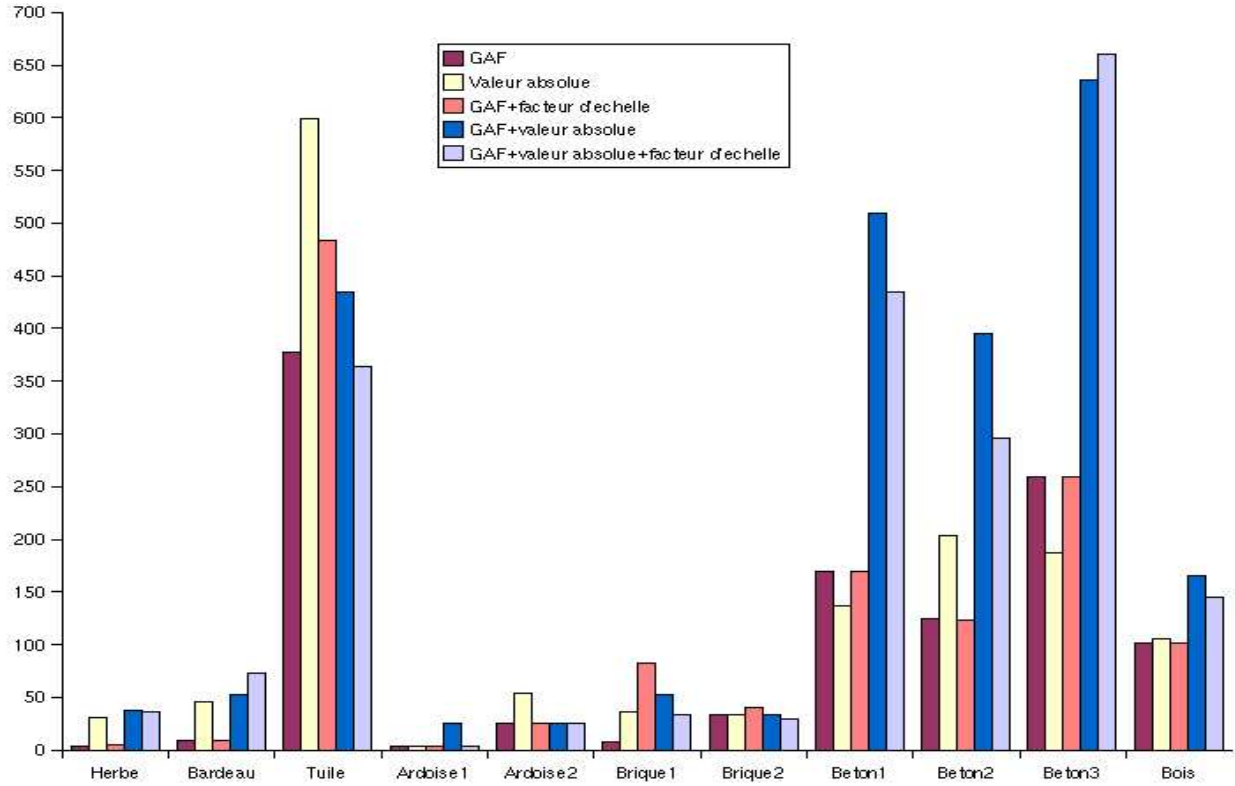


FIG. 6.8 – Valeurs des paramètres du modèle de Rahman après multiplication par des facteurs différents. *Abs* signifie que nous avons rajouté la valeur absolue à l'exposant $k - 1$, *Att* que nous avons multiplié par le \mathcal{GAF} et *coef* que nous avons tout multiplié par un facteur d'échelle.

particulièrement important pour les matériaux diffus et très granuleux. Heureusement, dans le cas des matériaux spéculaires, nous constatons que les performances des deux modèles sont équivalentes, ce qui est normal étant donné la similitude de leurs parties spéculaires.

4. Le modèle de Phong

C'est, comme nous l'avons vu dans notre état de l'art, le modèle le plus utilisé pour modéliser la réflexion de la lumière sur une surface dans les jeux vidéo. Dans notre cas, il apparaît clairement qu'il n'est pas efficace pour modéliser la réalité. En effet, la majorité des matériaux au caractère diffus trop prononcé pose de grand problème pour la détermination des paramètres relatifs à ce type de matériau. De surcroît, lorsque la régression converge, le modèle n'est pas intéressant car il ne donne, pour aucun matériau, de résultats excellents. Le problème sur lequel le modèle de Phong nous incite à discuter est que ce modèle est un modèle empirique, et donc que nous pouvons nous "arranger" pour retrouver plus ou moins un matériau choisi, quitte à ce que l'ardoise paraisse moins brillante que d'habitude, ou à ce que le béton ait des allures de plastique lorsque nous regardons dans la direction spéculaire. L'avantage des autres modèles réside dans leurs capacités à représenter la forme exacte de la BRDF d'une surface réelle.

5. Le modèle de Dymond

Lorsque nous traçons, sur le logiciel de visualisation, la BRDF du bardeau (voir figure 6.9), nous nous apercevons qu'elle revêt un caractère rétrodiffusif important.

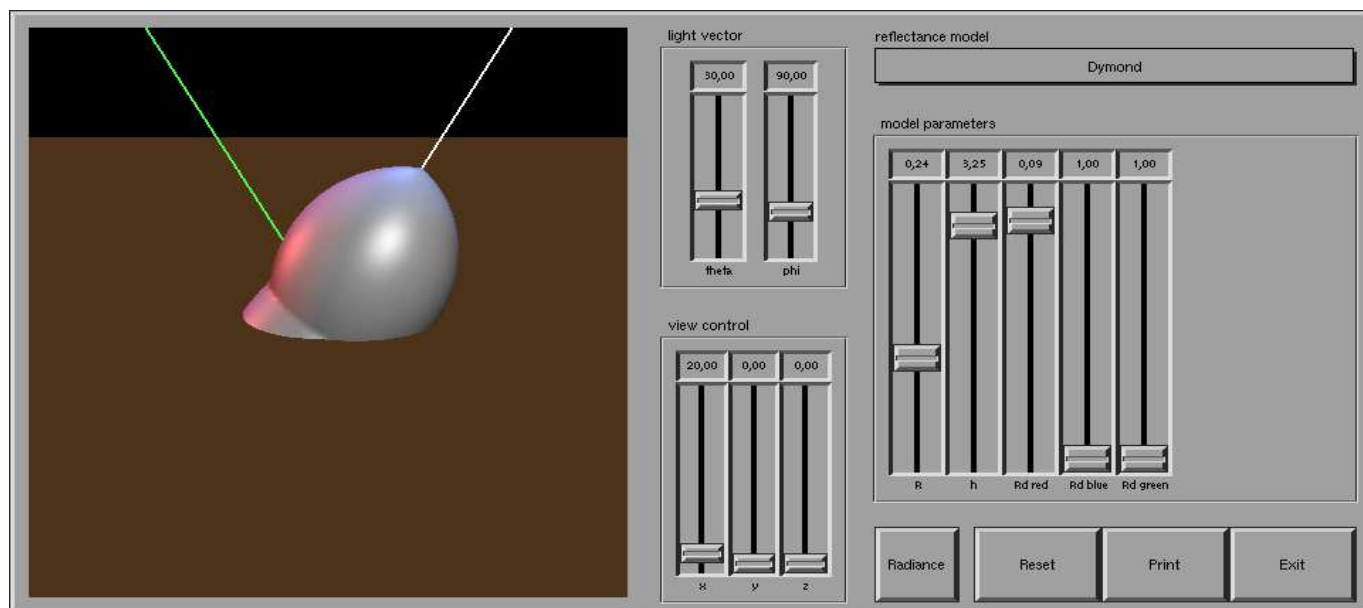


FIG. 6.9 – Tracé de la BRDF par le modèle de Dymond avec $R = 0.24$, $h = 3.25$, $R_{dr} = 0.09$.

Ceci nous laisse penser que les matériaux à caractère spéculaire prononcé sont non représentables pour ce modèle. Celui-ci est cependant capable d'éliminer son caractère rétrodiffusif pour obtenir une BRDF proche d'une BRDF lambertienne, sans pour lui ressembler exactement. Les résultats que nous avons trouvés sont donc conformes aux suppositions que nous venons de faire.

6. Les problèmes de convergence et d'initialisation

Même si les quatre modèles que nous venons de citer donne des résultats, pour certains, encourageants, le lecteur peut se rendre compte que les valeurs des sommes des carrés des résidus n'apparaissent pas dans tous les diagrammes. C'est le cas du modèle de Hapke pour tous les matériaux, mais aussi celui du modèle de Dymond pour l'herbe, la tuile, l'ardoise de type 1 et celle de type 2, la brique de type 2, le béton de type 2 et le bois. Nous constatons le même manque dans le cas du modèle de Phong, pour le bardeau et le béton de type 3. Ce ne sont ni des oublis de notre part, ni des valeurs nulles, mais ces colonnes vides mettent en lumière, comme nous l'avons vu précédemment, des problèmes de convergence lors de la régression non-linéaire ou des convergences donnant des paramètres non plausibles. Nous ne pouvons donc pas utiliser ces modèles pour résoudre notre problème.

Cependant, il reste un second problème qui n'est pas visible sur les graphiques : lorsque nous lançons, par exemple, 4 fois de suite la régression, nous n'obtenons pas les mêmes valeurs des paramètres. Parfois elles diffèrent de quelques centièmes, mais elles peuvent également prendre des valeurs tout à fait extravagantes. Ce problème vient du fait que pour démarrer, le programme a besoin de **valeurs initiales des paramètres**. En effet, l'algorithme utilisé est basé sur une méthode d'optimisation locale, ce qui veut dire qu'il a besoin de valeurs initiales pour se lancer. Mais une fois en marche, il s'arrête au premier minimum de la somme des carrés des résidus trouvé, qui peut s'avérer être un minimum local. Ainsi, comme le résultat dépend de ces conditions initiales, nous avons dû réaliser de multiples simulations afin de déterminer sous quelles conditions nous obtenions les bons paramètres.

Pour le modèle de Rahman, nous remarquons que les paramètres sont identiques (au pourcent près) si :

$$\begin{cases} -0.66 < g_{init} < 0.99 \\ \rho_{init} \neq 0.0 \end{cases} \quad (6.12)$$

Dans le cas du modèle de TSON, nous retrouvons les mêmes paramètres (toujours au pourcent près) si :

$$0.05 < \rho_{init}, kd_{init}, \sigma_{init} < 0.95 \quad (6.13)$$

6.3 Conclusions sur la pertinence des modèles

Nous remarquons que sur les 6 modèles qui nous était proposés, seulement 3 sont utilisables dans le cas d'une étude en milieu urbain. Ce sont les modèles de Cook-Torrance, de TSON et de Rahman. Et en comparant ces 3 modèles, les résultats obtenus entraînent un classement presque automatique : le modèle de TSON est le plus performant, puis c'est celui de Cook-Torrance et enfin celui de Rahman. En effet, lors des simulations réalisées, la somme des carrés des résidus est la plus faible pour chaque matériau (exceptée l'ardoise) lorsque le modèle de TSON est utilisé, même si elle reste élevée dans les cas du bois, du second type d'ardoise et de la tuile (cela ne représente quand

même qu'une erreur moyenne inférieure à 3.5% dans le pire des cas).

Ainsi, cette comparaison entre les modèles nous incite à **choisir le modèle de TSON** pour la suite de notre étude, qui consistera à déterminer si oui ou non le modèle est capable de redonner les mêmes paramètres pour un nombre réduit d'images. En effet, nous délaisserons le modèle de Cook-Torrance car il est trop proche de celui de TSON, et celui de Rahman car il a trop de difficultés à modéliser les surfaces rugueuses, ce qui représente une partie importante des matériaux urbains.

Chapitre 7

Capacité d'interpolation du modèle de TSON

7.1 Rappel du problème initial

Dans la réalité, les vols destinés à la prise d'images de paysages se font de telle manière qu'au final, nous nous retrouvons avec un **maximum de 15 images** pour un point au sol. La première difficulté consiste à savoir si le modèle sera capable, ou non, de retrouver les paramètres caractéristiques d'un matériau avec seulement 15 combinaisons $(\theta_r, \theta_i, \Delta\Phi)$, sachant que dans le chapitre précédent nous les avons déterminés à partir de 205 combinaisons. Mais la difficulté ne s'arrête pas là. Dans les 205 mesures qui nous étaient proposées, il y en a plusieurs qui concerne des angles d'illumination et d'observation rasants. Or, lors de missions aériennes, des contraintes d'observation et d'illumination vont intervenir, comme le montre la figure suivante.

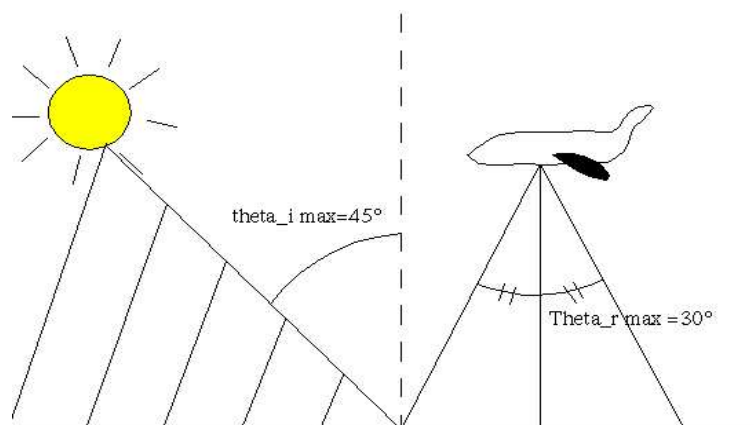


FIG. 7.1 – Restrictions sur les valeurs des angles d'observation et d'illumination pour se placer dans le cas d'une prise réelle d'images.

Ainsi, sur les 205 mesures que nous avons à notre disposition, seules les **18 mesures** présentées dans le tableau suivant conviennent à notre problème.

Theta_r (en °)	Theta_i (en °)	D_phi (en °)
18	38	-25
24	35	-40
11	34	0
25	27	-52
12	27	-56
31	22	-47
0	22	180
16	16	-93
25	11	-65
11	11	180
22	0	180
0	45	0
15	38	-110
30	35	-90
11	34	180
24	27	-126
23	23	180
23	45	180

FIG. 7.2 – 18 combinaisons de $(\theta_r, \theta_i, \Delta\phi)$.

7.2 Vérification des capacités d'interpolation du modèle

7.2.1 Technique de vérification et obtention des paramètres

Pour réaliser la simulation avec seulement 18 mesures d'angle différentes, nous procédons de la même manière que précédemment : nous introduisons le même modèle de TSON qu'auparavant et faisons la régression avec le même algorithme de Levenberg-Marquardt. Nous avons également pris le soin d'imposer des conditions d'initialisation qui permettent de retrouver un résultat cohérent.

7.2.2 Importance de la répétition de l'échantillonnage

Cependant, même si tous les matériaux choisis entraînent la convergence du programme, nous sommes face à un gros problème : en comparant avec les paramètres obtenus lorsque nous avons utilisé 205 mesures, nous nous apercevons que certains ont vu leur valeur presque doubler ! Lorsque nous rééditons la simulation, nous ne retrouvons pas à chaque fois les valeurs que nous avons précédemment. Nous supposons alors que les 18 mesures qui nous restent sont particulières et nous notons que plusieurs essais sont nécessaires pour retrouver la même valeur de paramètre, qui n'est pas forcément celle que nous obtenions lorsque nous avons effectué la régression sur 205 mesures différentes.

Nous sommes face à deux problèmes que nous allons résoudre séparément. Notre première solution va être celle qui permet de retrouver le même paramètre pour un matériau donné. Elle consiste en la modification du programme de régression, en lui faisant prendre de façon aléatoire des valeurs initiales des paramètres du modèle de TSON. Nous faisons alors 400 initialisations aléatoires pour chaque matériau, et nous notons les paramètres qui reviennent le plus souvent possible. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau de la figure 7.3.

205 MES	Herbe	Bardeau	Tuile	Ardoise1	Ardoise2	Brique1	Brique2	Beton1	Beton2	Beton3	Bois
Sigma	1.510	0.748	0.231	0.480	0.366	0.920	0.340	0.600	0.317	0.516	0.344
Kd	0.968	0.992	0.974	0.981	0.965	0.974	0.975	0.988	0.970	0.995	0.974
Rho	0.040	0.195	0.449	0.040	0.075	0.144	0.075	0.669	0.648	0.768	0.395
18 MES	Herbe	Bardeau	Tuile	Ardoise1	Ardoise2	Brique1	Brique2	Beton1	Beton2	Beton3	Bois
Sigma	1.510	0.705	0.133	0.179	0.169	0.447	0.174	0.522	0.325	0.566	0.309
Kd	0.973	1.009	0.995	0.996	0.992	0.993	0.995	1.009	0.996	0.958	0.956
Rho	0.065	0.221	0.533	0.063	0.131	0.120	0.105	0.704	0.650	0.718	0.310

FIG. 7.3 – Paramètres obtenus pour le modèle de TSON en utilisant les 205 images puis seulement 18 images.

Présentés comme cela, les paramètres peuvent paraître découler simplement de la régression et que seules une ou deux régressions nous invitent à la plus grande des précautions. Mais il n'en est rien, et c'est pourquoi il est important de noter, ce qui est fait dans la figure 7.4, le pourcentage de chances de converger vers la bonne solution (nous appelons bonne solution celle qui apparaît le plus souvent à la suite de la régression).

Herbe	Bardeau	Tuile	Ardoise1	Ardoise2	Brique1	Brique2	Beton1	Beton2	Beton3	Bois
74.00%	97.00%	78.00%	65.00%	61.00%	62.00%	51.00%	85.00%	87.00%	68.00%	86.00%

FIG. 7.4 – Pourcentage de chance de retrouver les paramètres du modèles de TSON avec uniquement nos 18 prises de vue (cf. tableau 7.3).

Nous avons, pour le bardeau, les bétons de type 1 et 2 et le bois plus de 17 chances sur 20 de retomber sur un résultat correct. Ce qui est plus gênant pour l'herbe ou la tuile (seulement 15 chances sur 20) devient très dérangeant pour les deux types d'ardoise, les deux types de brique ou le béton de type 3 puisque, pour la brique de type 2 par exemple, nous n'avons qu'une chance sur deux de retomber sur le même résultat. Néanmoins, ce n'est pas catastrophique. Lorsque nous procédons à toute ces simulations, nous constatons que la plupart des mauvaises solutions sont très éloignées des bons paramètres (paramètres d'albédo et de rugosité négatifs, coefficients de partie diffuses de l'ordre du million ...). Mais une petite partie de ces erreurs est vraiment très proche des paramètres voulus et, en s'autorisant une marge d'erreur sur l'obtention des bons paramètres, nous incluons ces solutions dans notre intervalle permis pour l'obtention d'une bonne solution. La discrimination entre une convergence réussie et une autre qui a échoué est facile car les paramètres obtenus lors d'un

échec sont toujours abérants. En conclusion, ce problème de convergence n'est pas critique puisque, dans tous les cas, nous convergeons majoritairement vers les paramètres ayant un sens physique.

7.2.3 Second problème : des paramètres différents pour le même matériau

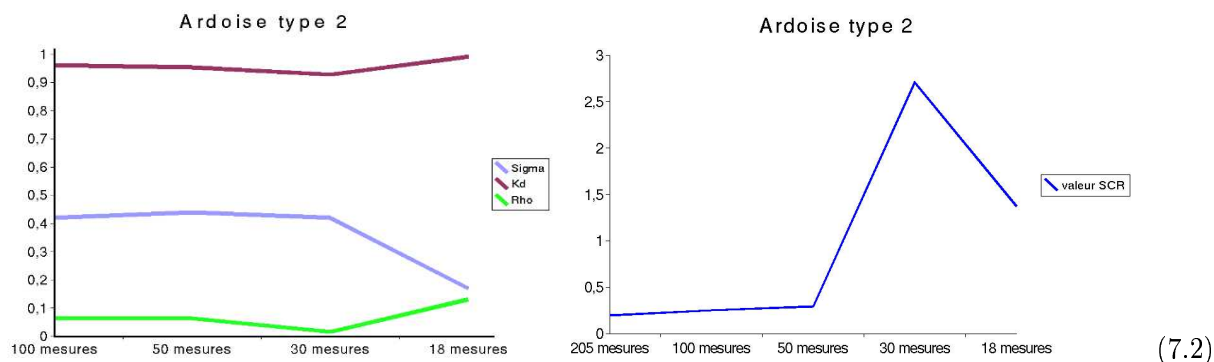
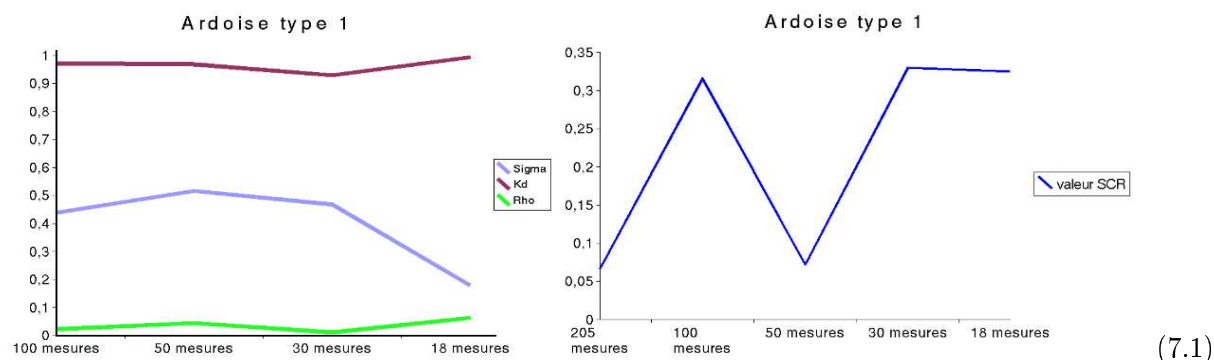
La solution au problème de convergence vers des bons paramètres étant trouvée, il reste cependant une ambiguïté à lever. Certes la régression avec peu de mesures converge souvent vers la bonne solution lorsque nous utilisons du béton, de l'herbe, du bardeau ou du bois. Or ce sont toutes des surfaces diffuses. On pouvait s'y attendre, étant donné qu'elles réémettent la lumière de façon isotrope dans l'espace. Par contre, comment se fait-il que pour les deux types d'ardoise, les deux types de brique 1 et la tuile, les bons paramètres, obtenus avec 18 combinaisons d'angle, diffèrent du double de la valeur qu'ils prenaient lorsque la régression était réalisée avec 205 valeurs ?

En regardant de plus près les différents angles d'observation et d'illumination qu'il nous est permis de tester, nous constatons que 8 sur 18 ont un $\Delta\Phi$ qui vaut 0 ou 180, i.e. que les mesures sont dans le plan principal. De plus, comme les θ_i et les θ_r sont peu différents, la plupart des mesures sont faites dans une direction proche de la direction spéculaire. Ceci expliquerait le fait que si la simulation se fait sur une majorité de directions spéculaires, alors le matériau paraît moins rugueux que si les mesures étaient réparties aléatoirement dans l'espace. Effectivement, les informations sur la BRDF données pour des mesures proches de la direction spéculaire et les autres sont, comme nous le constatons sur la figure 7.5, très différentes et aussi importantes les unes que les autres.

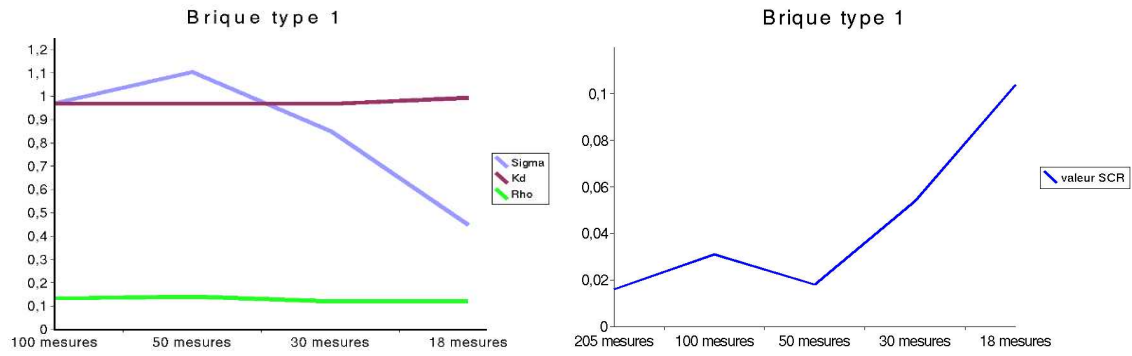


FIG. 7.5 – Photographie d'un champ de soja qui montre l'influence des positions d'observation et d'éclairement sur le rendu d'un matériau. À gauche, le soleil est derrière l'observateur, tandis qu'à droite le soleil est en face de lui.

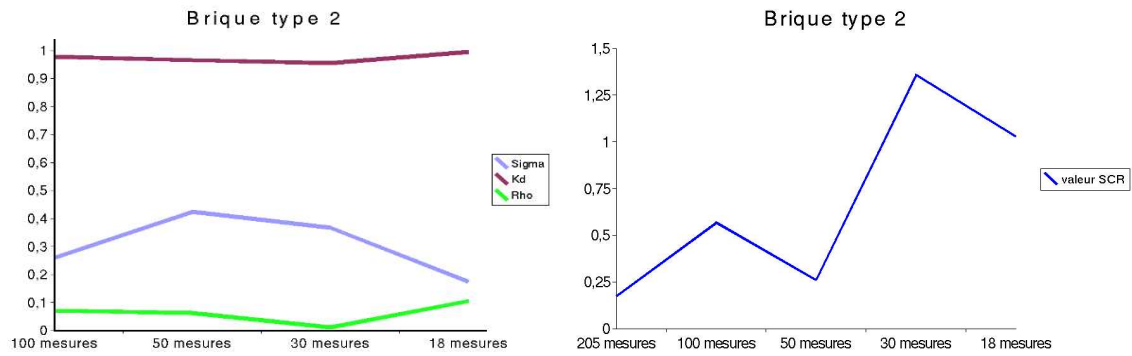
C'est l'importance relative de ces informations que nous proposons de vérifier en faisant la régression sur 100 combinaisons d'angles, puis 50 et enfin 30, chaque série de mesures contenant les 18 mesures de notre problème. Nous présentons les résultats sous forme de graphiques. Pour un matériau donné, le graphique de gauche représente la variation des trois paramètres selon le nombre de mesures utilisées, tandis que sur le graphique de droite est représentée la somme des carrés des résidus entre les valeurs de la base de données et les valeurs de BRDF obtenues par le modèle dont les paramètres sont donnés par la régression sur respectivement 205, 100, 50, 30 et 18 mesures.



Dans le cas de l'ardoise, il est très clair que la réduction du nombre de mesures a considérablement influencé la détermination de mauvais paramètres. En effet, sur ces quatre courbes, on constate que le passage de 30 à 18 mesures entraîne une diminution importante de la valeur de la rugosité (les 2 graphiques de gauche) et que la valeur de la somme des carrés des résidus s'en trouve augmentée (les 2 graphiques de droite). On peut expliquer cette chute de manière logique : comme nous pouvons le constater sur le tableau 7.2 du paragraphe 7.1 , il y a une certaine quantité de mesures qui sont dans le plan principal. Or, la bonne détermination de la BRDF de matériaux spéculaires passe surtout par la modélisation précise du pic de spécularité. Ainsi, si les mesures abondent dans la direction spéculaire, l'importance de ce pic sera surpondérée et la rugosité du matériau sera sous-évaluée.

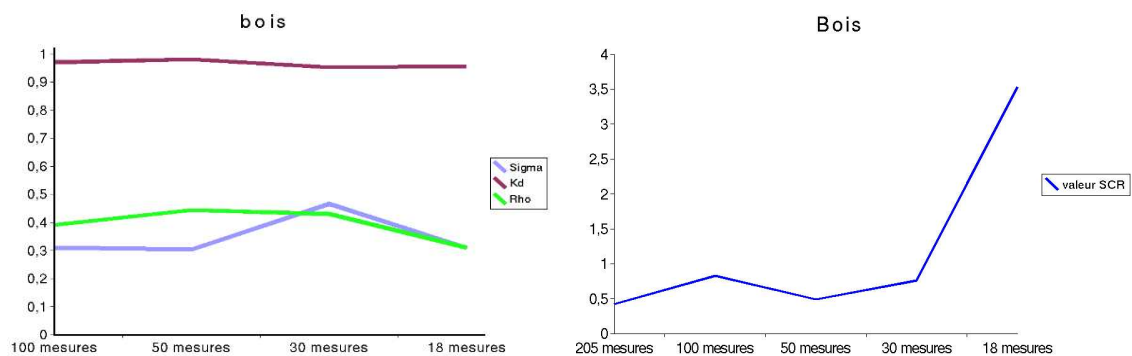


(7.3)

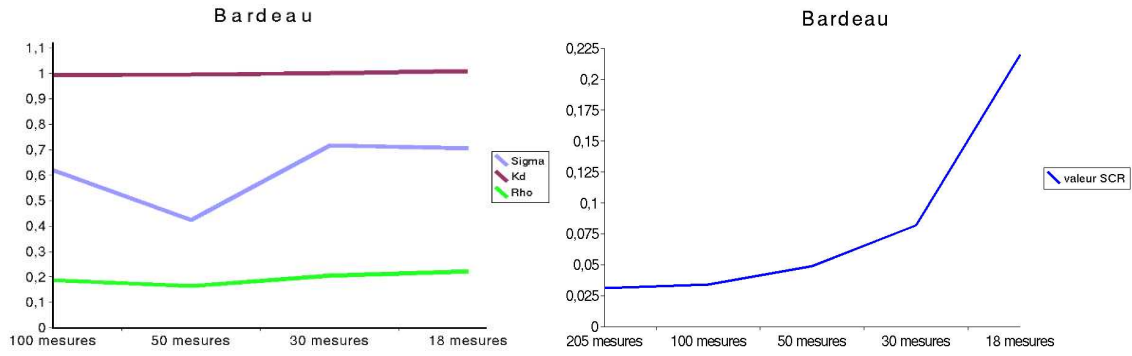


(7.4)

On vient, dans le cas de l'ardoise, de supposer qu'un matériau spéculaire est plus affecté qu'un matériau diffus par la diminution du nombre de mesures, dans notre cas. Cela se vérifie bien car nous constatons, sur les schémas relatifs à la brique de type 2 (le type de brique le plus spéculaire) une chute de la valeur lors du passage de 30 à 18 valeurs, et une augmentation de la valeur de la somme des carrés des résidus. C'est également ce qui se produit avec la brique de type 1, malgré qu'elle ait un caractère moins spéculaire que la brique de type 2.

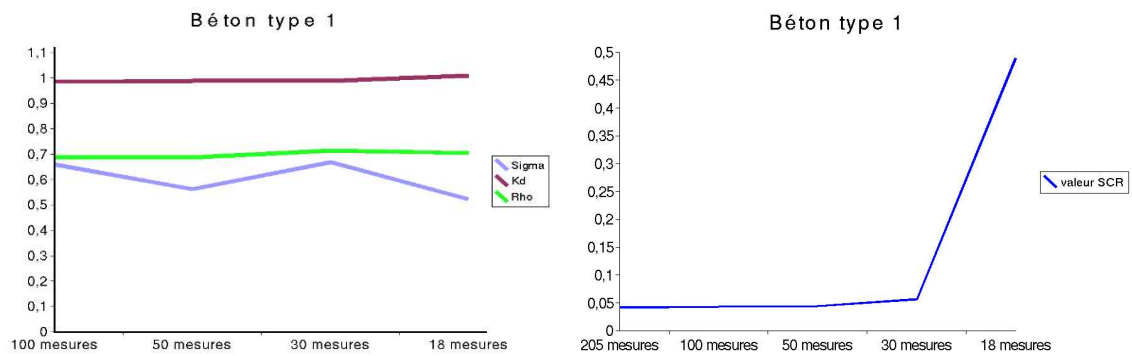


(7.5)

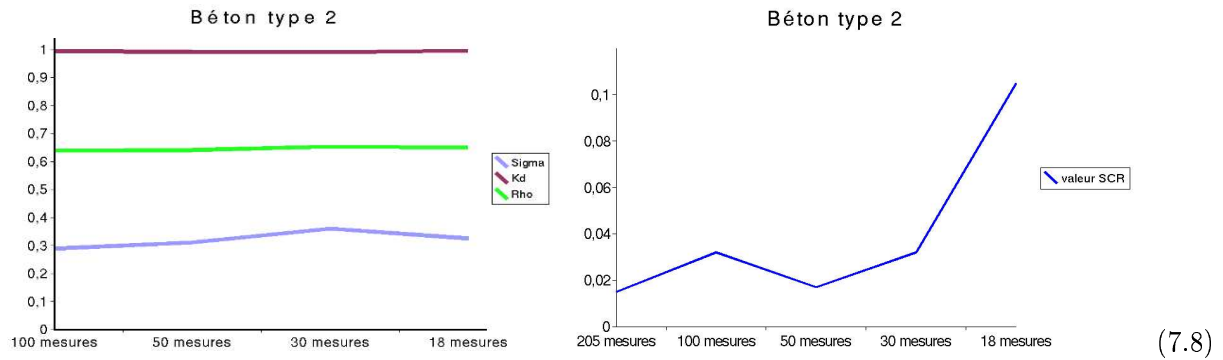


(7.6)

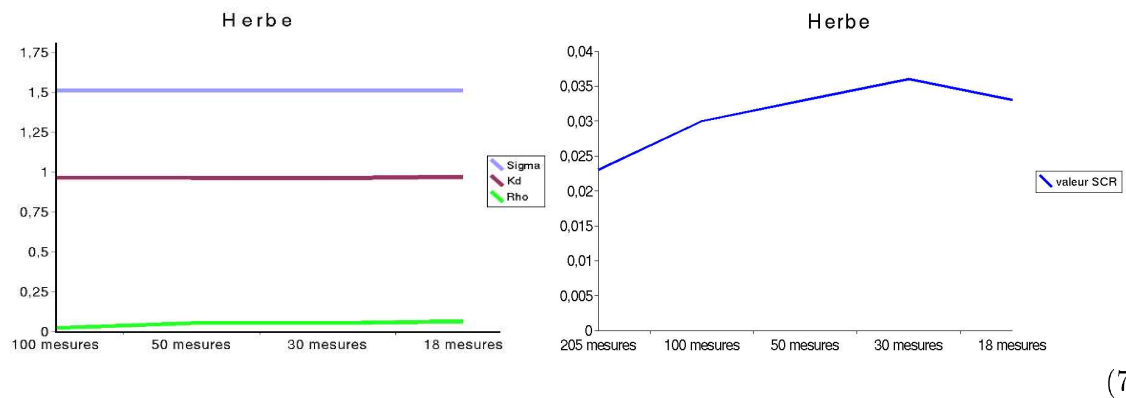
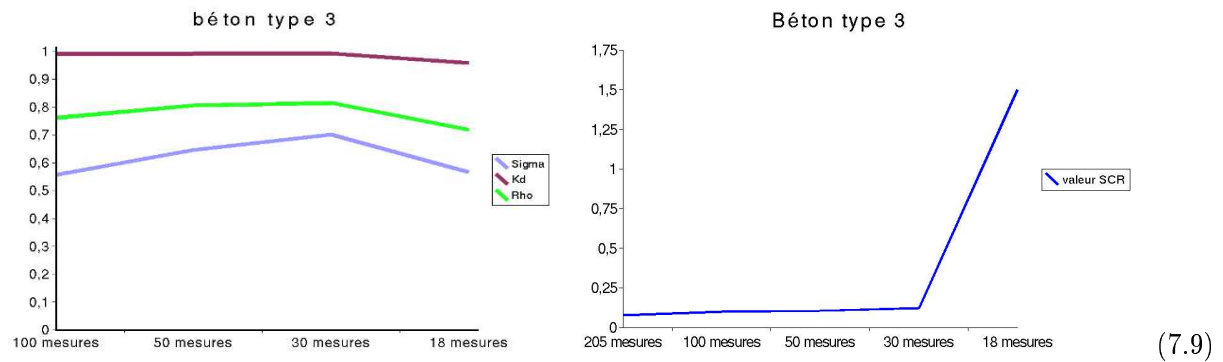
Pour le bois (figure 7.5), nous décelons des variations un peu plus sensibles, mais les erreurs commises sur les différents paramètres sont légères. Les écarts obtenus avec les 30 mesures confirment l'influence du choix des vues : les 12 valeurs supplémentaires ont été choisies de telle façon que les 30 mesures soient equi-réparties sur la demi sphère d'illumination et d'observation. Nous avons donc renforcé le caractère diffus de nos mesures à travers ce choix. Ainsi, pour passer de 50 à 30 mesures, nous avons retiré une majorité de mesures à caractère spéculaire, ce qui a eu pour conséquence de réhausser les valeurs des paramètres de rugosité du modèle de TSON. Le bardeau (figure 7.6) n'a pas, lui non plus, été beaucoup influencé par le changement du nombre de points de vue. En effet, la chute du coefficient de rugosité lors du passage de 100 à 50 mesures peut s'expliquer par l'enlèvement de bon nombre de mesures dans des directions non spéculaires. Mais en moyenne, nous faisons une erreur inférieure à 10% sur la détermination des paramètres du modèle de TSON avec le bardeau.



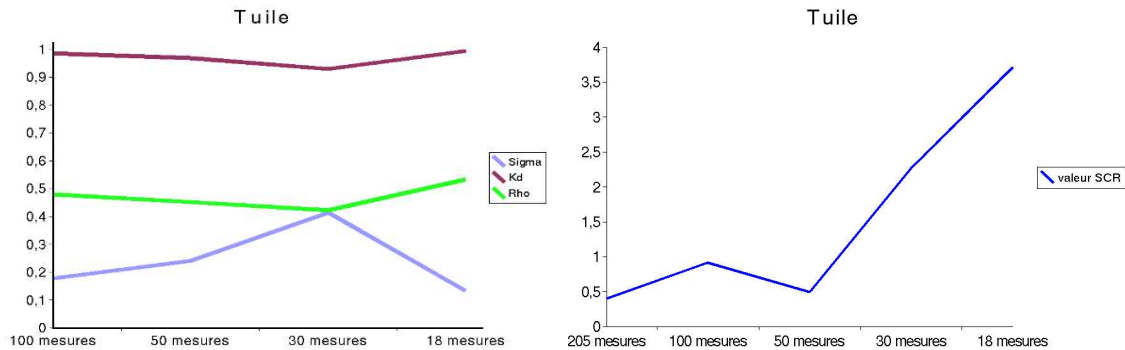
(7.7)



Les trois types de béton (figures 7.7, 7.8, et 7.9) sont passés, eux aussi, par de légères modifications de leurs paramètres avec la réduction du nombre de mesures mais, comme le bardeau, l'erreur commise reste en dessous de 10% des valeurs des bons paramètres.



Avec les remarques faites précédemment, nous nous serions doutés que l'herbe, qui est le plus diffus de tous nos échantillons, serait le matériau le moins touché par la réduction du nombre de mesures. C'est effectivement ce que met parfaitement en lumière les graphiques de la figure 7.10.



(7.11)

Et complètement à l'opposé de l'herbe, c'est la tuile qui se trouve être le matériau au caractère le plus spéculaire de l'étude. Comme le prévoient nos suppositions, la valeur de son coefficient de rugosité est sujet à une forte diminution, alors que sa somme des carrés des résidus, elle, augmente de façon notable.

Les deux types de graphique que nous avons tracé nous apprennent beaucoup de choses sur les mesures dont nous disposons. La réduction du nombre de mesures de 205 à 18 entraîne des fortes modifications des paramètres des matériaux les plus spéculaires (graphiques de gauche), mais le calcul de la somme des carrés des résidus pour chaque changement du nombre de prises de vue permet de quantifier cet écart. On s'aperçoit alors que pour l'ardoise de type 1 le modèle est 7 fois moins bon, le record étant à mettre à l'actif du béton de type 3 dont la somme des carrés des résidus avec 18 mesures est près de vingt fois supérieure à celle obtenue pour la régression sur 205 valeurs. La variation la plus faible de la somme des carrés des résidus apparaît pour l'herbe, l'échantillon le moins spéculaire de toute la base de données. Ces variations nous incitent à être méfiant vis à vis des mesures dont nous disposons, car leur répartition risque de totalement fausser la détermination du matériau lors du passage sur une image réelle. En conclusion, la détermination des paramètres, pour les matériaux présentant un caractère spéculaire non négligeable, dépendra probablement des prises de vue disponibles. C'est donc dans le dernier chapitre, où nous allons tester notre modèle sur des images réelles, que nous pourrions conclure quant à l'efficacité de notre modèle lors de situations de prises de vues réelles.

Quatrième partie

Essais du modèle de TSON sur des images à haute résolution

Chapitre 8

Présentation des outils

8.1 Introduction

Dans les deux parties précédentes, nous avons eu l'occasion de choisir, parmi plusieurs, un modèle qui nous semblait adapté à l'étude en milieu urbain. Afin de tester sa validité et ses compétences, nous lui avons fait subir toutes sortes de tests, qui ne permettent pas de conclure quant à l'efficacité du modèle pour atteindre notre but ultime. Pour cela, il nous faut tester le modèle sur des conditions réelles de prise de vue, afin de savoir quel est son véritable comportement lorsque qu'il n'y a que quelques mesures mieux réparties.

8.2 Les images réelles

Nous avons à notre disposition des images prises par la caméra numérique de l'IGN. Il y a deux types d'image puisque nous possédons un jeu d'images dont le pixel vaut approximativement 25 cm (cf. figure 8.1), et un autre jeu sur lequel le pixel vaut, à peu près, 50 cm. Ces images sont visualisables grâce à un programme développé au MATIS, qui permet, entre autres fonctions, de zoomer sur n'importe quelle partie de l'image, de "croper" (extraire) une partie de l'image, et même de créer un profil, i.e. de tracer la valeur des pixels selon l'axe z en fonction d'un chemin sur le plan (X,Y) . Les images dont nous disposons vont nous permettre de sélectionner le matériau que nous souhaitons, la résolution des images nous permettant de reconnaître le type de matériau présent sur une région de l'image. Cependant, nous ne désirons utiliser que certaines parties du toit donc il faut un stratagème pour ne choisir que les parties intéressantes.

8.3 Les scènes en 3D

C'est grâce à des scènes en trois dimensions des bâtiments d'Amiens que nous allons pallier à ce problème. Des relevés de coordonnées des bâtiments (tous les détails des façades, des toits...) ont été réalisés par des opérateurs il y a plusieurs années. Ces relevés constituent une base de données (base de données TRAPU) de référence pour chaque bâtiment de la ville et renseigne de façon précise sur l'inclinaison des toits, ou la position exacte de la construction. Et comme nous disposons de tous les détails d'un bâtiment, il est alors facile de créer une scène en 3D du bâtiment en question (cf. figure

8.2). Ainsi, par un programme adapté, on peut donner un numéro à chaque facette composant notre bâtiment, ce qui nous permettra, en s'aidant de l'image réelle, de ne choisir que les parties du toit qui nous intéressent. Malheureusement, devant le coût d'un tel travail (relevé des moindres détails d'une façade par un opérateur), la base de données TRAPU est incomplète, ce qui restreint notre champ d'étude sur la ville d'Amiens.

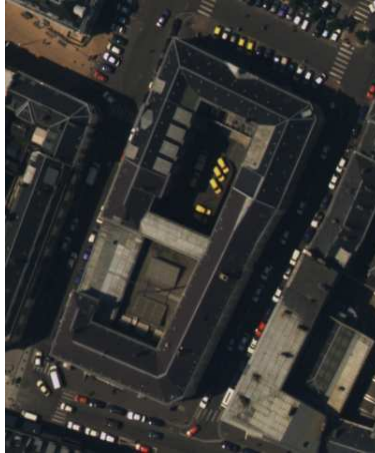


FIG. 8.1 – Extrait d'une photo aérienne à haute résolution (pixel=20cm) de la ville d'Amiens

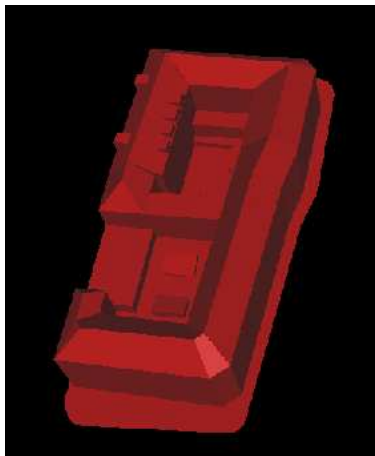


FIG. 8.2 – Scène 3D du bâtiment présent sur la figure 8.1

Chapitre 9

Test du modèle sur les images réelles

9.1 Déroulement du test

Nous disposons, à cet instant, d'images à haute résolution et de scènes en 3 dimensions de certains bâtiments. Mais comment va-t-on procéder réellement pour tester notre modèle sur ces images ? Le déroulement se fait en plusieurs étapes.

Il nous faut, en premier lieu, choisir les bâtiment qui nous intéressent. Cela va se faire en retenant le numéro de la facette sur le modèle 3D qui correspond à la région voulue sur l'image réelle. Comme ces facettes sont bien répertoriées, on connaît leur inclinaison, donc la position du soleil et du capteur au moment où elles ont été prises en photo.

L'étude que nous réalisons est un travail préliminaire sensé être intégré dans un modèle radiométrique plus complet. Par simplicité, on va s'affranchir de certains effets très présents en milieu urbain, comme, entre autres, les phénomènes d'ombrage d'une construction par une autre, ou de rétro-réflexion. Ainsi, pour notre étude, on va sélectionner les surfaces dont l'éclairement est le plus direct possible, c'est à dire les toits. Les pans des toits sont effectivement les rares surfaces à être éclairées par la lumière directe (seulement la lumière solaire), ce qui nous permet de négliger, à l'ordre 0, l'éclairement dû à la diffusion de l'atmosphère. Dans ces conditions, on a :

$$L_{pixel} + L_{atm} = E_{soleil} * \frac{\rho}{\pi} \quad (9.1)$$

Alors, en connaissant l'éclairement du soleil, la valeur du pixel et la contribution de l'atmosphère à l'éclairement de l'image, on peut en déduire ρ .

1. La contribution de l'atmosphère

Notre étude étant un travail préparatoire, on a donc décidé de s'affranchir des effets de l'atmosphère. Pour cela, on sélectionne une photo sur laquelle se trouve un plan d'eau, qui peut être assimilé à un miroir lorsqu'il n'est pas perturbé. Ainsi, il ne renvoie de la lumière que dans la direction spéculaire. Si on choisit un endroit où le plan d'eau est à l'ombre, alors la valeur du pixel en ce point sera uniquement dû à l'éclairement par l'atmosphère si nous ne sommes pas

dans la direction spéculaire. Finalement, en déduisant la valeur de ce pixel à toute l'image, on se place dans l'approximation d'un éclairage direct.

2. La valeur du pixel

Le renseignement manquant se trouve être la valeur du pixel de la facette. C'est un problème car certains détails présents sur les toits n'ont pas été relevés par les opérateurs chargés de réaliser la base de données TRAPU comme les lucarnes ou les cheminées. Mais il y a aussi l'ancienneté des toits qui rend sa couleur non homogène et, toutes ces particularités mises ensemble font qu'à une même facette de toit correspond énormément de pixels de valeurs différentes. Ainsi, nous devons trouver une manière de donner à une région choisie, une unique valeur de pixel. Ce pixel sera le pixel médian de la région sélectionnée. Il est choisi de telle façon que si on relève la valeur de tous les pixels de la région choisie, il y aura autant de pixels ayant une valeur supérieure à celle du pixel médian qu'inférieure. Cela revient à séparer en deux aires égales la surface sous la courbe lorsque l'on trace l'histogramme de la répartition du nombre de pixels en fonction de leur valeur, comme le montre la figure 9.1, ce qui permet ainsi de filtrer le bruit dans la région.

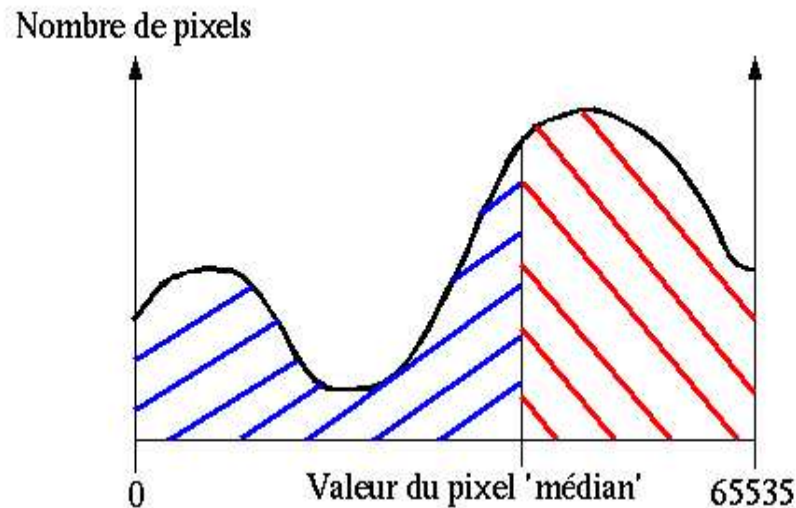


FIG. 9.1 – Détermination du pixel médian dans le cas d'une image codée sur 16 bits. Les aires hachurées de part et d'autre du pixel médian sont égales.

3. L'éclairage du soleil

Nous sommes maintenant presque en possession de tous les renseignements nécessaires pour effectuer une régression non-linéaire sur un matériau réel. Nous disposons des mesures d'angle d'observation et d'illumination et d'une valeur en pixels de la région. Et c'est en ce sens qu'il nous manque un petit détail. Pour faire notre régression, nous avons besoin de la BRDF de la surface choisie, et non pas de la valeur en pixels de cette surface. Il faut donc trouver une relation entre la valeur en pixels du matériau et sa valeur radiométrique, i.e. la quantité de

lumière arrivant réellement sur le capteur de la caméra. Or, nous ne disposons pas actuellement de cette valeur de conversion **valeur-en-pixels/valeur-de-BRDF**, donc nous allons ruser et choisir une constante à la place. Cette constante sera choisie de telle manière à ramener la valeur en pixels à une valeur de BRDF inférieure à 2, pour éviter les problèmes de convergence lors des régressions futures.

9.2 Simulations sur les images haute résolution

9.2.1 Présentation des scènes choisies

Nous parcourons donc visuellement la ville d'Amiens et nous choisissons les pans de toit des bâtiments que nous voyons. Comme il y a plus d'une centaine de bâtiments répertoriés, nous utilisons une "carte parallèle" qui est en fait une photo d'Amiens où on ne distingue que la forme des bâtiments. En plaçant la souris sur un de ces bâtiments, on obtient un numéro correspondant à la scène 3D de cette construction. Puis, comme nous l'avons dit précédemment, une fois que l'on a sélectionné le pan de toit voulu sur l'image réelle, on note le numéro correspondant sur l'image 3D. Nous présentons, à travers les images qui suivent, les régions de toits qui nous semblent les plus intéressantes.

La ville d'Amiens est surtout faite de maisons aux toits d'ardoise. Il nous semble donc intéressant de choisir plusieurs types de toits en ardoise, afin de voir comment le modèle se comporte. Mais, il existe d'autres types de matériaux qui constituent les toits d'autres bâtiments de la ville. Par exemple, on remarque quelques toits en tuile orange, quelques constructions entièrement faites de béton, des toits de tôle ondulée ou encore des abris recouverts par des surfaces de plastique ondulé. Toutes les surfaces que nous utilisons sont répertoriées dans le TRAPU, sans quoi on ne pourrait pas les utiliser. Et dans cette base de donnée, on a la chance d'avoir comme surface, non pas un toit, mais le parvis d'Amiens, fait entièrement en grès. Il va être intéressant de savoir si le modèle va réussir, ou non, à trouver les caractéristiques relatives à une telle surface.

Dans les pages qui suivent, nous allons donc présenter toutes les surfaces que nous avons choisies pour tester notre modèle. Ainsi, comme précédemment, nous allons disposer d'échantillons de matériau, mais à la différence des mesures des autres parties les matériaux sont réels, et les prises de vue sont faites en extérieur à environ deux milles mètres de l'échantillon. Nous allons sélectionner des échantillons disponibles sous environ 10 prises de vue différentes, puis les intégrer dans le modèle de TSON. Le même algorithme de Levenberg-Marquardt que celui utilisé précédemment nous permet alors d'obtenir les paramètres relatifs à la surface étudiée. Nous allons, dans le paragraphe qui suit, présenter les facettes de toit sur lesquelles nous avons choisi de tester le modèle. En dessous de chaque figure est présenté le bâtiment de manière brève, ainsi que les paramètres les plus récurrents obtenus lorsqu'on fait une centaine d'initialisations aléatoires du modèle de TSON.



FIG. 9.2 – Les figures sont des photos à haute résolution de pans d'ardoise.

$$\begin{cases} \sigma = 0.226, & k_d = 0.874, & \rho = 0.794 & \text{pour la facette 23,} \\ \sigma = 0.206, & k_d = 0.905, & \rho = 0.696 & \text{pour la facette 152.} \end{cases}$$



FIG. 9.3 – Les 4 facettes présentes sur ces images sont des parties de toit en ardoise. Comme les précédentes, elles sont orientées en direction du soleil.

$$\begin{cases} \sigma = 0.212, & k_d = 0.890, & \rho = 0.811 & \text{pour la facette 0,} \\ \sigma = 0.209, & k_d = 0.896, & \rho = 0.771 & \text{pour la facette 8,} \\ \sigma = 0.184, & k_d = 0.899, & \rho = 0.608 & \text{pour la facette 11,} \\ \sigma = 0.173, & k_d = 0.901, & \rho = 0.774 & \text{pour la facette 47.} \end{cases}$$



FIG. 9.4 – Les 2 figures sont encore des pans de toit en ardoise.

$$\begin{cases} \sigma = 0.165, & k_d = 0.913, & \rho = 0.639 & \text{pour la facette 12,} \\ \sigma = 0.190, & k_d = 0.929, & \rho = 0.554 & \text{pour la facette 20,} \\ \sigma = 0.200, & k_d = 0.889, & \rho = 0.540 & \text{pour la facette 116.} \end{cases}$$



FIG. 9.5 – Ces sont les dernières images que nous avons choisi qui représentent des toits en ardoise. A chaque pan correspond un type d'ardoise particulier.

$$\begin{cases} \sigma = 0.207, & k_d = 0.877, & \rho = 0.781 & \text{pour la facette 16,} \\ \sigma = 0.209, & k_d = 0.862, & \rho = 0.958 & \text{pour la facette 24,} \\ \sigma = 0.170, & k_d = 0.931, & \rho = 0.856 & \text{pour la facette 37,} \\ \sigma = 0.187, & k_d = 0.918, & \rho = 0.669 & \text{pour la facette 60,} \\ \sigma = 0.170, & k_d = 0.931, & \rho = 0.856 & \text{pour la facette 87,} \\ \sigma = 0.186, & k_d = 0.916, & \rho = 0.564 & \text{pour la facette 95,} \\ \sigma = 0.246, & k_d = 0.886, & \rho = 0.844 & \text{pour la facette 97,} \\ \sigma = 0.170, & k_d = 0.915, & \rho = 0.686 & \text{pour la facette 121.} \end{cases}$$



FIG. 9.6 – Les 3 bâtiments sélectionnés ont un toit dont la texture est du béton. Les deux béton des toits de la figure de gauche semblent d'ailleurs être identiques.

$$\left\{ \begin{array}{llll} \sigma = 0.560, & k_d = 1.069, & \rho = 0.386 & \text{pour la facette 0,} \\ \sigma = 0.660, & k_d = 1.084, & \rho = 0.487 & \text{pour la facette 6,} \\ \sigma = 0.654, & k_d = 1.095, & \rho = 0.535 & \text{pour la facette 18,} \\ \sigma = 0.634, & k_d = 1.133, & \rho = 0.475 & \text{pour la facette 22,} \\ \sigma = 0.682, & k_d = 1.159, & \rho = 0.481 & \text{pour la facette 28.} \end{array} \right.$$



FIG. 9.7 – Les bâtiment présents sur ces figures possèdent tous les deux un toit en tuile orange. Ils sont tous en bon état et leur éclairage n'est pas gêné par un autre bâtiment.

$$\left\{ \begin{array}{llll} \sigma = 0.250, & k_d = 0.996, & \rho = 0.237 & \text{pour la facette 0,} \\ \sigma = 0.470, & k_d = 1.002, & \rho = 0.337 & \text{pour la facette 17,} \\ \sigma = 0.255, & k_d = 0.992, & \rho = 0.273 & \text{pour la facette 37,} \\ \sigma = 0.831, & k_d = 1.088, & \rho = 0.426 & \text{pour la facette 149,} \end{array} \right.$$

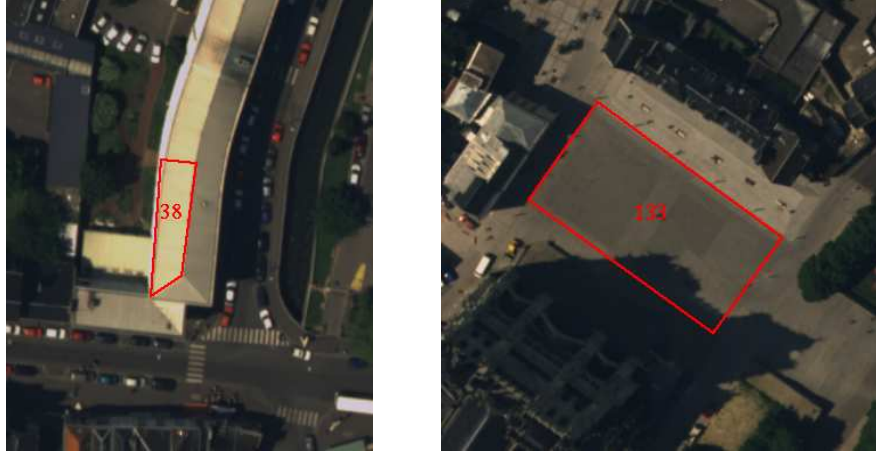


FIG. 9.8 – Sur la figure de gauche, nous avons un bâtiment recouvert d'un toit qui paraît en métal de couleur beige, tandis qu'à droite c'est le parvis de la cathédrale d'Amiens qui est fait de grès.

$$\begin{cases} \sigma = 0.567, & k_d = 0.944, & \rho = 0.561 & \text{pour la facette 38.} \\ \sigma = 0.639, & k_d = 0.921, & \rho = 0.119 & \text{pour la facette 133.} \end{cases}$$



FIG. 9.9 – La figure de gauche est un bâtiment dont le toit est en tôle ondulée, alors que celui qui est présent sur la figure de droite est probablement en goudron.

$$\begin{cases} \sigma = 0.674, & k_d = 1.158, & \rho = 0.403 & \text{pour la facette 12,} \\ \sigma = 0.650, & k_d = 1.131, & \rho = 0.378 & \text{pour la facette 13,} \\ \sigma = 0.765, & k_d = 1.130, & \rho = 0.359 & \text{pour la facette 17.} \end{cases}$$

9.2.2 Discussion autour des résultats obtenus

La première remarque que nous pouvons faire est que, en général, les convergences sur les bâtiments urbains que nous avons sélectionnés ont bien fonctionné, puisque les paramètres obtenus ont

des valeurs physiques. Tout d'abord, σ est bien inférieur à 1.5, et même si quelques unes des valeurs k_d sont supérieures à 1, cela n'influe pas sur la forme de la BRDF (par rapport à $k_d = 1.0$) donc on peut considérer que le résultat est physique. Quant au paramètre ρ , sa valeur permet juste une comparaison entre matériaux d'un même genre. En effet, comme nous ne disposons pas de la valeur de conversion **valeur en pixels/valeur de la BRDF**, on s'est arrangé pour obtenir une convergence donnant $\rho < 1.0$. Or cette constante, qui valait 40000 lors de la régression sur les ardoise, entraînait la divergence de l'algorithme avec les autres matériaux. Ainsi, on a choisi de prendre 300000 comme valeur de cette constante sur tous les matériaux n'étant pas de l'ardoise. Nous allons regarder d'un peu plus près les résultats obtenus, matériaux par matériaux.

1. Les matériaux en ardoise

Nous avons réalisé des simulations sur 17 facettes en ardoise. Les résultats obtenus sont très encourageant puisque toute les régressions convergent vers des paramètres physiques. De plus, ces paramètres ne sont pas dispersés, puisque

$$\begin{cases} 0.163 < \sigma < 0.246 \\ 0.862 < k_d < 0.937 \\ 0.540 < \rho < 0.994 \end{cases}$$

C'est donc un résultat intéressant les différences de qualité d'ardoise n'entraînent qu'un faible changement de la rugosité. De plus, sur la troisième figure, les deux pans de toit semblent être de même qualité et orientés identiquement, et la convergence donne des paramètres très proches pour chacune des facettes.

2. Les matériaux en tuile orange

On ne dispose pas d'énormément de toit en tuile orange, mais les deux bâtiment sélectionnés ont l'avantage d'être de bonne qualité. La première surprise vient du fait que, pour le bâtiment où on a sélectionné trois facettes, les deux facettes orientés de la même manière ont les mêmes paramètres, ce qui laisse penser que c'est le même matériau qui constitue ces pans de toit. La seconde surprise est que, dans la base de données du Curet, le paramètre de rugosité de la tuile à comme valeur 0.230, ce qui est proche de la rugosité obtenue pour deux de nos facettes. Mais la déception vient du fait que la dispersion entre les types de tuile est grande, σ variant de 0.25 à 0.831. Ceci permettrait néanmoins de faire la distinction entre la tuile et l'ardoise, puisque la valeur maximum du paramètre de rugosité de l'ardoise est 0.246.

3. Les matériaux en béton

Les paramètres obtenus lors de la régression sur des toits en béton sont aussi encourageants que ceux obtenus avec des toits en ardoise. On a, en même temps, des paramètres physiques et surtout peu dispersés. En effet,

$$\begin{cases} 0.560 < \sigma < 0.682 \\ 1.069 < k_d < 1.159 \\ 0.386 < \rho < 0.535 \end{cases}$$

De plus, les valeurs obtenues pour le paramètre de rugosité sont celles d'un matériau assez diffus, ce qui peut correspondre à la texture du béton.

4. Les autres matériaux

Les autres matériaux ont été choisis car leur exposition au soleil n'était pas gênée et les facettes étaient de bonne qualité. Le problème est que les matériaux sélectionnés ne sont présents que sur une facette (deux maximum), et donc que la comparaison entre deux facettes d'un même matériau est impossible. On se contentera donc de comparer aux autres matériaux pour voir si les résultats obtenus sont cohérents. Par exemple, les deux pans de toit en tôle ondulée ont des paramètres semblables, et celui en goudron a une valeur de rugosité assez forte, ce qui semble cohérent. Enfin, les régressions convergent avec le toit en métal blanc et le parvis de la cathédrale, mais le manque de facettes étant constituées de ces matériaux nous empêche de conclure sur les résultats obtenus.

Les résultats de la simulation sur les images réelles sont très encourageants car ils montrent un bon fonctionnement du modèle choisi. Mais, malgré la faible dispersion des paramètres obtenus avec les facettes en béton et celles en ardoise, des problèmes subsistent avec d'autres matériaux, notamment la tuile. Car bien que les paramètres soient physiques, l'écart entre les valeurs des paramètres de rugosité montre un dysfonctionnement. Ceci est peut-être dû au fait que l'on a pas tenu compte des éclaircissements indirects qui arrivent sur les facettes, même si nous avons pris des précautions. Cela est possiblement dû également au nombre de vues d'un même bâtiment, insuffisant pour permettre à l'algorithme de converger vers des paramètres intéressants.

Cinquième partie

Conclusions générales

Le travail qui m'a été proposé il y a six mois consistait en une étude de modèles de BRDF. Cette fonction, qui caractérise la réflexion de la lumière sur une surface, apparaissait comme essentiel dans la résolution de ce problème. Or, la modélisation de la BRDF existe sous de nombreuses formes (dépendantes des conditions d'utilisation) et c'est pourquoi, un état de l'art fut nécessaire pour sélectionner les modèles utilisables en milieu urbain. Le résultat de cette recherche a débouché sur la sélection de 10 modèles, qu'il a fallu tester. Pour cela, on disposait d'une base de données de valeurs de BRDF mesurées en laboratoire et, en calculant les valeurs de BRDF du modèle pour les mêmes angles d'illumination et d'observation que la base de données, on a pu établir, grâce à un algorithme de régression non-linéaire, quel modèle se rapprochait le plus des mesures expérimentales.

De cette simulation découlait le choix d'un modèle meilleur que les autres : le modèle de Torrance-Sparrow-Oren-Nayar. Cependant, le test précédent avait été réalisé sur plus de 200 valeurs de BRDF, alors que la réalité ne permet qu'une dizaine de prises de vue différentes d'un même site. L'étape suivante fut donc d'analyser les capacités d'interpolation du modèle en réduisant le nombre de mesures lors de la régression. Un problème apparut, car la restriction des mesures aux conditions réelles de vol (soleil pas trop bas et angle de la caméra limité) a fait apparaître que les mesures disponibles étaient, pour 10 sur 18, dans le plan principal. Ce qui a eu pour conséquence de fausser le résultat pour les matériaux au caractère spéculaire. Il nous fallait donc nous placer dans les conditions d'une mission réelle afin de connaître le comportement du modèle dans ce cas.

Ainsi, disposant d'images à haute résolution, nous avons sélectionnés des pans de toits afin de tester notre modèle dans des conditions réelles. Comme c'est un travail préliminaire, nous n'avons considéré que l'éclairement direct (venant seulement du soleil), ce qui nous a contraint à ne choisir que des pans de toits. Ainsi, nous avons pu tester notre modèle sur de l'ardoise, du béton ou encore de la tuile orange. Les paramètres obtenus ont été, dans l'ensemble, bons, puisque physiques et peu dispersés pour un même matériau.

En résumé, ce qui a été réalisé constitue un travail préparatoire intéressant, et certains des résultats obtenus sont encourageants, car ils laissent supposer qu'une reconnaissance de matériaux est possible sur une image à haute résolution. Cependant, il y a encore quelques erreurs de convergence. Elles peuvent être dues au faible nombre de facettes, auquel cas on peut envisager de réaliser les simulations soit sur plusieurs facettes d'un même bâtiment (mais on a vu qu'elles n'étaient pas faites forcément avec un matériau identique), soit sur des images à moins haute résolution (un pixel de 50 cm), ce qui permettrait d'avoir une quarantaine de vues différentes d'un même bâtiment. Si la divergence du programme est due aux approximations d'illumination directe des constructions, alors un travail reste à effectuer en intégrant les phénomènes d'illuminations indirectes sur les bâtiments, c'est à dire en tenant compte, d'une part, de la réflexion de la lumière sur les autres bâtiments, et d'autre part, de la diffusion de la lumière dans l'atmosphère.

Le stage que j'ai réalisé au laboratoire MATIS a été pour moi l'occasion de découvrir le domaine du traitement de l'image, et ses applications au sein de l'IGN, comme la modélisation radiométrique ou la reconstitution de bâtiment en 3 dimensions. Grâce à la disponibilité et à la gentillesse des chercheurs du laboratoire, j'ai beaucoup appris sur le travail d'ingénieur de recherche, mais surtout j'ai acquis énormément de connaissances en programmation (en informatique en général), ce qui, j'en suis sûr, me sera profitable quelque soit mon orientation future. Ce stage fut pour moi très enrichissant et très agréable, et j'espère, plus tard, avoir la chance de travailler avec des gens aussi compétents et créatifs.

Bibliographie

- [brd, 1997] (1997). brdfview. <http://www.cs.cmu.edu/~ph/src/illum/>, logiciel de visualisation de la BRDF.
- [Beard and Maxwell, 1973] Beard, J. and Maxwell, J. (1973). Bidirectional reflectance model validation and utilization. Technical report, Number AFAL-TR-73-303.
- [Cabot, 1995] Cabot, F. (1995). *Estimation de l'albedo de surface à l'échelle globale, à l'aide de mesures satellitaires*. PhD thesis, Université d'Orsay-Paris Sud. <http://www.ird.fr/hapex/thesis/cabot/cover.frame.html>.
- [Cook and Torrance, 1981] Cook, R. and Torrance, K. (1981). A reflectance model for computer graphics. *Computer Graphics (SIGGRAPH '81 Proceedings)*, 15(4) :307–316.
- [Deering et al., 1990] Deering, D., Eck, T., and Otterman, J. (1990). Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization. *Agric. Forest Meteorol.*, 52 :71–93.
- [Dymond and Qi, 1997] Dymond, J. and Qi, J. (1997). Reflection of visible light from a dense vegetation canopy—a physical model. *Agric. Forest Meteorol.*
- [Hanrahan and Krueger, 1993] Hanrahan, P. and Krueger, W. (1993). Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In Kajiya, I. J. T., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 165–174.
- [Hapke, 1981] Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectrometry, part 1 : Theory. *J. Geophys. Res.*, 86(B4) :3039–3054.
- [He et al., 1991] He, X., Torrance, K., Sillion, F., and Greenberg, D. (1991). A comprehensive physical model for light reflection. *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, 25(4) :187–196.
- [Jupp, 1998] Jupp, D. (1998). A compendium of kernel and other (semi-)empirical BRDF model. Technical report, Office of Space Science Applications Earth Observation Centre. www.cossa.csiro.au/tasks/brdf/k_summ.pdf.
- [Koenderink et al., 1996] Koenderink, J., Dana, K., Nayar, S., and van Ginneken, B. (1996). Reflectance and texture of real-world surfaces. Technical Report CUCS-046-96, Columbia University. www.cs.columbia.edu/CAVE/curet.
- [Lafortune et al., 1997] Lafortune, E., Foo, S., Torrance, K., and Greenberg, D. (August 1997). Non linear approximation of reflectance function. In *SIGGRAPH'97 Conference Proceedings*, pages 117–126.

- [Lambert, 1760] Lambert, J. (1760). *Photometria sive de mensura de gratibus luminis,colorum umbrae*. Eberhard Klett.
- [Li and Strahler, 1992] Li, X. and Strahler, A. (1992). Geometrical-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy : Effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 30 :276–292.
- [Liang and Strahler, 1994] Liang, S. and Strahler, A. (1994). Retrival of surface BRDF from multi-angle remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 50 :18–30.
- [Meister et al., 1996] Meister, G., Wiemker, R., Bienlein, J., and Spitzer, H. (1996). In situ measurements of selected surface materials to improve analysis of remotely sensed multispectral imagery. *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXI(B).
- [Minnaert, 1941] Minnaert, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *Asrophys. J.*, 93 :403–410.
- [Oren and Nayar, 1993] Oren, M. and Nayar, S. (June 1993). Diffuse reflectance from rough surfaces. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- [Phong, 1975] Phong, B. (1975). Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6) :311–317.
- [Pickup et al., 1995] Pickup, G., Chewings, G., and Pearce, G. (1995). Procedures for correcting high resolution airborne video imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 16(9) :1647–1662.
- [Poulin and Fournier, 1990] Poulin, P. and Fournier, A. (1990). A model for anisotropic reflection. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)*, volume 24, pages 273–282.
- [Press et al., 1995] Press, W., Vetterling, W., Teukolsky, S., and Flannery, B. (1995). *Numerical Recipes in C, The art of scientific computing*. Cambridge University Press, 2nd ed.
- [Rahman et al., 1993a] Rahman, H., Pinty, B., and Verstraete, M. (1993a). Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model, part1 : Model description and inversion on synthetic data. *J. Geophys. Res*, 98(D11) :20779–20789.
- [Rahman et al., 1993b] Rahman, H., Pinty, B., and Verstraete, M. (1993b). Coupled surface-atmosphere reflectance(CSAR)model, part2 : Semi-empirical surface model usable with NOAA advances very high resolution radiometer data. *J. Geophys. Res*, 98(D11) :20791–20801.
- [Ross, 1981] Ross, J. (1981). *The radiation regime and architecture of plants stands*. Dr W. Junk Publishers.
- [Roujean et al., 1992] Roujean, J., Leroy, M., and Deschamps, P. (1992). A bidirectional reflectance model of the earth’s surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Res*, 97(20) :455–20,468.
- [Schlick, 1994] Schlick, C. (1994). An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. *Computer Graphics Forum*, 3 :233–246.
- [Shibamaya and Wiegand, 1985] Shibamaya, M. and Wiegand, C. (1985). View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. *Remote Sens. Envir.*, 18 :91–103.
- [Snyder and Wan, 1998] Snyder, W. and Wan, Z. (1998). BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1).

- [Staylor and Suttles, 1986] Staylor, W. and Suttles, J. (1986). Reflection and emission models for deserts derived from Nimbus-7 ERB scanner measurements. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25 :196–202.
- [Strahler and Jupp, 1991] Strahler, A. and Jupp, D. (1991). Modeling of bidirectional reflectance of forests and woodlands using boolean models and geometric optics. *Remote Sensing of Environment*, 34 :153–166.
- [Torrance and Sparrow, 1967] Torrance, K. and Sparrow, E. (1967). Theory for off-specular reflection from rough surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57(9) :1105–1114.
- [Verstraete et al., 1990] Verstraete, M., Pinty, B., and Dickinson, R. (1990). A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. *J. Geophys. Res.*, 95 :11755–11765.
- [Walthall et al., 1985] Walthall, C., Norman, J., Welles, J., Campbell, G., and Blad, B. (1985). Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24(3) :383–387.
- [Wanner et al., 1995] Wanner, W., Li, X., and Strahler, A. (1995). A new class of geometric-optical semiempirical kernels for global brdf and albedo modeling. *Proc. IGARSS'95*, 1 :15–17.
- [Ward, 1992] Ward, G. (1992). Measuring and modeling anisotropic reflection. *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)*, 26(2) :265–272.