

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
UFR des sciences fondamentales et appliquées
XLIM-SIC
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

École doctorale : Sciences et ingénierie pour l'information, mathématiques - S2IM (Poitiers)
Secteur de recherche : Informatique et applications

Présentée par :
Emmanuelle Tautzia

Étude de l'apparence physique de surfaces opaques, analyse photométrique et reconstruction 3D

Directeur(s) de Thèse :
Daniel Meneveaux, Abderrazak El Albani

Soutenue le 30 juin 2016 devant le jury

Jury :

| | | |
|------------|-----------------------------|---|
| Président | Christophe Renaud | Professeur des Universités, Université du Littoral Côte d'Opale |
| Rapporteur | Kadi Bouatouch | Professeur des Universités, Université de Rennes |
| Rapporteur | Venceslas Biri | Professeur des Universités, Université de Paris-Est Marne-la-Vallée |
| Membre | Daniel Meneveaux | Professeur des Universités, Université de Poitiers |
| Membre | Abderrazak El Albani | Professeur des Universités, Université de Poitiers |
| Membre | Benjamin Bringier | Maître de conférences, Université de Poitiers |

Pour citer cette thèse :

Emmanuelle Tautzia. *Étude de l'apparence physique de surfaces opaques, analyse photométrique et reconstruction 3D* [En ligne]. Thèse Informatique et applications. Poitiers : Université de Poitiers, 2016. Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>

Thèse

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS

Faculté des sciences Fondamentales et Appliquées
(Diplôme national – arrêté du 7 août 2006)

École Doctorale : **Sciences et Ingénierie pour l'Information**
Secteur de Recherche : **Informatique**

Présentée par

Emmanuelle Tautia

Etude de l'apparence physique de surfaces opaques, analyse photométrique et reconstruction 3D

Thèse soutenue le 30 Juin 2016 devant le jury composé de :

Kadi BOUATOUCH, Professeur, IRISA - université Rennes *Rapporteur*
Venceslas BIRI, Professeur, IGM - université Paris-Est Marne-la-Vallée *Rapporteur*
Christophe RENAUD, Professeur, LISIC - université du Littoral Côte d'Opal ... *Examineur*
Daniel MENEVEAUX, Professeur, université de Poitiers *Directeur de Thèse*
Abderrazak EL ALBANI, Professeur, université de Poitiers *Co-Directeur de Thèse*
Benjamin BRINGIER, Maître de Conférence, université de Poitiers *Encadrant*

REMERCIEMENTS

Parmi les nombreuses personnes que je souhaiterais mentionner je tiens tout d'abord à remercier très chaleureusement, et le mot est faible, mon directeur de thèse, Daniel Meneveau, ainsi que mes encadrants Benjamin Bringier et Abderrazak El Albani. Merci donc à Daniel et Benjamin pour leur patience, leur gentillesse et leur aide. C'est sans aucun doute grâce à ces personnes que cette thèse a vu le jour, s'est déroulée dans les meilleurs conditions possibles et a pu se terminer sans trop d'encombres. Leur rigueur et leurs connaissances m'ont non seulement impressionnée mais également largement influencée dans tous les aspects de mon travail de chercheuse et d'enseignante. Outre le travail au quotidien c'est également leur soutien sans faille que j'aimerais remercier. Un grand merci également à Abder de m'avoir permis de travailler sur ses précieux fossiles mais également pour les réunions très enrichissantes autant professionnellement qu'humainement.

Je remercie également les membres de mon jury de thèse pour avoir accepté d'évaluer mes travaux mais également pour leurs remarques très intéressantes : Kadi Bouatouch et Venceslas Biri en tant que rapporteurs et Christophe Renaud en tant qu'examineur.

Je tiens également à remercier la région Poitou-Charentes qui a financé cette thèse dans le cadre d'une bourse régionale. J'ai ainsi pu profiter pendant ces années de la très bonne ambiance du laboratoire Xlim. Je tiens donc à en remercier tous les membres pour leur accueil chaleureux ainsi que mes collègues plus proches notamment Alexandre, Audrey, Hermine, Mathieu, Maxime et Aboubacar pour leur aide et les moments passés ensemble. Merci également à l'équipe de travail à laquelle j'ai été associée : Lionel Simonot, Mickael Ribardière et bien sûr Benjamin et Daniel. Grâce à cette équipe j'ai pu participer à un travail très enrichissant ainsi qu'à la rédaction d'articles dédiés aux modèles à base de microfacettes. Enfin je tiens à dire un très grand merci à Philippe Dubois pour son aide technique dans la conception d'un système d'acquisition utilisé lors de mes travaux de recherche.

Ces années ont également été pour moi l'occasion de me plonger dans un domaine qui me tient à cœur à savoir l'enseignement. Lors de ces années j'ai pu travailler en collaboration avec différentes équipes enseignantes de l'Université de Poitiers que je remercie également pour leur accueil, leur gentillesse et leur aide.

Enfin mes derniers mots vont à ma famille sans qui rien de tout cela n'aurait pu être possible : ma mère et mon père que j'aime tendrement, mes frères et mes "sœurs" dont je suis si fière et que j'aime tout autant, mes grands-pères et mon arrière-grand-mère, qui nous manquent tellement et à qui je pense souvent, et enfin mes grands-mères, mes oncles, mes tantes et mes cousines pour leur soutien sans faille et leurs encouragements. Bien des remerciements vont également à mes amies qui m'ont toujours encouragée dans ce projet. Et bien sûr, le meilleur pour la fin comme le dit l'expression, à mon rayon de soleil, mon amour, la prunelle de mes yeux que j'aime de tout mon cœur : ma fille Nuria, qui m'apporte tant d'amour et de joie.

RÉSUMÉ

L'étude de l'apparence de surfaces par analyse photométrique est un domaine de recherche actif, avec de nombreuses applications pour étudier la qualité des surfaces, la rugosité des objets, leur apparence, etc. Le sujet de cette thèse concerne plus particulièrement les surfaces opaques, et nous souhaitons estimer des informations géométriques et photométriques à partir de photographies. La première partie de ce manuscrit traite de l'analyse des modèles mathématique de réflectance, permettant de représenter les matériaux. Afin d'offrir une description physiquement plausible des matériaux opaques, notre première contribution concerne la mise en œuvre d'un modèle à base de microfacettes Lambertiennes interfacées. Il généralise différents modèles de la littérature incluant des surfaces purement diffuses ou spéculaires ainsi que des surfaces diffuses ou spéculaires rugueuses et se manipule grâce à trois paramètres physiques : couleur, rugosité et indice de réfraction. Il permet de prendre en compte la transmission des flux lumineux pénétrant sous la surface ainsi que les réflexions multiples entre microfacettes et de restituer les effets de rétrodiffusion lumineuse et d'anisotropie. Notre seconde contribution concerne la réalisation d'un système complet d'acquisition de la géométrie et de la réflectance d'objets à partir d'images HDR. Notre méthodologie correspond à une chaîne de reconstruction complète et automatique, uniquement à partir d'images, pour un faible coût de mise en place et un temps de traitement rapide comparé aux méthodes existantes. Notre méthode permet d'extraire des échantillons de réflectance suffisamment nombreux pour identifier les paramètres de modèles de réflectance avec les données acquises.

Mots-clés : *acquisition d'image, BRDF, 3D reconstruction, identification, synthèse et analyse d'image.*

ABSTRACT

The study of surface appearance by photometric analysis is an active research field, with various applications dedicated to the analysis of surface roughness or appearance. The subject of this PhD dissertation relates to the study of opaque surfaces, through the acquisition of their geometry. Our study leads us to an analysis of mathematical reflectance models, for representing materials appearance. To provide a physically plausible description of opaque surfaces, our first contribution concerns the implementation of a model based on Lambertian interfaced microfacets. This model generalizes several approaches often referenced in the literature, and includes flat diffuse or specular surfaces as well as diffuse or specular microfacets with three physically-based parameters : color, roughness and refractive index. It makes it possible to account for the transmission of the light flux entering below the surface as well as multiple reflections between microfacets, while handling backscattering and anisotropy. The second main contribution of this work concerns the implementation of a complete acquisition system for estimating geometry and reflectance from HDR images. Our methodology is based on a complete and automatic reconstruction framework, achieving a higher level of precision, a lower cost of implementation and a shorter processing time compared to photometry-based existing methods.

Keywords : *image acquisition, BRDF, 3D reconstruction, fitting, image synthesis and analysis*

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| TABLE DES MATIÈRES | ix |
| 1 INTRODUCTION | 1 |
| 2 LUMIÈRE, MATIÈRE ET ACQUISITION | 5 |
| 2.1 MODÈLES PHYSIQUES ET TRANSPORT DE LA LUMIÈRE | 7 |
| 2.1.1 Grandeurs physiques | 7 |
| 2.1.2 Transport de la lumière | 9 |
| 2.2 ACQUISITION DE LA RÉFLECTANCE | 12 |
| 2.2.1 Systèmes de mesures | 14 |
| 2.2.2 Capteur photographique | 19 |
| 2.3 MODÈLES DE RÉFLECTANCE | 23 |
| 2.3.1 Modèles physiques simples | 23 |
| 2.3.2 Modèles empiriques | 24 |
| 2.3.3 Modèles à base de micro-facettes | 25 |
| 2.3.4 Discussion | 27 |
| CONCLUSION | 27 |
| 3 MODÈLE À BASE DE MICROFACETTES LAMBERTIENNES INTERFACÉES | 31 |
| 3.1 MODÈLES À BASE DE MICROFACETTES | 33 |
| 3.1.1 Microfacettes Lambertiennes interfacées : une solution physiquement réaliste | 34 |
| 3.1.2 Fonctions de distribution et facteurs d'atténuation géométrique associés | 39 |
| 3.1.3 Evaluation de la BRDF par méthodes de Monte-Carlo et échantillonnage | 42 |
| 3.1.4 Mise en œuvre du modèle Lambertien interfacé et tracé de chemin | 47 |
| 3.2 MODÈLE LAMBERTIEN INTERFACÉ : ÉVOLUTIONS ET FORMULE APPROCHÉE | 51 |
| 3.2.1 Réflexions multiples de la lumière entre microfacettes | 51 |
| 3.2.2 Tabulation des données | 54 |
| 3.2.3 Formulation approchée | 57 |
| 3.3 RÉSULTATS | 60 |
| CONCLUSION | 64 |
| 4 ANALYSE PHOTOMÉTRIQUE ET RECONSTRUCTION 3D | 67 |
| 4.1 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES SYSTÈMES DE RECONSTRUCTION 3D | 69 |
| 4.1.1 Reconstruction de la géométrie à partir d'images | 69 |
| 4.1.2 Méthodes de Stéréophotométrie calibrées | 72 |
| 4.1.3 Discussion | 78 |
| 4.2 NOTRE SYSTÈME DE RECONSTRUCTION STÉRÉO | 79 |
| 4.2.1 Notre solution de reconstruction par stéréophotométrie | 81 |
| 4.2.2 Estimation de la réflectance, filtrage et identification | 85 |
| 4.3 VALIDATION ET RÉSULTATS | 92 |
| 4.3.1 Validation virtuelle du système de reconstruction | 93 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.2 Application à des objets réels | 102 |
| CONCLUSION | 108 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE | 111 |
| BIBLIOGRAPHIE | 115 |

INTRODUCTION



L'étude de l'apparence d'objets et de leur caractéristiques de surface telle que la géométrie ou la réflectance, représente un besoin croissant dans différents domaines tels que le contrôle qualité, la recherche pour l'analyse de matériaux, la conservation du patrimoine pour l'archivage de données ou encore les visites virtuelles de musée ou de lieux historiques. De nombreux outils ont été développés pour ces applications et sont souvent dédiés à un type de mesure en particulier (par exemple la reconstruction tridimensionnelle ou l'étude de réflectance). Cette thèse se situe dans ce contexte, avec un intérêt spécifique pour la représentation, l'acquisition et la restitution par image de synthèse, de la fonction de réflectance bidirectionnelle (notée BRDF, pour *Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Cette fonction exprime la manière dont un matériau réfléchit la lumière qui l'éclaire. Il s'agit d'une fonction à cinq dimensions : angles zénithaux et azimuthaux des directions d'incidence et de réflexion par rapport à la normale, longueur d'onde.

Le sujet de thèse qui m'a été confié est issu d'une collaboration entre les équipes IG et ICONES de l'institut XLIM, et l'équipe HydrASA (Hydrogéologie, Argiles Sols et Altérations) du laboratoire IC2MP (Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers). L'objectif à plus long terme est de réaliser des études de surface pour des fossiles de macro-organismes découverts au Gabon. Ces fossiles, vieux de plus de deux milliards d'années ont donné lieu à de nombreuses publications [ABC⁺¹⁰, EABC⁺¹⁴, MDEA⁺¹⁴]. Il s'agit d'une découverte majeure qui bouscule les connaissances établies jusqu'alors puisque les plus vieux organismes pluricellulaires découverts étaient datés de sept cents millions d'années. Les fossiles retrouvés dans un sol argileux sont de très bonne qualité et ne se résument pas seulement à l'empreinte des organismes mais également au spécimen fossilisé. Dans le cadre d'une étude visant à confirmer l'origine organique et rassembler des connaissances sur ces fossiles, nous espérons que le système d'acquisition proposé lors de cette thèse peut apporter des éléments de mesure supplémentaires, avec une analyse non invasive de la surface.

Divers systèmes permettent de mesurer précisément la réflectance [NRH⁺⁷⁷, Fo097, WSB⁺⁹⁸, BVD⁺⁰⁷] mais leur élaboration pour l'étude d'objets de géométrie inconnue n'est pas un problème trivial. En effet chaque point de mesure de la réflectance est associé à un jeu de valeurs pour les cinq dimensions de la fonction de réflectance. Ces dimensions sont la longueur d'onde et les angles zénithaux et azimutaux des directions d'incidence/d'observation et la normale à la surface. En conditions d'acquisitions contrôlées, la direction d'incidence de la lumière et la direction d'observation sont connues. La recherche de la normale à la surface permet alors de déterminer les angles zénithaux et azimutaux. Certains systèmes se basent sur l'étude d'échantillons plans afin de se placer dans un cas où la normale est

connue et utilisent le déplacement d'un capteur, d'une source et/ou de l'échantillon pour échantillonner la fonction. Le nombre d'échantillons de mesures fournis par ces systèmes est souvent très important et pose alors un problème de stockage des données. Le nombre d'acquisitions à réaliser est également important et les temps d'acquisition sont longs du fait des mouvements du capteur, de la source ou de l'échantillon entre chaque mesure. De nombreuses variantes ont été proposées afin d'obtenir un échantillonnage de la fonction de réflectance tout en limitant les mouvements du système et en diminuant ainsi le temps nécessaire pour une acquisition. Par exemple l'acquisition d'images d'objet sphérique, permet d'obtenir lors d'une seule mesure un ensemble d'angles d'incidence et d'observation différents [MWLT00, LKK98]. De la même manière l'utilisation d'un miroir hémisphérique placé au-dessus de l'échantillon permet d'obtenir, avec une seule image du miroir, l'ensemble des directions d'observation possible [War92, DW04, GAHO07, MSY07]. Afin d'étendre ces systèmes pour l'étude d'objets de géométrie non connue, une estimation préalable de leur forme doit être réalisée. Un grand nombre de méthodes de reconstruction tridimensionnelle ont été présentées dans la littérature : les systèmes utilisant des lasers ou des lumières structurées [SWI97, DC01, FCo4], les méthodes multi-vues [SCD⁺06, Ike14] et les méthodes de stéréophotométrie [Woo80, HW11, Nay91, Geo03, SI96, HMI10, GCHS10]. Selon la solution de reconstruction utilisée, le système de reconstruction peut également permettre l'acquisition de la réflectance des objets. Dans le cas contraire plusieurs outils doivent être combinés pour parvenir au résultat. Par exemple l'utilisation de laser ou de lumière structurée implique une mise en correspondance entre les données tridimensionnelles estimées et les acquisitions, réalisées en supplément, pour l'estimation de la réflectance. Les distorsions entre les différents points de vue et les ambiguïtés qui peuvent intervenir lors du recoupement des données rend cette étape complexe et entraîne inmanquablement des erreurs de recalage. L'utilisation de différents outils pour une même étude augmente également les manipulations à réaliser et/ou les coûts de mise en place. L'élaboration d'un seul et même système pour la reconstruction et l'estimation de la réflectance est possible grâce à des méthodes de reconstruction utilisant des acquisitions photographiques : les images exploitées dans un premier temps pour l'estimation de la géométrie permettent dans un second temps l'estimation de la réflectance de la surface. On retrouve notamment des systèmes d'acquisitions multivues : différentes acquisitions pour différentes positions de la caméra ou de l'objet (utilisation de table tournante par exemple) sont réalisées pour permettre l'estimation de la géométrie puis de la réflectance. Cependant, le contrôle précis des déplacements des éléments du système est relativement complexe à réaliser et implique, comme pour les gonio-réfectomètres, des temps d'attente entre chaque acquisition. Enfin, la mise en correspondance des données d'une vue à l'autre est nécessaire. Parmi les méthodes de reconstruction tridimensionnelle de la littérature, seule la stéréophotométrie, utilisant une position de vue fixe, permet de se passer d'une étape de mise en correspondance des données géométriques et de réflectance. Ces méthodes, tout d'abord élaborées pour des surfaces purement diffuses connaissent un intérêt croissant et sont étendues à tous types de surfaces opaques. Différentes solutions sont proposées dans la littérature mais reposent sur un modèle de réflectance particulier et sont donc limitées à un type de matériau. De plus, la recherche des paramètres de matériau et de la normale à la surface se fait au moyen d'un algorithme itératif visant à minimiser l'erreur entre le modèle et les données acquises. Les temps de traitement sont donc plus longs que les méthodes reposant sur l'inversion du modèle Lambertien. Notre étude s'oriente sur la recherche d'une nouvelle solution de reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie rapide et adaptée à tout type de matériau opaque.

Le choix d'une méthode de reconstruction géométrique par stéréophotométrie permet de proposer un unique système pour la reconstruction géométrique et l'estimation de la réflectance. L'une de nos contributions principales concerne donc la réalisation d'un système

d'acquisition aussi simple que possible afin de réduire les coûts de mise en place, et permettant de reconstruire la surface d'un objet et d'en estimer la réflectance rapidement, tout en limitant la manipulation de l'objet d'étude. Il est composé d'un appareil photographique de position fixe et de douze sources de lumière. Notre méthode de stéréophotométrie estime la normale de la surface à l'aide de la composante Lambertienne du matériau. Cette hypothèse permet de simplifier le processus tout en conservant une bonne précision des résultats. L'utilisateur dispose de deux paramètres : un seuil de détection d'ombre et un seuil de détection de spécularité. La géométrie ainsi estimée permet de déterminer directement des échantillons de la réflectance de la surface à partir des images initialement acquises. Le nombre de points de mesure obtenus grâce à notre système étant limité, nous proposons l'identification des paramètres d'un modèle mathématique de réflectance sur les données estimées par notre système afin de compléter ces données acquises mais également d'éviter un stockage coûteux des points de mesure pour chaque surface étudiée.

Dans le domaine de l'informatique graphique, de nombreux modèles mathématiques permettent de représenter des matériaux mats, brillants, spéculaires, anisotropes ou encore translucides. La communauté est très attachée à utiliser des représentations *physiquement plausibles*, pour assurer des calculs de simulation d'éclairage aussi précis que possible car de nombreuses applications industrielles nécessitent des résultats visuellement/physiquement réalistes. L'identification de paramètres de modèles mathématiques sur les points de réflectance mesurés permet de simplifier l'étude des résultats et de déterminer les caractéristiques du matériau correspondant à ces paramètres. Parmi ces modèles, la recherche de représentations physiquement plausibles a conduit à un intérêt croissant pour les modèles à base de distributions de microfacettes. Ils ont tout d'abord été élaborés dans le domaine de l'optique et sont aujourd'hui largement utilisés en informatique graphique. Cependant, pour des raisons de simplicité d'implémentation, la plupart des modèles de la littérature considèrent des microfacettes de réflectance purement spéculaire pour représenter l'aspect brillant de la surface. L'aspect diffus est généralement géré par l'ajout d'un terme Lambertien. Ce type de représentation pose néanmoins des problèmes de cohérence physique. En effet selon la direction d'incidence de la lumière ou d'observation l'aspect brillant d'une surface diffère. L'aspect diffusant diminue ou augmente en conséquence, ce qui n'est pas ou peu géré par ce type de modèle. Certains auteurs ont proposé une balance entre composante diffuse et composante spéculaire afin de simuler ce comportement mais aucun ne décrit de façon physique l'origine de ce phénomène. En effet ce comportement résulte de la capacité d'une interface à transmettre la lumière, celle-ci interagit avec le matériau puis est retransmise à l'extérieur. Ce phénomène est complexe à décrire et n'est géré que par les modèles multi-couches, complexes à implémenter. De plus la rétrodiffusion de la lumière par une surface rugueuse, observée et décrite par Oren et Nayar [ON94], ne peut pas être représentée lorsque les microfacettes sont purement spéculaires. Ces auteurs ont proposé un modèle de réflectance basé sur une distribution de microfacettes Lambertiennes afin de représenter ce comportement. Le modèle est cependant limité à la description de surfaces rugueuses purement diffusantes et le modèle nécessite des calculs d'intégration pour prendre en compte les contributions de toutes les orientations possibles de microfacettes. L'étude des modèles de réflectance proposés dans la littérature nous a permis d'étendre et de mettre en œuvre un nouveau modèle de réflectance bidirectionnelle, physiquement plausible, à base de distributions de microfacettes Lambertiennes interfacées. Cette contribution permet de proposer une représentation prenant en compte la transmission de l'énergie lumineuse à l'interface des microfacettes et sa réflexion par un substrat diffusant, avec la prise en compte des réflexions lumineuses multiples entre le substrat et l'interface de manière analytique. La formulation que nous présentons pour la réflectance d'une microfacette permet d'éviter les calculs d'intégration numérique nécessaires avec les modèles multicouches

de la littérature. A l'échelle de la macrosurface, une intégration sur l'orientation des microfacettes doit être réalisée, mais nous proposons une solution numérique pour prendre en compte tout type de surface à base de microfacettes, sans biais et dont l'intégration à des logiciels de simulation d'éclairage de type tracé de chemins en simulation d'éclairage est directe.

La mise en place de notre système d'acquisition fait intervenir différents domaines d'étude. Tout d'abord la reconstruction géométrique, pour laquelle des études ont déjà été menées dans notre laboratoire au sein de l'équipe ICONES [BHK08, BBK12, BBK13, KB13]. Ces connaissances nous ont permis de proposer une nouvelle méthode de stéréophotométrie permettant d'outrepasser les limitations de la méthode d'origine (surfaces non Lambertiennes) tout en proposant des temps de calculs plus courts que la plupart des méthodes de reconstruction par stéréophotométrie existants, grâce à une méthode d'élimination hiérarchique des comportements non Lambertiens. Le second domaine abordé concerne l'étude des modèles de réflectance. Nous avons eu l'opportunité de travailler en collaboration avec un physicien du laboratoire Pprime sur un modèle de réflectance élaboré tout d'abord dans le domaine de l'optique. Ce modèle, physiquement plausible et manipulable au moyen de paramètres physiques, permet de représenter un large éventail de matériaux. Nous proposons une extension de ce modèle afin de gérer l'anisotropie, les phénomènes d'ombrage et de masquage entre microfacettes ainsi que les inter-réflexions. Nous proposons également des solutions de calcul pour la synthèse d'image et l'identification de paramètres, avec un calcul direct pour la synthèse d'images et un modèle approché. Les contributions apportées par notre travail sont les suivantes :

- l'étude d'un nouveau modèle de BRDF, physiquement plausible et capable de représenter un large panel de matériaux, ainsi que plusieurs méthodes de mise en œuvre pour son utilisation en synthèse d'image. Cette étude a donné lieu à une présentation au Groupe de Travail IG en 2012 puis à l'AFIG en 2013 et une publication dans la revue REFIG [TSB⁺14];
- la mise en place d'un système d'acquisition complet dédié à l'acquisition d'un objet par photographie, à partir d'un point de vue fixe et plusieurs sources lumineuses;
- la proposition d'une méthode de reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie rapide et adaptée à tous types de matériaux opaques grâce à une élimination hiérarchique des points d'ombre et de specularité.

Ce mémoire de thèse est organisé en trois chapitres. Le premier correspond à l'étude bibliographique générale et pose les notations et les concepts importants utilisés, à la fois pour les méthodes de reconstruction et les modèles de réflectance. Le deuxième chapitre présente le modèle des microfacettes Lambertiennes interfacées, ainsi que des solutions de mise en œuvre et l'élaboration d'une formulation approchée. Le troisième chapitre détaille notre système d'acquisition et les étapes de calibration mises en place. Le quatrième chapitre décrit notre méthodologie pour la reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie ainsi que les étapes de validation du système complet. Le dernier chapitre de cette thèse dresse un bilan des travaux réalisés et présente plusieurs perspectives possibles à ce travail.

LUMIÈRE, MATIÈRE ET ACQUISITION

2

SOMMAIRE

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | MODÈLES PHYSIQUES ET TRANSPORT DE LA LUMIÈRE | 7 |
| 2.1.1 | Grandeurs physiques | 7 |
| 2.1.2 | Transport de la lumière | 9 |
| 2.2 | ACQUISITION DE LA RÉFLECTANCE | 12 |
| 2.2.1 | Systèmes de mesures | 14 |
| 2.2.2 | Capteur photographique | 19 |
| 2.3 | MODÈLES DE RÉFLECTANCE | 23 |
| 2.3.1 | Modèles physiques simples | 23 |
| 2.3.2 | Modèles empiriques | 24 |
| 2.3.3 | Modèles à base de micro-facettes | 25 |
| 2.3.4 | Discussion | 27 |
| | CONCLUSION | 27 |

L'interaction de la lumière avec la matière dépend de plusieurs facteurs : la direction d'incidence de la lumière, l'orientation de la surface, le matériau dont il est constitué et son aspect de surface (sa rugosité). Chacun de ces paramètres influence la proportion de lumière réfléchi en fonction des directions de réflexion. Afin de produire une image de synthèse, la simulation du transport de la lumière doit être réalisée. Cette interaction de la lumière avec la matière peut être décrite grâce à des modèles mathématiques de BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). L'estimation de la lumière réfléchi par un point d'une surface vers un observateur nécessite l'estimation de la BRDF pour toutes les directions d'incidence de lumière possible. Le problème est alors récursif car la lumière arrivant sur un objet peut provenir d'un autre objet, et ainsi de suite. Différentes méthodes de rendu ont donc été proposées dans la littérature afin de proposer des solutions de mise en œuvre pour résoudre ce problème.

Le processus inverse, consistant à retrouver les informations de réflectance d'une surface est possible grâce à des conditions d'acquisition contrôlées. C'est le cas par exemple des gonio-réfectomètres qui mesurent la réflectance d'échantillons de surface plans. Dans le cas d'une unique source de lumière éclairant une surface, sans aucune inter-réflexion par d'autres objets de la scène, et lorsque les directions d'incidence de lumière, d'observation et de normale à la surface sont connues, la réflectance peut être estimée par inversion de l'équation du rendu. Différents systèmes d'acquisition ont été proposés dans la littérature, avec divers coûts de mise en place, diverses précisions de mesures et vitesse d'acquisition, suivant les objectifs de

l'étude. Certains considèrent des échantillons de surface plans, d'autres travaillent sur des objets de géométrie plus complexe mais connue. Peu de systèmes permettent à la fois d'estimer la géométrie de la surface et sa réflectance de façon précise. Notre objectif est d'élaborer un système rapide, relativement précis et peu coûteux, dédié à l'estimation de la réflectance d'objets de géométrie inconnue. Pour cela nous avons étudié les différentes configurations des systèmes existants dans la littérature afin de trouver la solution permettant d'associer une reconstruction tridimensionnelle et répondant aux critères de rapidité, de faible coût et de précision. Ces systèmes ont tous en commun l'utilisation de capteurs photosensibles afin d'acquérir la luminance des surfaces, incluant une étape de calibration visant à corriger les problèmes de bruit et/ou de dynamique.

Par ailleurs les données de réflectance acquises sous forme d'un grand nombre de points de mesure, sont difficiles à manipuler. Elles peuvent être utilisées directement pour la réalisation d'une image de synthèse, pour représenter un objet constitué d'un matériau dont la réflectance a été acquise. Mais pour cela elles doivent être stockées puis interpolées pour la simulation. L'identification des paramètres de modèles mathématiques de réflectance sur les données acquises permet d'éviter le stockage et simplifie la description des surfaces étudiées. Nous proposons dans ce chapitre un survol des différentes familles de modèles de réflectance de la littérature afin d'orienter les recherches vers un modèle dont les paramètres représentent des caractéristiques physiques tel que la rugosité de la surface.

La première partie de ce chapitre présente les grandeurs physiques manipulées lors de l'estimation de la réflectance d'une surface ainsi que les fonctions permettant de décrire l'interaction de la lumière avec une surface. Les différentes méthodes de simulation du transport lumineux sont ensuite évoquées afin de présenter le principe général de l'équation du rendu. La deuxième partie du chapitre propose une classification des différents systèmes d'acquisition de réflectance en fonction de leur configuration ainsi que les capteurs utilisés et leur calibration pour une meilleure précision. Les différentes familles de modèles mathématiques de réflectance sont présentées dans la dernière partie du chapitre.

2.1 Modèles physiques et transport de la lumière

L'acquisition de la réflectance d'une surface est un domaine de recherche très actif. En effet, les utilisations possibles des données acquises sont nombreuses : par exemple pour la reproduction d'objets ou de monuments historiques ou encore la production d'images de synthèse réalistes pour l'architecture ou le cinéma. Les domaines de mesures des rayonnements électromagnétiques sont la radiométrie et la photométrie. La radiométrie définit les grandeurs des rayonnements, quelle que soit leur nature, tandis que la photométrie concerne l'étude particulière des rayonnements du domaine du visible. Des grandeurs radiométriques ont été définies afin de représenter et quantifier le transport de la lumière. La définition de ces grandeurs ainsi que les fonctions permettant de décrire l'interaction de la lumière avec une surface est essentielle à la compréhension et la représentation des phénomènes qui se produisent lorsque la lumière parvient puis est réfléchi par une surface. Ces fonctions interviennent également dans la simulation du transport de la lumière dans un environnement. Cette section présente également le principe général des méthodes de simulation d'éclairage, utilisées pour la création d'images de synthèse ainsi qu'une comparaison des résultats obtenus pour différents types de matériau.

2.1.1 Grandeurs physiques

Afin de décrire les grandeurs radiométriques, les définitions proposées par Nicodemus [Nic65] sont reprises dans ce manuscrit de thèse et uniformisées pour la suite du document. Le tableau 2.1 résume les grandeurs utiles pour cette étude. Toutes sont définies pour une longueur d'onde λ mais pour des raisons de lisibilité cette dépendance n'est pas mentionnée dans les notations des modèles par souci de lisibilité et de simplification.

TABLE 2.1 – Concepts radiométrique. Notations recommandées par la NBS [NRH⁺77].

| | | | |
|------------------|---|--|---|
| Flux énergétique | Φ | [W] | Puissance propagée par un rayonnement électromagnétique |
| Eclairement | $E = \frac{d\Phi}{dA}$ | [W.m ⁻²] | Densité de flux reçu par unité de surface |
| Radiosité | $B = \frac{d\Phi}{dA}$ | [W.m ⁻²] | Densité de flux émis/réfléchi par unité de surface |
| Luminance | $L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega}$ | [W.m ⁻² .sr ⁻¹] | Flux émis/réfléchi par unité de surface et par unité d'angle solide |

Afin de quantifier les rayonnements électromagnétiques, l'unité élémentaire de mesure de la puissance d'un rayonnement est le flux énergétique, noté Φ , transportée par un rayonnement. Cette grandeur se mesure en Watt. Dès lors qu'une interaction avec une surface est considérée, l'aire de la surface est prise en compte pour le calcul de la grandeur. Ainsi, l'éclairement définit l'interaction de la lumière provenant de toutes les directions possibles pour un élément de surface d'aire dA . La densité de flux reçue par cette portion de surface, et collectée pour toutes les directions d'incidence de lumière possibles, est divisée par son aire et détermine l'éclairement : $d\Phi/dA$. De la même manière, la radiosité détermine la densité de flux émis ou réfléchi, dans toutes les directions possibles, par une portion de surface : $d\Phi/dA$.

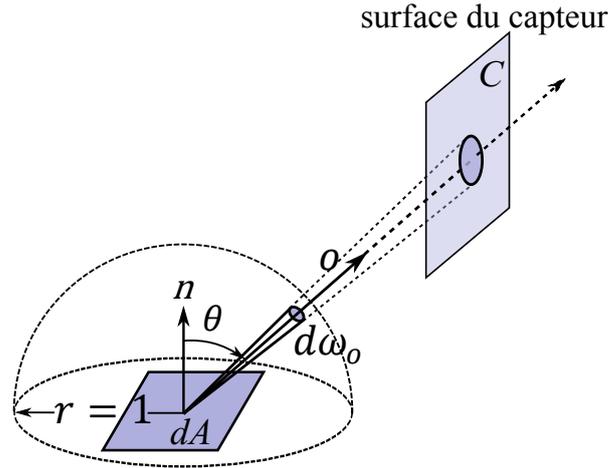


FIGURE 2.1 – Luminance réfléchi par une surface en direction d’un autre élément de surface (e.g. un élément de surface d’un capteur).

Lorsqu’une notion de direction de rayonnement intervient, la grandeur considérée est la Luminance (figure 2.1). Elle définit, pour un élément de surface d’un objet, noté dA , la densité de flux émise ou réfléchi dans un angle solide $d\omega_o$ autour d’une direction d’observation \mathbf{o} (son unité est le Watt par stéradian par mètre carré) :

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega_o'} \quad (2.1)$$

avec $dA \cdot \cos\theta$ la surface projetée, ou aire projetée. Elle définit l’aire observée d’un élément de surface dA vu depuis un point d’observation (dans ce cas vu depuis le capteur de l’appareil photographique). Cet élément de surface est vu sous l’aire projetée dA' :

$$dA' = dA \cos\theta, \quad (2.2)$$

avec θ l’angle zénithal entre la normale à la surface et la direction de projection.

La lumière réfléchi par une surface dépend de l’éclairement incident et des propriétés du matériau. Une partie de la lumière reçue est réfléchi, une partie peut être transmise et une partie peut être absorbée. Ainsi le rapport entre le flux réfléchi par une surface et le flux reçu permet de définir la portion de lumière qui n’est pas absorbée ou transmise : c’est la réflectivité, ou coefficient de réflexion du matériau. Elle est égale au rapport entre l’émittance et l’éclairement pour un élément de surface :

$$\rho = \frac{dB}{dE}. \quad (2.3)$$

Cependant cette grandeur ne permet pas de prendre en compte la direction d’incidence de la lumière et la direction de réflexion. En effet, la luminance réfléchi par une surface $dL_r(\mathbf{o})$ dans la direction d’observation \mathbf{o} dépend de l’éclairement incident dE_i reçu par l’élément de surface considéré. $dL_r(\mathbf{o})$ et dE_i sont proportionnels :

$$dL_r(\mathbf{o}) = dE_i \cdot f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}), \quad (2.4)$$

où $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ est la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* ou BRDF). Cette fonction permet de décrire la réflexion de

la lumière par une surface dans une direction d'observation \mathbf{o} , par rapport à l'éclairement provenant d'une direction d'incidence \mathbf{s} (figure 2.2). Elle s'exprime en sr^{-1} , est dépendante de la longueur d'onde et permet de caractériser les propriétés de réflexion de la lumière par une surface. Egaleme nt notée $f(\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o)$ afin de signifier sa dépendance aux quatre variables que sont les angles zénithaux et azimutaux des directions d'incidences et d'observation.

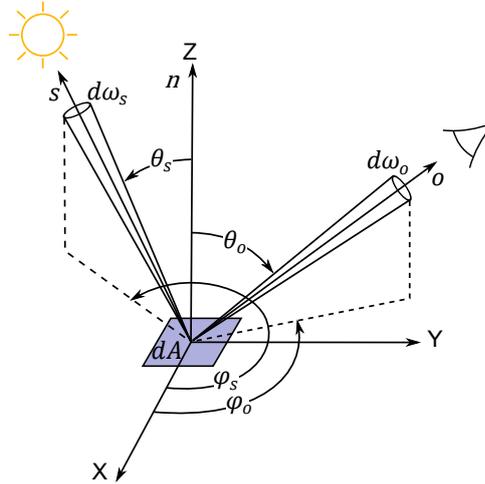


FIGURE 2.2 – Géométrie locale des directions d'observation et d'incidence impliquées dans la définition de la BRDF.

Afin de reproduire le comportement réel des matériaux, la fonction de BRDF doit répondre à des lois physiques connues, elle est alors considérée comme *physiquement plausible*. Elle doit vérifier le principe de réciprocité de Helmholtz [Hel67], i.e. la BRDF d'un échantillon de surface, éclairé depuis une direction \mathbf{s} et observé dans la direction \mathbf{o} , est équivalente à la BRDF de ce même échantillon si la position de la source et de l'observateur sont échangées. Autrement dit $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = f(\mathbf{o}, \mathbf{s}, \mathbf{n})$. La BRDF doit également respecter la loi de conservation d'énergie :

$$\int_{\Omega^+} f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_o d\omega_o \leq 1, \quad (2.5)$$

Cette fonction à quatre dimensions peut être réduite à trois dimensions dans le cas isotrope. Dans ce cas, pour un point de surface de normale N , la luminance réfléchi e dans une direction donnée est la même lorsque l'objet pivote selon l'axe N . La fonction de BRDF ne dépend alors que des angles zénithaux d'incidence de la lumière θ_s , et d'observation θ_o et l'angle azimutal au plan d'incidence $\phi_o - \phi_s$. Cette simplification peut s'appliquer à la plupart des matériaux utilisés pour représenter les objets du monde réel.

2.1.2 Transport de la lumière

Le transport de la lumière dans une scène dépend de nombreux facteurs. Elle est tout d'abord émise par des sources pouvant être de natures différentes (ponctuelle, directionnelle etc.), et produisant un flux lumineux correspondant à un spectre qui leur est propre. La lumière parvient ensuite aux objets de la scène dont la forme et la surface influence la réflexion de la lumière. Enfin selon le point d'observation, la luminance réfléchi e par chaque point de la scène est différente et en influence la perception. La simulation du processus de transport de la lumière afin de créer des images de synthèses représente un vaste domaine de recherche toujours très actif depuis les travaux pionniers de Goral et *al.* [GTGB84, Kaj86, WRC88, LW93, VG94, Jen96, CPP+05, HOJo8]. L'estimation de la réflectance

de surface par traitement d'image consiste à inverser ce processus. Afin de trouver les conditions d'acquisitions propices à cette inversion, la compréhension du principe général du transport de la lumière ainsi que la production d'images de synthèse sont utiles. Cette section présente le principe général de la simulation du transport de la lumière.

L'équation du rendu, proposée par Kajiya [Kaj86], décrit la quantité lumineuse réfléchie par un point de surface dans une direction d'observation pour tout type de surface opaque :

$$L_r(\mathbf{o}) = L_e(\mathbf{o}) + \int_{\omega_s} L_i(\mathbf{s}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_s, \quad (2.6)$$

avec $L_e(\mathbf{o})$ la lumière auto-émise par le matériau dans la direction d'observation \mathbf{o} , $L_i(\mathbf{s})$ la lumière incidente au point de surface considéré provenant d'une direction \mathbf{s} et $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ la BRDF propre à la surface.

Pour un point de surface observé depuis une direction \mathbf{o} , $L_r(\mathbf{o})$, la lumière perçue dans cette direction est égale à la lumière potentiellement émise par le matériau (nulle pour un matériau non émetteur) dans cette direction à laquelle s'ajoute la lumière réfléchie par la surface (figure 2.3). Celle-ci est égale à la luminance incidente selon la direction \mathbf{s} , pondérée par la fonction de BRDF de la surface. L'estimation de la lumière totale réfléchie par un point de surface dans une direction donnée s'obtient alors par l'intégration sur toutes les directions d'incidence possibles de la lumière (hémisphère supérieur à la surface) de la luminance réfléchie dans la direction d'observation par rapport à celle reçue de la direction d'incidence considérée. Pour chaque direction d'incidence, la lumière peut provenir d'une source ou d'un objet dont la luminance réfléchie peut également être estimée par l'équation du rendu. Ainsi la luminance des points de la scène visibles par un observateur, implique une récursion infinie des estimations de $L_r(\mathbf{o})$.

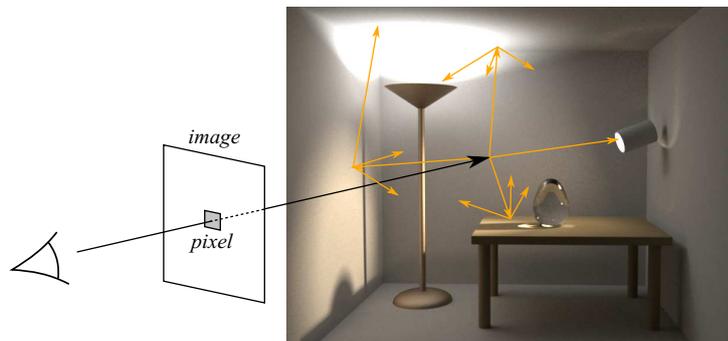


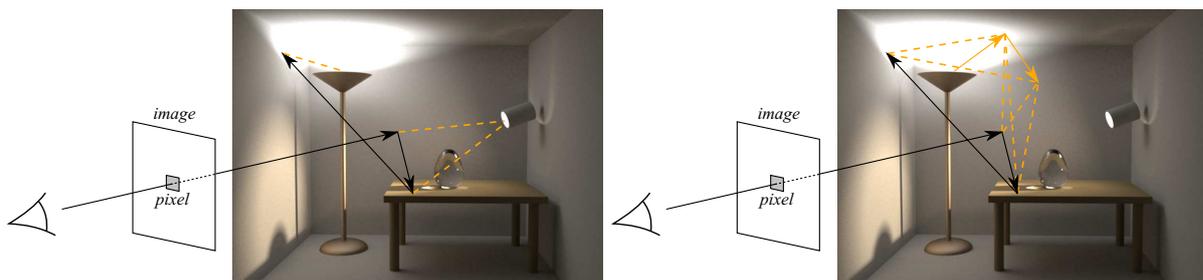
FIGURE 2.3 – Illustration du principe de l'équation du rendu. À chaque rebond de la lumière l'intégration est réalisée sur toutes les directions d'incidence de la lumière possibles.

Différentes méthodes de rendu proposent des solutions pour estimer la luminance des points d'une scène. La première méthode de rendu présentée dans la littérature est la méthode de radiativité, proposée par Goral et al. [GTGB84]. Elle repose sur l'hypothèse de surfaces diffuses afin de calculer les inter-réflexions entre les surfaces des objets d'une scène. C'est une méthode de rendu par éléments finis se réalisant en deux passes : la première étape est indépendante du point de vue et consiste à précalculer, par transfert radiatif, l'information d'éclairement pour chaque surface de la scène, subdivisée en éléments de petite taille ; la deuxième passe estime l'éclairement perçu pour un point de vue donné. L'étape de rendu à proprement parler, pour un point de vue donné, utilise l'information précalculée lors de la

première passe afin de calculer une image de la scène.

D'autres algorithmes résolvent le problème d'intégration par des méthodes probabiliste. C'est le cas de l'extension du lancer de rayons présenté par Kajiya [Kaj86] : le tracé de chemin (*Path Tracing*) [BSHo2, DJNC05]. Il s'agit d'une adaptation des méthodes de Monte Carlo afin de produire l'image d'une scène. Les rayons sont tracés de la caméra vers un pixel de l'image, en estimant des chemins lumineux à l'intérieur de la scène. A chaque intersection d'un rayon avec un objet, de nouveaux rayons sont relancés de manière aléatoire, permettant ainsi de prendre en compte l'éclairage indirect de la scène (figure 2.4a). L'échantillonnage couramment utilisé pour résoudre l'intégrale est un échantillonnage par importance visant à concentrer les directions de réflexion dans la partie "importante" de la fonction de réflectance, i.e. les directions de réflexion pour lesquelles la réflectance de la surface considérée est la plus forte. Plus de détails sur cette méthode sont données dans la partie 3.1.4.

Une évolution de cet algorithme est présentée par Lafortune et Willems [LW93] et Veach et Guibas [VG94] : le tracé de chemin bidirectionnel (*Bidirectional Path Tracing*). Les rayons partent de la caméra et des sources de lumière et forment des sous-chemins. La contribution de chaque intersection des deux sous-chemins avec une surface est ajoutée à la valeur du pixel. Le lien entre les intersections du rayon caméra avec une surface et toutes les intersections du rayon lumière avec une surface permet également d'ajouter une nouvelle contribution au pixel (figure 2.4b).



(a) Tracé de chemin monodirectionnel

(b) Tracé de chemin bidirectionnel

FIGURE 2.4 – Méthodes de tracé de chemin mono et bidirectionnel. Les rayons d'observations sont représentés en noir, les rayons partant des sources en jaune et les contributions en traits pointillés.

Veach et Guibas [VG94] présentent également une autre évolution du tracé de chemin utilisant une méthode de Monte-Carlo : le transport de lumière Metropolis (*Metropolis Light Transport*) [VG97, HH10, LKL⁺13]. Une première passe d'échantillonnage aléatoire par tracé de chemin mono ou bidirectionnel est effectuée puis les rayons subissent des mutations aléatoires (par exemple par ajout d'une nouvelle intersection à un chemin existant). Chacune de ces mutations peut être acceptée ou rejetée et le critère d'acceptabilité dépend de la contribution du nouveau chemin à l'image.

Enfin de nombreuses autres méthodes existent telles que le lancer de photons (*Photon Mapping*), présenté par Jensen [Jen96] ou la méthode de cache d'éclairage (*irradiance caching*) présentée par Ward et al. [WRC88]. La méthode de tracé de photon est réalisée en deux passes [Jen01, MM06, KZ11]. La première passe consiste à tirer des rayons dans la scène depuis les sources lumineuses et enregistrer les intersections de ceux-ci avec les objets dans une carte de photons, indépendante du point de vue. La seconde passe estime une image de la scène pour un point de vue donné à partir de la carte de photons. La méthode de cache d'éclairage quant à elle se base sur un calcul de l'éclairage indirect sur un petit nombre de

points de surface. En effet l'éclairage indirect varie peu sur une même surface. Le calcul de l'éclairage indirect n'est donc effectué que pour quelques points, nommés enregistrements, pour lesquels une zone d'influence est définie. Ces enregistrements sont mis en cache et réutilisés par interpolation lors du calcul de l'image.

Dans le cadre d'un système d'acquisition, pour lequel les conditions sont contrôlées et une seule source de lumière est utilisée à la fois, la reproduction de ces conditions peut être réalisée avec une méthode de simulation d'éclairage simple mais fiable. Lorsque le calcul est réalisé pour une unique source de lumière, et en ignorant les réflexions lumineuses multiples, l'équation du rendu associée à un élément de surface dA est simplifiée :

$$L_r(\mathbf{o}) = L_i(\mathbf{s}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_s, \quad (2.7)$$

avec $\cos \theta_s$ dépendant de la normale au point de surface considéré. Dans ces conditions, nous pouvons voir que si la position de la source de lumière, la position du point d'observation et la normale à la surface sont connues, il est possible d'inverser l'équation 2.7 et d'estimer la BRDF à la surface à partir d'une image. C'est le principe utilisé lors de la recherche de la réflectance d'une surface par traitement d'images par des systèmes tels que les gonio-réflectance-mètres ou les gonio-photomètres. La recherche de la fonction de réflectance complète d'un matériau implique alors un échantillonnage sur les quatre dimensions de la fonction. La mise en place de ce type de système passe donc par le positionnement de plusieurs sources de lumière (ou une source mobile) de position connue, de même pour le/les capteur(s) et peut être fastidieuse. Une validation préalable de la configuration du système est alors essentielle et peut se faire grâce à la réalisation d'images de synthèse reproduisant les mêmes conditions d'acquisition. Pour cela, les images produites doivent être le plus proche possible de la réalité, donc non biaisées et présentant peu de bruit. Un algorithme particulièrement adapté aux sources ponctuelles et à l'éclairage indirect des objets d'une scène est le tracé de chemin bidirectionnel. Cependant dans ce type de système d'acquisition, seule une source ponctuelle éclaire la scène et les inter-réflexions sont évitées. Les figures 2.5 et 2.6 permettent de comparer les résultats obtenus pour différents algorithmes couramment utilisés. Les comparaisons de différentes méthodes de rendu montre que le tracer de chemin bidirectionnel donne de bons résultats en des temps de calcul intéressants (figure 2.5). Selon les matériaux constituant les objets de la scène, les résultats peuvent cependant être bruités (figure 2.6). Ceci est souvent dû à l'utilisation d'une intégration par méthode de Monte-Carlo avec un échantillonnage non approprié à la fonction de réflectance utilisée. C'est le cas pour des surfaces rugueuses dont la fonction de distribution des orientations des microfacettes est à haute fréquence, de forme semblable à une fonction Gaussienne. La variance de l'estimateur de Monte-Carlo, pouvant être forte avec un échantillonnage uniforme, peut alors être réduite par l'utilisation d'un échantillonnage par importance mieux adapté à la fonction à échantillonner. Ces méthodes sont présentées dans le chapitre suivant (section 3.1.3) et permettent des calculs rapides et non biaisés de la réflectance de ces surfaces.

2.2 Acquisition de la réflectance

L'acquisition de réflectance sur des objets réels intervient dans de nombreux domaines, de la reproduction virtuelle d'objets historiques à la réalisation d'effets spéciaux réalistes. Afin de réaliser des mesures, de nombreux systèmes d'acquisition ont été proposés dans la littérature. Selon l'étude, différentes fonctions de réflectance sont recherchées, pour lesquelles

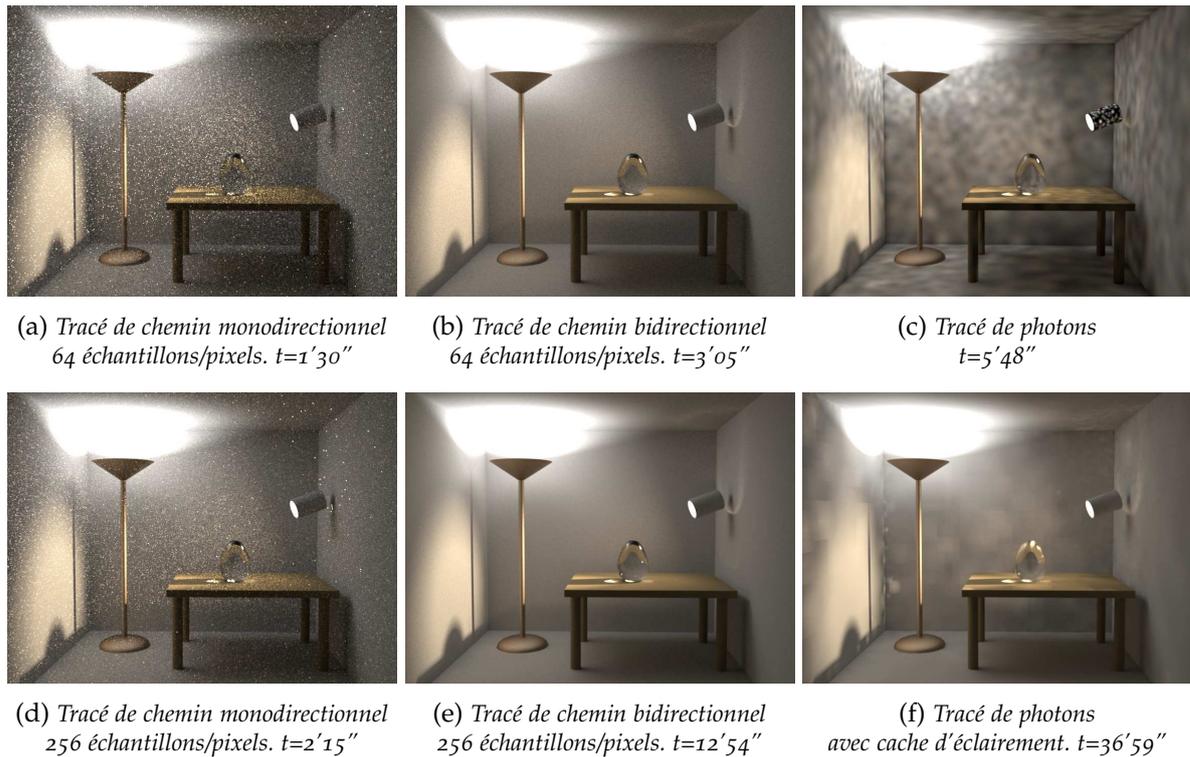


FIGURE 2.5 – Application de différentes méthodes de rendu à une scène proposée par le logiciel Mistuba [Jak10], t représente le temps nécessaire au calcul de l'image.

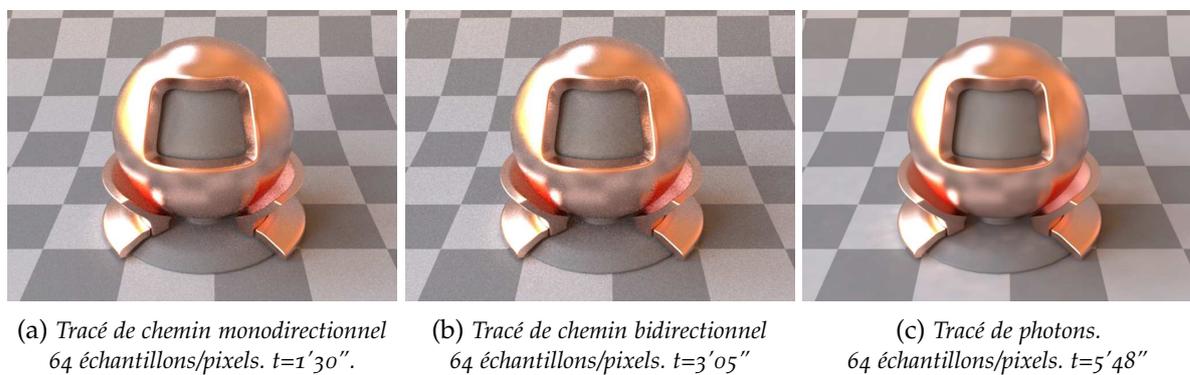


FIGURE 2.6 – Application de différentes méthodes de rendu à un objet de test composé d'une surface spéculaire rugueuse.

les conditions d'acquisition sont plus ou moins complexes. Par exemple la BRDF est une fonction décrivant la proportion de lumière réfléchiée dans une direction d'observation par rapport à l'éclairage provenant d'une direction d'incidence. Elle dépend donc des angles zénithaux et azimutaux des directions d'incidence et d'observation par rapport à la normale. La connaissance des positions des sources et du capteur ainsi que la normale à la surface sont nécessaires pour la mesure de cette fonction. Pour la SVBRDF (pour *Spatially Varying Bidirectional Reflectance Distribution Function*), les conditions d'acquisition sont plus complexes. En effet la prise en compte de la répartition spatiale sur la surface correspond alors à une fonction à six dimensions. L'acquisition de la BRDF d'une surface passe dans tous les cas par la réalisation de mesures pour différentes directions d'incidence et d'observation pour une surface de normale connue ou estimée, et, en plus, différents points de surface pour l'acquisition d'une SVBRDF. Pour cela certains systèmes considèrent des échantillons de

surface plans ou des objets de géométrie connue, afin de disposer des normales à la surface. Lorsque l'acquisition concerne des objets dont la géométrie n'est pas connue, un système de reconstruction tridimensionnelle est utilisé afin d'estimer préalablement la normale à la surface. L'utilisation de tels systèmes pour l'acquisition de la réflectance n'est pas un problème trivial. En effet, dans l'optique d'élaborer un système automatisé, l'intégration du processus de reconstruction tridimensionnel dans le système d'acquisition de la réflectance est préférable à l'utilisation de différents systèmes impliquant souvent des temps de calculs plus long, des manipulations supplémentaires et un recalage de la géométrie et de la réflectance pouvant introduire des erreurs.

La mise en place d'un système d'acquisition de la réflectance sur des objets de géométrie inconnue implique un contrôle précis des conditions d'acquisition : position et calibration des sources, position d'observation et calibration radiométrique, reconstruction tridimensionnelle. Cette section détaille les éléments importants et nécessaires à cette mise en place ainsi qu'une classification des systèmes d'acquisition de la réflectance. Nous présentons également le principe des capteurs utilisés, les bruits et problèmes de dynamique pouvant perturber le signal acquis et les solutions afin de limiter ces erreurs.

2.2.1 Systèmes de mesures

L'acquisition de fonctions de réflectance peut être faite en laboratoire au moyen de systèmes automatisés. Un grand nombre de travaux ont été présentés dans la littérature à ce sujet. Les systèmes peuvent être classés en trois principales familles dépendant de la configuration adoptée : la famille des gonio-réfectomètres et des gonio-photomètres, la famille des systèmes à base de miroirs et la famille des systèmes constitués d'un ensemble de capteurs et/ou de sources. Les gonio-réfectomètres et les gonio-photomètres utilisent un capteur (ou un APN) et une source de lumière disposés sur des supports permettant leur mouvement de manière à couvrir toutes les directions d'incidence et d'observation possibles. Les systèmes à base de miroirs proposent l'utilisation d'un capteur de position fixe, d'une source de position fixe ou variable et enfin d'un ou plusieurs miroirs (parfois hémisphériques) afin de capter un grand nombre de directions d'observation à la fois, de manière à réduire les temps d'acquisition. Enfin les systèmes utilisant un ensemble de capteurs et/ou de sources sont semblables aux gonio-photomètres mais limitent les mouvements du système en fixant la position de plusieurs capteurs et/ou sources. Quel que soit le type de système choisi, le principe reste le même : l'échantillonnage des dimensions de la fonction doit être réalisé selon un pas choisi en fonction du degré de précision souhaité.

Gonio-réfectomètres et gonio-photomètres :

La configuration des gonio-réfectomètres permet d'illustrer l'échantillonnage des dimensions des fonctions recherchées (figure 2.7) : les degrés de liberté possibles peuvent être obtenus par mouvement de la source (deux degrés de liberté : mouvement en θ_s et en ϕ_s), du capteur (deux degrés de liberté : mouvement en θ_o et en ϕ_o) et rotation de l'échantillon (un degré de liberté) permettant de remplacer une rotation des arcs en ϕ_s ou ϕ_o [NRH⁺77, Foo97, WSB⁺98, BVD⁺07]. Ainsi pour un échantillon de surface plan, pour chaque direction d'observation possible (échantillonnées sur l'hémisphère supérieur à la surface), les mesures sont réalisées pour chaque direction d'incidence de lumière possible (échantillonnées également sur l'hémisphère supérieur à la surface). Un mouvement du capteur et/ou de la source de lumière est donc réalisé entre chaque mesure. Une acquisition complète et précise de la fonction de BRDF peut donc prendre plusieurs heures. Le temps d'acquisition est cependant moins important pour

une BRDF isotrope, dépendant uniquement de trois dimensions et nécessitant donc moins de déplacement des éléments du système [LFTWo6] : elle dépend de θ_s et θ_o , les angles zénithaux d'incidence de la lumière et d'observation et $\phi_o - \phi_s$ l'angle azimutal au plan d'incidence.

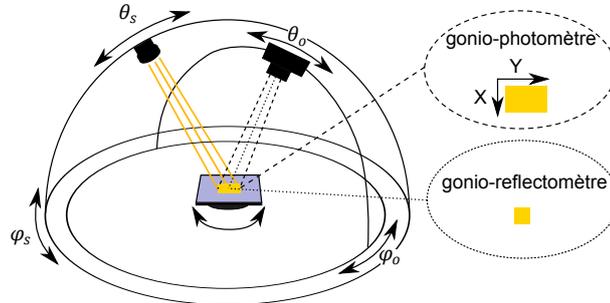


FIGURE 2.7 – Degrés de liberté possibles pour un gonio-réflexomètre et un gonio-photomètre : mouvement en θ_s , ϕ_s de la source, mouvement en θ_o , ϕ_o du capteur (un seul capteur photosensible pour un goniomètre ou APN pour un gonio-photomètre), rotation de l'échantillon permettant de remplacer une rotation des arcs en ϕ_s ou ϕ_o . Enfin l'acquisition d'image permet de couvrir deux degrés de liberté supplémentaires : parcours de l'image en X et Y. Ainsi un gonio-réflexomètre atteint quatre degrés de liberté et permet d'acquérir une fonction de réflectance à quatre dimensions et un gonio-photomètre atteint six degrés de liberté et permet d'acquérir une fonction de réflectance à six dimensions.

Par ailleurs l'acquisition d'une fonction de réflectance dépendant d'un plus grand nombre de dimensions, peut être réalisée grâce à l'utilisation un appareil photographique numérique (figure 2.7). Ces systèmes, appelés gonio-photomètres, suivent le même principe que les gonio-réflexomètres : il s'agit d'échantillonner la fonction grâce à des positions de sources et/ou de capteur différentes. L'acquisition d'une image pour chaque couple direction d'incidence/direction d'observation possible, permet d'acquérir un grand nombre de points de mesure en même temps et donc de disposer des informations de réflectance pour plusieurs points de surface : les deux degrés de liberté supplémentaires obtenus permettent d'atteindre un système à six degrés de liberté. Selon les laboratoires, différentes configurations sont utilisées afin d'atteindre la souplesse d'acquisition suffisante. Par exemple le système proposé par McAllister et al. [MLHo2] propose un gonio-photomètre pour la mesure d'une SVBRDF isotrope présentant deux degrés de liberté sur l'orientation de la surface et un degré de liberté sur le mouvement de la source de lumière ; ou encore le système proposé par Dana et al. [DvGNK99], qui permet l'acquisition d'une SVBRDF anisotrope (ou d'une BRDF, par calcul de la moyenne des valeurs des pixels d'une image) grâce au mouvement de la caméra et de l'échantillon, la lumière restant de position fixe. De même que pour ces gonio-réflexomètres, les temps d'acquisition peuvent être importants (de dix heures [KMBK03] à soixante heures [RSK10]). Enfin, pour se passer d'un ou plusieurs degrés de liberté et ainsi effectuer des acquisitions plus rapides et/ou pour des objets de forme plus complexe, une approche alternative consiste à utiliser des surfaces courbes [MWLT00, LKK98] ou des objets de forme plus complexe mais connue [Mar98, MWL+99]. Par exemple, la forme cylindrique d'un objet permet de remplacer le mouvement en θ de la source ou de l'APN grâce à l'orientation des normales sur la surface de l'objet (figure 2.8). De même une sphère permettra de remplacer le mouvement en θ et ϕ de la source ou de l'APN.

La mise en œuvre d'un système d'acquisition de type gonio-réflexomètre ou gonio-photomètre demande un contrôle précis des mouvements du capteur et de la source de lumière et/ou de l'échantillon. En effet, pour que les acquisitions soient reproductibles et fiables, les positions de chaque élément doivent être connues de façon précise et immuable entre chaque acquisition. Cette mise en place bien que coûteuse et complexe à réaliser permet une grande

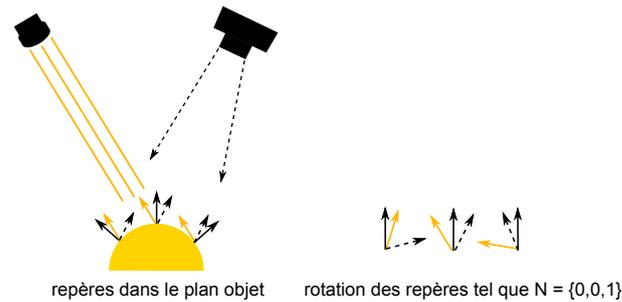


FIGURE 2.8 – Gonio-photomètre réalisant des acquisitions sur un objet de forme cylindrique. La rotation des repères locaux à la surface de l'objet, de manière à ce que la normale devienne $\{0, 0, 1\}$, permettent de remplacer un degré de liberté en θ_s ou θ_o .

répétabilité des acquisitions.

Systemes d'acquisition de réflectance à base de miroirs :

Les mouvements de source, de capteur ou de l'échantillon sont complexes à maîtriser et engendrent des temps d'acquisition importants. Différents systèmes utilisant un miroir ou un ensemble de miroirs ont donc été imaginés afin de limiter ces mouvements. Cette astuce matérielle permet, à l'image de l'utilisation d'objets cylindrique, sphérique, ou de géométrie connue, de remplacer les mouvements en θ et/ou ϕ de l'APN et de la source. L'APN, de position fixe, en prenant une photographie du miroir hémisphérique placé au-dessus d'un échantillon de surface plan permet l'acquisition simultanée de nombreuses directions d'observation (figure 2.9). En effet chaque point du miroir reflète le même point sur l'objet mais vu d'une direction d'observation différente. L'acquisition d'une *BRDF* isotrope demande alors un degré de liberté supplémentaire sur l'orientation de la source de lumière, et deux pour une *BRDF* anisotrope. De nombreuses configurations sont alors possibles. Par exemple, Ward [Wag92] propose un mouvement de la source de lumière en θ afin d'acquérir la *BRDF* d'une surface isotrope et une rotation de l'échantillon permet d'acquérir la *BRDF* d'une surface anisotrope (figure 2.9 (a)). Ward réalise des acquisitions sur différents matériaux anisotropes afin de proposer et valider un modèle de *BRDF*. La figure 2.9 (a) illustre également une extension possible, évoquée par Weyrich et al. [WLL⁺09], du système permettant d'obtenir un degré de liberté supplémentaire par translation de l'échantillon. Ceci permet d'acquérir la *SVBRDF* d'une surface anisotrope.

La figure 2.9 illustre d'autres configurations possibles de systèmes à base de miroirs présentés dans la littérature. Dana et Wang [DW04] proposent d'utiliser un miroir parabolique afin de réfléchir la lumière vers le miroir hémisphérique. Ainsi la source de lumière n'effectue plus un déplacement sur un arc mais uniquement un mouvement de translation (figure 2.9 b). La réflexion de la lumière sur le miroir parabolique permet d'orienter le rayon lumineux vers le miroir hémisphérique puis vers l'échantillon étudié et ainsi de couvrir toutes les configurations θ_s possibles. Cette configuration permet l'acquisition d'une *BRDF* isotrope, et l'ajout d'une translation de l'échantillon permet d'acquérir la *SVBRDF*. Afin de réduire le mouvement de sources et donc d'augmenter la répétabilité des acquisitions, il est également possible d'utiliser un ensemble de sources de lumière de position fixe ou un projecteur digital [GAHO07, MSY07] (figure 2.9 c). Tel qu'évoqué par Weyrich et al. [WLL⁺09] ces systèmes, élaborés pour l'acquisition de fonctions de *BRDF*, peuvent être étendus à l'acquisition de *SVBRDF* par translation de l'échantillon. Enfin, dans le but de se passer de tout mouvement dans le système d'acquisition, un arrangement de miroir en kaléidoscope (figure 2.9 d) peut être mis en place [HP03, IRM⁺12]. Dans ce cas les différents miroirs permettent d'obtenir simultanément un grand nombre de directions d'observation et d'incidence de la

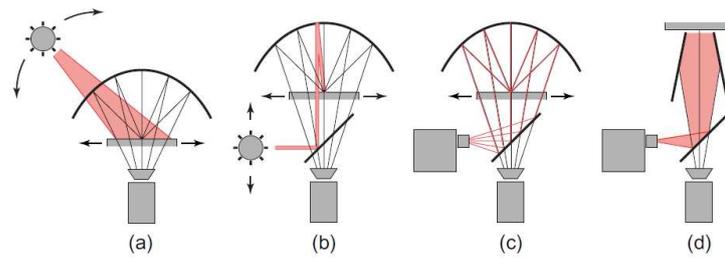


FIGURE 2.9 – Différentes configurations de système à base de miroirs possibles. L'utilisation d'un miroir hémisphérique, placé au-dessus de l'échantillon, permet de remplacer les mouvements en θ et/ou ϕ de l'APN et de la source. L'APN, de position fixe prend une image du miroir qui reflète un point de la surface sous différentes directions d'observation. (a) : Configuration du système de Ward [War92], la source effectue une rotation en θ_s pour l'acquisition d'une BRDF isotrope, et l'échantillon effectue une rotation supplémentaire pour l'acquisition d'une BRDF anisotrope. (b) : Configuration du système de Dana et Wang [DW04], l'ajout d'un miroir parabolique permet de remplacer le déplacement de la source sur un arc par une translation. (c) : la translation de la source peut être remplacée par un ensemble de sources ou un projecteur [GAHO07, MSY07]. (d) Arrangement de miroirs en kaléidoscope. Pour ces différentes configurations, l'ajout d'un degré de liberté par translation de l'échantillon permet l'acquisition de la SVBRDF [WLL⁺09]. Image tirée de [WLL⁺09].

lumière. Un arrangement elliptique de miroirs [LCV⁺04, GTLL06, MTK⁺11] permet également de réaliser l'acquisition de SVBRDF grâce à une seule image en utilisant les réflexions multiples.

Ce type de système permet des acquisitions plus rapides en limitant les mouvements des différents outils mais les irrégularités pouvant être présentes sur les miroirs engendrent des erreurs dans les mesures.

Utilisation d'un ensemble de capteurs et/ou de sources :

Afin d'augmenter la répétabilité des mesures, certains systèmes proposent de limiter les mouvements grâce à l'utilisation d'un ensemble de capteurs et/ou de sources de positions fixes. Différentes configurations ont été présentées dans la littérature, par en faisant varier le nombre de caméras et de sources employées et l'utilisation ou non de mouvement pour une partie du système. Les systèmes proposés par Debevec et al. [DHT⁺00] et Hawkins et al. [HCD01] proposent une évolution des gonio-photomètres vers des systèmes où les mouvements sont limités. Par exemple le système de Debevec et al. utilise deux caméras à grande vitesse et deux degrés de liberté pour la position d'une source de lumière. Le système proposé par Hawkins et al. est similaire mais utilise 27 sources de lumière disposées sur un arc tournant. Enfin la limitation totale de mouvement dans le système est obtenue lorsque les sources de lumière sont positionnées sur un dôme et échantillonnent ainsi tout l'hémisphère supérieur des directions d'incidence, avec un échantillonnage dépendant du nombre de sources et de leur disposition [DWT⁺02, WGT⁺05]. Un nombre de directions d'observation limité pour un échantillon de surface plan ne permet cependant pas une reconstruction dense de la fonction de réflectance. Afin d'augmenter les directions d'observation disponibles, un plus grand nombre de caméras peuvent être utilisées [WMP⁺05, HQS10, HWQ13] (figure 2.10) ou la surface d'étude peut être placée sur un plateau tournant [FKIS02, MPN⁺02b, MPN⁺02a, TWL⁺05]. Les temps d'acquisitions sont également réduits grâce à l'acquisition simultanée par toutes les caméras, mais les coûts de mise en place sont également plus élevés (de même pour l'augmentation du nombre de sources de lumière).

Ces systèmes, de même que les systèmes utilisant des miroirs, augmentent la répétabilité des acquisitions et réduisent les temps d'acquisition grâce à la limitation des mouvements de capteurs/sources et/ou échantillons. Mais l'ajout de sources de lumière ou de caméras



FIGURE 2.10 – Système d’acquisition proposé par Schwartz et al. [SSW⁺14], constitué de 151 caméras, 151 lumières LED et 9 projecteurs afin d’effectuer une reconstruction préalable de la géométrie des objets.

augmente en contrepartie les coûts de mise en place.

Discussion :

L’acquisition des fonctions de réflectance passe par un échantillonnage plus ou moins fin de l’espace des directions. Ainsi les systèmes visant la mesure de ces fonctions doivent présenter autant de degrés de liberté que la fonction a de dimensions. Les gonio-photomètres illustrent la possibilité d’obtenir deux degrés de liberté sur les directions d’incidence de lumière et d’observation par mouvement des sources et de l’APN, un degré par rotation de l’échantillon et deux degrés sur le parcours de l’image. Différents auteurs se sont penchés sur la mise en place d’alternatives à ces mouvements, qui malheureusement entraînent des temps d’acquisition très importants. Par exemple l’utilisation d’un miroir hémisphérique permet de réduire les mouvements des capteurs mais présente néanmoins l’inconvénient d’entraîner des erreurs d’estimation dues aux imperfections des miroirs. L’utilisation d’un ensemble de caméras permet également l’échantillonnage des directions d’observation sans mouvement de capteur avec des temps d’acquisitions plus restreints, mais représente un coût de mise en place non négligeable. De même, les mouvements de sources de lumière peuvent être remplacés par un ensemble de sources disposées sur un dôme. Enfin l’utilisation d’objet de forme cylindrique, sphérique ou quelconque, et dont la géométrie est connue, associé à l’acquisition d’images, donne un ou deux degrés de liberté. Le cas particulier d’objet de forme non connue peut également être géré par l’estimation préalable de la géométrie au moyen d’un système de reconstruction tridimensionnel. De nombreux de systèmes ont été présentés et diffèrent par la technique de reconstruction utilisée, la précision, le coût de mise en place et le temps d’acquisition. Une reconstruction précise de la surface est nécessaire pour une estimation précise de la réflectance mais l’utilisation d’un système de reconstruction en complément d’un système d’acquisition de réflectance n’est pas un problème simple. En effet l’élaboration d’un système d’acquisition de réflectance automatisé nécessite la mise en place d’un système de reconstruction tridimensionnelle intégré. Dans le cas contraire, un recalage des données géométrique et de réflectance est nécessaire et peut être coûteux en termes de temps et engendrer des erreurs. L’acquisition conjointe d’une fonction de BRDF et de la géométrie d’un objet nécessite l’échantillonnage de six dimensions dans le cas d’une surface anisotrope (les quatre dimensions de la BRDF et deux dimensions supplémentaires pour les gradients de la surface) et cinq pour une surface considérée isotrope.

Ce type de système ne permet pas d’estimer la réflectance pour des angles rasants du à l’augmentation de la surface visible de l’échantillon pour ces directions. En effet, pour

une estimation correcte de la réflectance, l'aire de l'échantillon visible depuis le capteur doit être suffisamment petite et uniforme pour toutes les directions d'incidence et d'observation. Or aux angles rasants, la surface visible de l'échantillon devient plus large que pour des directions d'observation moins rasantes. L'estimation de la réflectance devient donc difficile pour ces cas particuliers. De plus, la luminance réfléchiée par les objets diminue pour des directions rasantes, rendant d'autant plus difficile l'estimation de la réflectance et plus sujette aux bruits d'acquisition. Comme pour tous les systèmes munis de capteurs photosensibles, les bruits de capture peuvent perturber la mesure et la dynamique du capteur limite la plage de valeurs de réflectance acquises. Cette dernière limitation peut s'avérer problématique dans le cadre de l'acquisition de la réflectance d'une surface, en particulier pour un matériau brillant pouvant prendre des valeurs très faibles pour la partie diffuse et très importantes pour la partie spéculaire. Pour un système d'acquisition à base d'images, cette limite peut être contournée par une acquisition d'image à haute gamme dynamique (ou HDR).

2.2.2 Capteur photographique

L'utilisation d'un capteur photosensible implique une étape de calibration optique et radiométrique. Dans le cas d'un système d'acquisition de la réflectance d'une surface, la correspondance entre la luminance réfléchiée par la surface et les valeurs numériques acquises doit être déterminée. Nous présentons ici le principe général de la capture du flux lumineux par un appareil photographique ainsi que la gestion du bruit de capture et des limitations de dynamique afin de trouver cette correspondance.

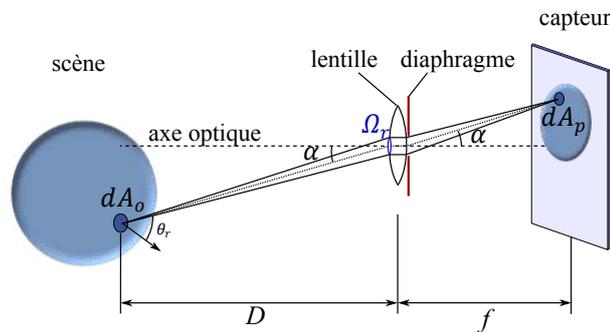


FIGURE 2.11 – Système de formation d'images. La lumière collectée par la lentille à partir de l'élément de surface dA_0 de l'objet est projetée sur l'élément de surface dA_p du capteur.

Les appareils photographiques sont composés d'un objectif permettant de former l'image de la scène sur le capteur traduisant l'information lumineuse en valeurs numériques. Les objectifs sont composés de plusieurs lentilles divergentes et convergentes mais ils peuvent être modélisés par une unique lentille convergente équivalente (figure 2.11), positionnée à une distance f du capteur, appelée distance focale. A cette lentille s'ajoute un diaphragme d'ouverture d_l . La lumière provenant d'un élément de surface dA_0 d'un objet de la scène et passant par la lentille, est projetée sur un élément de surface dA_p du capteur numérique. L'énergie reçue par le capteur est égale au flux total émis ou réfléchi par dA_0 dans l'angle solide formé par le cône passant par l'ouverture du diaphragme de diamètre d_l [HS79] :

$$d\Phi_L = dA_0 \int_{\Omega_r} L_r \cos \theta_r d\omega_r, \quad (2.8)$$

avec Ω_r l'angle solide projeté sur la lentille, délimité par l'ouverture du diaphragme (figure 2.11). La direction entre un point de surface considéré et le centre du cône sous-tendu

par cet angle solide permet de définir θ_r l'angle entre la normale à la surface et cette direction et α l'angle entre l'axe optique et cette direction. Le calcul des angles solides et la relation entre eux permet d'écrire [HS79] :

$$(dA_0 \cos \theta_r) / D^2 = (dA_p \cos \alpha) / f^2. \quad (2.9)$$

L'éclairement est un flux incident par unité de surface ($E_p = d\Phi_L / dA_p$) et la distance D est considérée grande devant la taille de l'ouverture du diaphragme d_l , dans ces conditions l'angle solide Ω_r vu depuis l'échantillon de surface et égale à $\frac{\pi}{4} d_l^2 \cos \alpha$ divisé par la distance $\frac{D}{\cos \alpha}$. La relation entre angle solide permet d'obtenir l'aire dA_0 :

$$dA_0 = \frac{dA_p \cos \alpha D^2}{f^2 \cos \theta_r}, \quad (2.10)$$

Ainsi, la formulation de l'éclairement reçu par la surface du capteur en considérant une luminance constante et en remplaçant Ω_r est :

$$\begin{aligned} E_p &= dA_0 \int_{\Omega_r} L_r \cos \theta_r d\omega_r / dA_p, \\ &= \frac{D^2 \cos \alpha D^2}{f^2 \cos \theta_r} \int_{\Omega_r} L_r \cos \theta_r d\omega_r, \\ &= \frac{D^2 \cos \alpha D^2}{f^2 \cos \theta_r} L_r \cos \theta_r \frac{\pi/4 d_l^2 \cos \alpha}{(D / \cos \alpha)^2}, \\ &= L_r \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{d_l}{f}\right)^2 \cos^4 \alpha. \end{aligned} \quad (2.11)$$

L'éclairement de la scène est : $L_r k$ avec $k = \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{d_l}{f}\right)^2 \cos^4 \alpha$. Dans le cas d'une configuration permettant de s'approcher d'une projection orthographique, tous les rayons sont perpendiculaires au plan image donc $\cos \alpha = 1$. k est alors constant sur l'image et l'éclairement est proportionnel à la luminance de la scène. La luminance (équation 2.4) dépend de l'éclairement incident reçu par la surface et de la fonction de réflectance, elle-même dépendante de la normale et des caractéristiques du matériau.

Cependant, la traduction de l'éclairement en valeur numérique n'est pas parfaite. En effet les différentes étapes de conversion et les limitations du capteur influence les valeurs enregistrées (figure 2.12). Le capteur se compose d'une matrice de photosites transformant les photons du flux lumineux reçu en électrons e^- , d'un circuit de lecture convertissant les électrons en tension et enfin du convertisseur analogique/numérique (CAN) qui convertit la tension en une valeur numérique M quantifiée sur Q Bits.

Le flux incident est converti en valeurs électriques par une matrice de photosites. Les photons du flux lumineux sont convertis en photo-électrons proportionnellement au temps d'exposition t [HDF10] :

$$\Delta V = \min \left\{ \frac{E_p t}{g} + \Delta V_0 + \mathcal{B}, \Delta V_{max} \right\}, \quad (2.12)$$

avec E_p l'éclairement exprimé en électrons par seconde, g le gain du capteur (basé sur la sensibilité ISO), ΔV_0 le courant noir, ΔV_{max} le nombre maximum d'électrons pouvant être

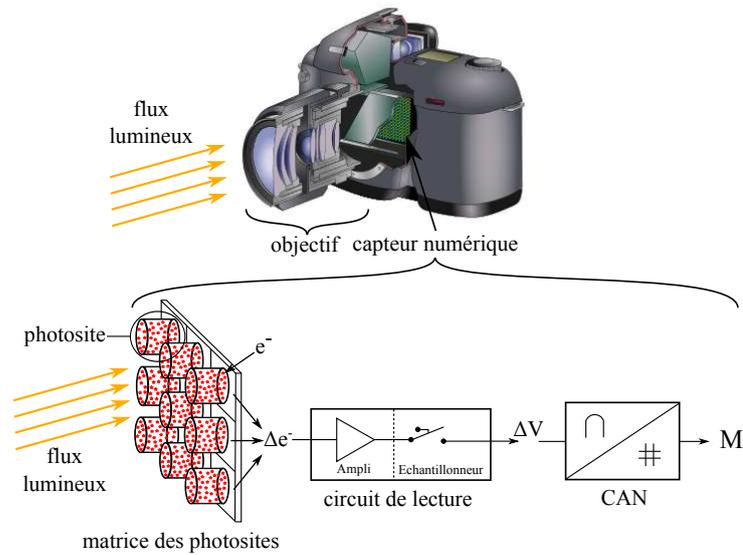


FIGURE 2.12 – Information lumineuse reçue par l'APN et convertie en valeur numérique. Les photons du flux lumineux sont captés par les photosites, convertis en tension par le circuit de lecture puis en valeur numérique quantifiée par le convertisseur analogique/numérique.

captés et \mathcal{B} le bruit issu du processus d'acquisition. Ce bruit peut provenir de trois sources indépendantes : le bruit de capture (probabilité qu'une cellule photosensible capte un photon), le bruit de lecture (transfert des électrons du capteur vers le convertisseur) et le bruit de conversion analogique/numérique (limitation du CAN due à la quantification du signal en valeur numérique sur Q bits). Ce bruit peut être traité comme une variable aléatoire de moyenne nulle et dont la variance est égale à l'addition de trois termes :

$$\text{Var}(\mathcal{B}) = \frac{E_p t}{g^2} + \frac{\mathcal{B}_{\text{read}}^2}{g^2} + \mathcal{B}_{\text{ADC}}^2, \quad (2.13)$$

Le premier terme représente la fonction de distribution de capture ou non de photons. Celle-ci n'est pas linéaire et dépend du temps d'intégration. Cette distribution suit une loi de Poisson [FTKEo8, LSK⁺o8] : pour un temps d'intégration t la moyenne de photon attendue est N avec un écart type \sqrt{N} . La fluctuation induite par l'écart type produit le bruit de photon. Le deuxième terme de l'équation 2.13 correspond au bruit de lecture et le dernier terme au bruit de conversion analogique-numérique. Les deux derniers termes sont indépendants de la scène et peuvent être évalués à partir d'une image d'une mire blanche puis soustraits [HK94, LSK⁺o8].

La diminution des erreurs de quantification et les limitations induites par la dynamique des capteurs nous intéressent particulièrement car elles entraînent un écart entre les valeurs réelles d'éclairement et les valeurs numériques estimées. Pour un capteur à Q bits, l'information d'éclairement de la scène est convertie et quantifiée en 2^Q valeurs numériques possibles. Pour une quantification uniforme, le signal arrivant au CAN est divisé en 2^Q plages d'égale dimension dont la taille dépend de l'étendue des valeurs à quantifier. La limitation imposée par le nombre de bits disponibles impose donc un choix entre dynamique de la scène et taille du pas de quantification. Pour un même nombre de bits, plus le pas de quantification est faible, plus la dynamique capturée est faible, inversement plus il est grand plus la dynamique peut être grande mais la précision est plus faible (une faible variation d'éclairement donne la même valeur numérique).

La dynamique globale du capteur correspond à l'écart entre la valeur la plus basse et la valeur la plus haute dans l'image. Elle se mesure en décibel (dB) et est estimée de la façon suivante : $\mathcal{D} = 20 \log(Val_{max}/Val_{min})$. Les capteurs peuvent atteindre jusqu'à $96 dB$ (pour un capteur à 16 bits) tandis que la luminance d'une scène peut facilement aller jusqu'à $120 dB$. Lorsque la dynamique de la scène est plus grande que celle du capteur, des zones de surexpositions ou de sous-exposition apparaissent sur les images. La production d'images à haute gamme dynamique (*High Dynamic Range* : HDR), permet d'augmenter la dynamique d'une image [MP95, DM97, MN99] ou affiner son pas de quantification [BBK13, GN03]. Ces images peuvent être obtenues grâce à une prise de vue multi-expositions qui consiste à réaliser un nombre U d'acquisitions en faisant varier pour chacune le temps d'exposition t_u ou le gain d'amplification g_u afin de modifier la plage dynamique acquise. Avec un faible temps d'exposition ou un faible gain on obtient plus de détails (plus de valeurs d'éclairément) sur les zones sombres. Avec l'augmentation de ces paramètres, la plage des valeurs acquises est décalée sur les zones claires (figure 2.13). La fusion de ces images consiste généralement à estimer les valeurs d'éclairément \hat{E}_u pour chaque exposition, puis une somme pondérée des valeurs de chaque acquisition [DM97] :

$$\hat{E}_f = \frac{\sum_u \omega(M_u) \hat{E}_u}{\sum_u \omega(M_u)}, \quad (2.14)$$

avec ω une fonction de poids introduite afin de réduire le bruit et éliminer les valeurs limites M . Cette fonction diffère selon les méthodes [KA06, GAW⁺10].



(a) image LDR sous exposée
temps d'ouverture = 0.25 sec

(b) image LDR
temps d'ouverture = 2 sec

(c) image LDR sur exposée
temps d'ouverture = 3.2 sec

(d) image HDR
reconstruite

FIGURE 2.13 – Fusion d'image LDR du "memorial church" de l'Université de Harvard en une image HDR. Images issues de l'article de Debevec et Malik [DM97].

L'utilisation de méthodes d'acquisition HDR permet d'étendre la dynamique des images mais également, pour certaines méthodes [BBK15], d'estimer au plus juste les valeurs d'éclairément. Dans le cadre de la recherche de la fonction de réflectance de matériaux au moyen d'acquisitions d'images, chaque valeur d'éclairément de l'image permet d'estimer une valeur de la fonction de BRDF. Ainsi plus les valeurs d'éclairément estimées par le système d'acquisition sont justes, plus les points de mesure de la fonction de réflectance le sont également.

2.3 Modèles de réflectance

Les données de réflectance mesurées grâce aux systèmes d'acquisition utilisant des images permettent d'estimer une fonction de réflectance partielle dont l'échantillonnage dépend de la configuration du système. Les données aux directions d'incidence et d'observation rasantes ne peuvent pas être estimées avec précision au moyen de ce type de système car l'angle solide sous-tendu par la surface devient trop faible. L'échantillonnage des données implique également des pertes sur les hautes fréquences (un matériau présentant un pic spéculaire très fin par exemple) du fait d'un pas de mesure éventuellement trop faible. En pratique, une fonction de BRDF complète et finement échantillonnée est difficile à obtenir et les temps d'acquisition sont souvent prohibitifs. La BRDF partielle acquise définit un profil de réflexion du matériau étudié. Les données acquises peuvent être stockées sous différentes formes (tableau, base de fonction par exemple) puis réutilisées pour la production d'images.

Le problème de l'analyse des points de mesure obtenus et de leur interprétation se pose également. Pour cela, l'identification des paramètres d'un modèle de réflectance mathématique sur les données acquises permet de compresser l'information et d'avoir une interpolation entre les valeurs de BRDF. C'est le but des modèles à base de fonctions, principalement utilisés pour se passer des stockages coûteux des données brutes. A partir de données de réflectance, la meilleure approximation, déterminée par une fonction d'erreur, entre les données brutes et l'espace des fonctions choisies (par exemple des lobes de Phong, des harmoniques sphériques ou des ondelettes) est trouvée par projection ou par identification. Cependant, les paramètres restent généralement nombreux et correspondent à des coefficients de fonctions de base qui n'ont pas de rapport direct avec les propriétés physiques des matériaux. Dans le cadre d'une recherche des caractéristiques des matériaux étudiés afin d'interpréter le profil de réflexion acquis, ce type de modèle, bien qu'ils permettent d'approcher de façon fidèle les données brutes, ne répond pas aux attentes du fait du grand nombre de paramètres qu'ils utilisent ainsi que l'absence de signification physique de ceux-ci.

Deux autres catégories de modèles mathématiques existent également : les modèles empiriques (ou phénoménologiques) et les modèles à base de microfacettes. Les modèles empiriques proposent une formulation simple pour représenter le comportement de différents types de surface sans soucis de validation physique. Ils se manipulent au moyen de paramètres intuitifs, mais ils ne respectent généralement pas les lois physiques telles que la conservation de l'énergie. A contrario, les modèles à base de microfacettes décrivent la surface par une distribution statistique des orientations de microfacettes. Leurs paramètres, correspondent à des caractéristiques physiques des matériaux (couleur, rugosité, specularité) mais le type de matériau qu'un modèle peut représenter est souvent restreint. Nous proposons dans cette section un survol des modèles empiriques et des modèles à base de microfacettes afin d'introduire les notations utiles pour la suite de l'étude et expliquer nos choix concernant un nouveau modèle à base de microfacettes.

2.3.1 Modèles physiques simples

Selon les propriétés de chaque matériau, la lumière est réfléchi plus ou moins uniformément dans toutes les directions possibles pour les surfaces diffusantes, ou préférentiellement dans la direction de réflexion miroir pour les surfaces spéculaires. Le cas particulier des surfaces planes donne deux cas de réflexion simples à calculer et physiques : une surface plane

diffusante et une surface plane spéculaire (table 2.2).

Une description des surfaces lisses (du point de vue macroscopique, i.e. lorsque la taille des aspérités de la surface est inférieure à la longueur d'onde) et diffusantes (figure 2.14a) est proposé par Lambert dans son article [LAM60]. Ces surfaces, également appelées surfaces Lambertiennes, réfléchissent la lumière uniformément dans toutes les directions de l'hémisphère supérieure à la surface. La luminance réfléchiée par ce type de surface est donc constante dans toutes les directions de Ω_+ et la BRDF Lambertienne s'écrit :

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{K_d}{\pi}, \quad (2.15)$$

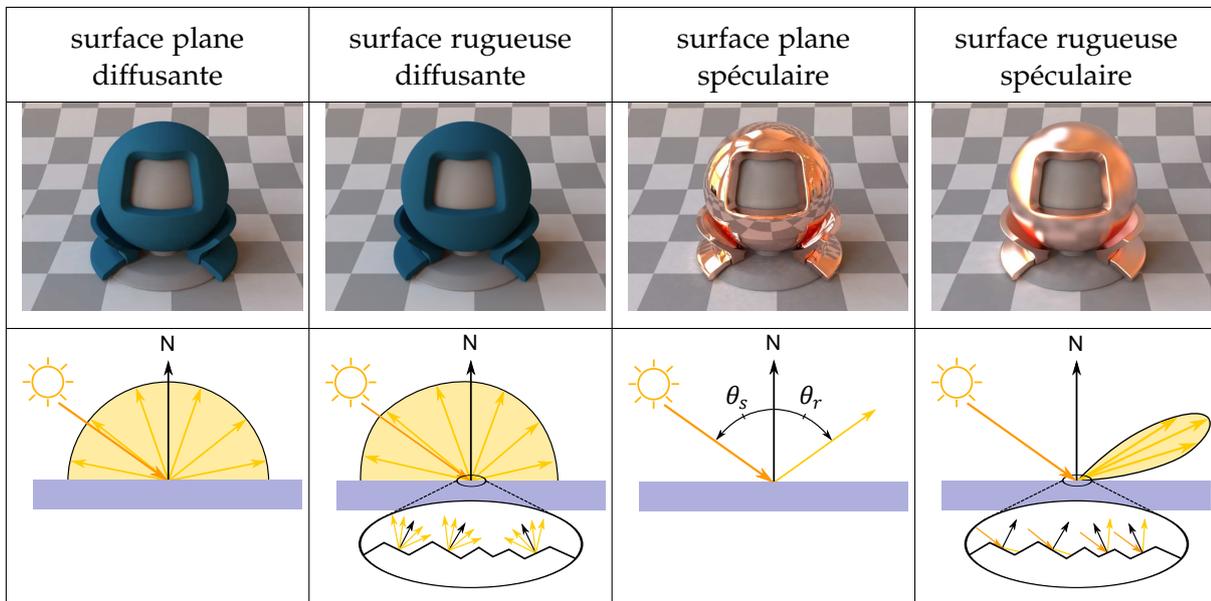
avec K_d le coefficient de diffusion de la surface tel quel $K_d \in [0, 1]$ et est égale à la réflectivité lorsque toute la lumière reçue est réfléchiée par la surface et π résultant de l'intégration sur l'hémisphère supérieure de $\cos \theta_s$.

Lorsque la lumière est entièrement réfléchiée par une surface et qu'il n'y a aucune transmission par l'interface, elle est décrite comme purement spéculaire. La lumière est réfléchiée uniquement dans la direction de réflexion miroir \mathbf{r} . Dans ce cas, le calcul dépend du facteur de Fresnel $F(\mathbf{s}, \mathbf{n})$:

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = F(\mathbf{s}, \mathbf{n}) \frac{\delta_{\omega_o}(\mathbf{r}, \mathbf{o})}{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|}, \quad (2.16)$$

avec δ_{ω_o} la distribution de Dirac associée à l'angle solide élémentaire $d\omega_o$.

TABLE 2.2 – Surfaces planes ou rugueuses, diffuses ou spéculaires. Images produites à l'aide du système de rendu Mitsuba [Jak10].



2.3.2 Modèles empiriques

Les modèles empiriques permettent de représenter des comportements de matériaux réels à l'aide de formulations empiriques. Ils se reposent sur des paramètres intuitifs et ont été élaborés à partir d'observation. C'est le cas du modèle proposé par Phong [Pho75], qui

représente la réflexion spéculaire par des surfaces rugueuses (i.e. dont les aspérités de surfaces sont supérieures à la longueur d'onde : table 2.2). Dans ce cas le lobe spéculaire est élargi autour de direction de réflexion miroir. Pour représenter ce phénomène, une composante spéculaire, simulée par un lobe de cosinus, est ajoutée à une composante diffuse Lambertienne. Le but est de proposer une fonction de réflectance capable d'approcher l'apparence des objets réels pour fournir un certain degré de réalisme dans les images de synthèse. Mais ce modèle ne prend pas en compte les effets de la direction d'incidence de la lumière sur le comportement du lobe spéculaire : lorsque la direction d'incidence de la lumière devient rasante, le lobe spéculaire des données mesurées n'est plus centré autour de la direction de réflexion miroir (table 2.2 : surface rugueuse spéculaire).

Blinn [Bli77] reprend le modèle de Phong et reformule les calculs du vecteur bissecteur \mathbf{h} entre la direction d'observation et la direction d'incidence de la lumière en prenant en compte des considérations physiques et en comparant les résultats avec des mesures expérimentales :

$$f = \frac{K_d}{\pi} + K_s (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{n_B}, \quad (2.17)$$

avec $\mathbf{h} = \mathbf{s} + \mathbf{o} / |\mathbf{s} + \mathbf{o}|$ et n_B permettant de contrôler la taille du lobe spéculaire, et donc le degré de "rugosité" de la surface. Lorsque \mathbf{h} est aligné avec la normale à la surface \mathbf{n} , la réflexion est maximale et lorsque \mathbf{n} s'éloigne de \mathbf{h} , le cosinus de l'angle entre \mathbf{h} et \mathbf{n} permet de mesurer la distance à la direction de réflexion miroir. Les paramètres du modèle sont K_d le coefficient de réflexion diffuse, K_s le coefficient de réflexion spéculaire et n_B . Ils sont ajustés de manière empirique pour représenter des matériaux plus ou moins brillants.

Dans le souci d'utiliser des modèles qui soient physiquement plausibles, Lewis [Lew93] modifie le modèle de Blinn (figures 2.14b et 2.14c) pour qu'il suive les lois de de réciprocity et de conservation de l'énergie (3.2) :

$$f = \frac{K_d}{\pi} + K_s \frac{n_L + 2}{2\pi} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{n_L}, \quad (2.18)$$

avec n_L permettant de contrôler la taille du lobe spéculaire.

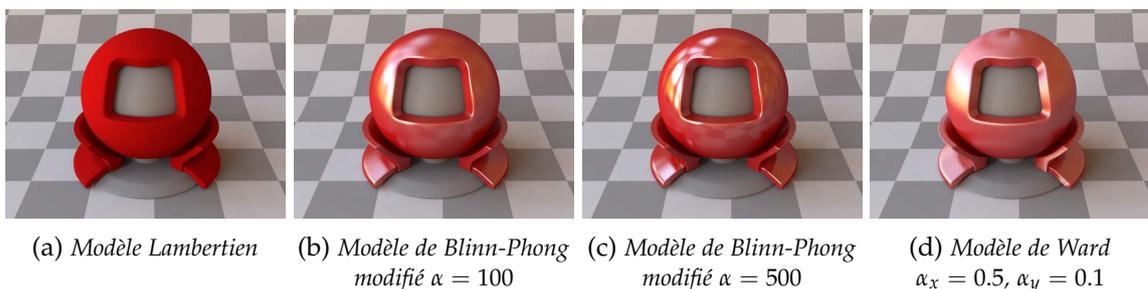


FIGURE 2.14 – Exemple de matériaux diffusant, "glossy", brillant et anisotrope.

2.3.3 Modèles à base de micro-facettes

Les modèles à base de micro-facettes proposent une description physique des surfaces au moyen d'une distribution statistique de microfacettes de réflectance identique pour chacune d'elles. La réflectance des microfacettes peut être purement spéculaire, purement diffuse ou

autre (transparente par exemple). La réflectance de la surface du point de vue macroscopique dépend de sa rugosité, définie par la fonction de distribution, et de la réflexion de la lumière par les facettes. Les phénomènes de masquage et d'ombrage entre les microfacettes sont pris en compte à l'aide d'une fonction d'atténuation géométrique. Le choix de chacune de ces fonctions influence l'apparence de la surface du point de vue macroscopique. Par exemple, en se basant sur l'optique géométrique, le modèle de Torrance et Sparrow [TS67] décrit l'interaction de la lumière avec une surface constituée de microfacettes purement spéculaires. En effet, lorsque la taille de la surface considérée (la taille des microfacettes) est supérieure à la longueur d'onde, les approximations de l'optique géométrique peuvent être utilisées. C'est l'un des premiers travaux prenant en compte les phénomènes physiques d'interaction de la lumière avec la matière pour l'élaboration d'un modèle physiquement réaliste. Blinn [Bli77] montre que pour des directions d'incidences de lumière rasantes le lobe spéculaire des données de réflectance, acquises au moyen de système d'acquisition, n'est pas toujours centré autour de la direction de réflexion miroir. Blinn met en évidence que contrairement au modèle empirique de Phong, le modèle de Torrance et Sparrow permet de reproduire ce phénomène.

Comme le modèle de Torrance et Sparrow, la plupart des modèles à base de microfacettes proposés dans la littérature considèrent souvent des microfacettes purement spéculaires (table 2.2) [TS67, CT82, WMLT07]. Dans ce cas, pour une direction d'incidence de lumière \mathbf{s} et d'observation \mathbf{o} , la réflectance du point de vue macroscopique est issue des réflexions miroirs sur les microfacettes dont la normale est orientée dans la direction bissectrice à \mathbf{s} et \mathbf{o} , notée \mathbf{h} . La BRDF macroscopique est décrite de la manière suivante :

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{F(\mathbf{s}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})}{4|\mathbf{s}, \mathbf{n}||\mathbf{o}, \mathbf{n}|}, \quad (2.19)$$

avec $F(\mathbf{s}, \mathbf{h})$ le facteur de réflectance de Fresnel défini par le ratio des indices de réfraction des milieux, $D(\mathbf{h})$ la fonction de distribution des orientations des microfacettes et $G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ la fonction d'atténuation géométrique. Le choix de ces deux dernières fonctions est discuté dans le chapitre 3.

La description d'une distribution statistique d'orientation des aspérités de surface permet également d'inclure les matériaux anisotropes. Ce type de matériau présente des micro-rayures parallèles qui influencent les directions de réflexion de la lumière dans des directions privilégiées, dépendantes de l'orientation des aspérités de surface. C'est le cas par exemple des matériaux brossés ou du bois. En se basant sur des données expérimentales obtenues grâce à un goniomètre, Ward [War92] propose un modèle isotrope dérivé du modèle de Torrance et Sparrow et également un modèle anisotrope (figure 2.14d). Ces modèles sont physiquement plausibles : ils respectent le principe de réciprocité et assurent la conservation de l'énergie. Le modèle anisotrope de Ward se formule comme suit :

$$f = \frac{K_d}{\pi} + K_s \frac{1}{\sqrt{|\mathbf{s}, \mathbf{n}||\mathbf{o}, \mathbf{n}|}} \frac{\exp \left[-\tan^2 \delta \left(\frac{\cos^2 \phi_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_h}{\alpha_y^2} \right) \right]}{4\pi\alpha_x\alpha_y}, \quad (2.20)$$

avec α_x et α_y respectivement la déviation standard de la pente de la surface dans la direction x et dans la direction y , δ est l'angle entre la direction bissectrice et la normale à la surface et ϕ_h l'angle azimuthal de \mathbf{h} .

Cependant les microfacettes purement spéculaires ne permettent pas de représenter les phénomènes lumineux tels que la rétrodiffusion de la lumière. Ce type de réflexion

peut être observé lorsque les aspérités de surface sont diffusantes. C'est le cas décrit par le modèle d'Oren et Nayar [ON94]. Les auteurs proposent également une extension du modèle intégrant le problème complexe d'inter-réflexions de la lumière entre facettes. Ce type de représentation implique la résolution d'intégrales multiples pour lequel il n'existe pas de solution analytique. C'est pourquoi Oren et Nayar proposent une solution approchée, le rendant ainsi accessible pour la synthèse d'image ou l'identification de paramètres par exemple.

2.3.4 Discussion

Parmi les modèles de réflectance existants, les modèles à base de fonctions permettent d'approcher de façon fidèle les données de réflectance acquises sur des matériaux au moyen de système d'acquisition. Cependant ils utilisent un grand nombre de paramètres correspondant à des coefficients de fonction de base et donc sans correspondance physique avec des caractéristiques de surface. Les modèles empiriques sont intuitifs et nécessitent peu de paramètres, mais ils ne sont pas toujours physiquement plausibles, leurs paramètres ne correspondent pas réellement à des caractéristiques de surface, et surtout les valeurs de réflectance divergent des mesures. Enfin, les modèles à base de microfacettes offrent une description physiquement plausible des matériaux avec un nombre de paramètres réduit et correspondant à des caractéristiques de surface. Par exemple l'indice de réfraction d'une interface correspondant à l'aspect spéculaire du matériau, la rugosité de la surface ou encore sa couleur. C'est pourquoi nous nous orientons dans ces travaux de thèse sur ce type de représentation.

De nombreux modèles à base de microfacettes ont été décrits mais la plupart d'entre eux sont limités à un type particulier de matériau. Ils décrivent généralement une distribution statistique de microfacettes purement spéculaires afin de représenter l'aspect spéculaire des matériaux et ajoute une composante diffuse pour représenter l'aspect coloré des matériaux. Ce type de représentation ne permet pas de représenter la rétrodiffusion de la lumière ni la dépendance entre la composante spéculaire et de la composante diffuse. En effet plusieurs auteurs ont mis en évidence par l'observation de matériaux réels que lorsque les valeurs de la composante spéculaire augmentent, celles de la composante diffuse diminuent et inversement. Nous proposons dans le chapitre 3, un nouveau modèle à base de microfacettes non purement spéculaire permettant la gestion de ces différents phénomènes et proposons des solutions d'implémentation permettant de résoudre de manière numérique les intégrales multiples sous-jacentes.

Conclusion du chapitre

L'objet de notre étude concerne l'élaboration d'un système simple, rapide et peu onéreux permettant l'étude de l'aspect de surface d'objet de géométrie inconnue. Nous souhaitons également un minimum de manipulation des objets d'étude, indispensable pour des supports tels que les fossiles de macro-organismes, et afin d'automatiser le système et éviter les sources d'erreur. Les grandeurs physiques et les fonctions, intervenant lors de la manipulation de données de réflectance, introduites dans la section 2.1.1 nous ont permis de mettre en place les notations et les notions utilisées pour ce mémoire de thèse. La fonction de réflectance, introduite dans cette section, définit la proportion de lumière réfléchiée par une surface dans

une direction d'observation donnée par rapport à une direction d'incidence de lumière et dépend des caractéristiques des matériaux. L'étude de l'apparence d'une surface peut donc être réalisée par l'estimation de cette fonction. Les systèmes d'acquisition de réflectance utilisant le traitement d'image consistent à contrôler les conditions d'acquisition afin d'inverser le principe de formation d'image et estimer la fonction de réflectance de la surface. Ceci revient à inverser l'équation du rendu dans des conditions d'acquisition contrôlées. Cette équation est utilisée en synthèse d'image pour calculer la luminance réfléchie par un point de surface dans une direction d'observation donnée. Elle dépend de la direction d'observation, de la lumière incidente provenant de toutes les directions possibles, de la normale au point de surface considéré et de la fonction de réflectance de cette surface. Lorsqu'une seule source de lumière de position et de puissance connue éclaire la scène, que la direction d'observation et que la normale au point de surface sont connues, l'équation du rendu peut alors être simplifiée et inversée pour permettre le calcul de la fonction de réflectance.

Les différentes familles de systèmes d'acquisition, permettant d'estimer la réflectance d'une surface, ont été présentés dans la section 2.2.1. Quelle que soit la configuration du système, lorsque la géométrie de la surface n'est pas connue, l'utilisation d'un capteur photographique est nécessaire. Les défauts de ce type de capteur (bruit et limitation de la dynamique) sont gérés grâce à l'acquisition d'image à haute gamme dynamique garantissant une qualité des données acquises. Grâce à une méthode de fusion appropriée des images LDR en images HDR, l'éclairage est estimé au plus juste : la dynamique est augmentée, le pas de quantification est fin et les bruits dans les données sont évités.

La reconstruction de la géométrie, étape préalable à l'estimation de la réflectance d'objet de forme inconnue peut être réalisée par de nombreux systèmes. Cependant les configurations les plus appropriées et les plus utilisées sont les solutions utilisant des positions d'éclairage et d'observation fixes afin de limiter les mouvements et augmenter la répétabilité des mesures. Deux solutions sont alors possibles : l'utilisation de deux outils, l'un pour la reconstruction, l'autre pour l'estimation de la réflectance ; ou au moyen d'un seul et même système d'acquisition. La deuxième solution est à préférer afin d'éviter un recalage des données géométriques et des données de réflectance. En effet, les erreurs induites par cette étape complexe, entraînent un bruit sur les données de réflectance estimées. Il est donc préférable de l'éviter. Les différentes méthodes de reconstruction tridimensionnelle pouvant être intégrées au système d'acquisition de réflectance sont présentées dans le chapitre 4. Certains systèmes utilisent un très grand nombre de positions de lumières et de caméras mais dans le but de réduire les coûts de mise en place, il est possible de réduire ce nombre. Les données de BRDF ainsi estimées ne couvrent pas tout l'hémisphère des directions d'incidence et d'observation mais sont suffisantes pour obtenir le profil de réflectance de la surface. Afin de donner un sens et compléter les données de réflectance acquises, l'identification de paramètres de modèles mathématiques peut être utilisée. Cette étape permet de déterminer les caractéristiques des matériaux étudiés de façon automatique. Pour cela les modèles mathématiques utilisés doivent pouvoir représenter efficacement des matériaux réels, donc être physiquement plausibles, et utiliser des paramètres ayant un sens physique. Pour cette raison nous nous orientons vers les modèles à base de microfacettes. Ils décrivent la surface au moyen de paramètres simples (couleur, rugosité et spécularité) et ont été élaborés afin de répondre aux lois de la physique (conservation de l'énergie, réciprocité). Cependant la plupart des modèles existants considèrent des microfacettes purement Lambertiennes ou purement spéculaires et sont ainsi limités à un type de matériau en particulier. Nous proposons un modèle plus polyvalent, capable de représenter une large gamme de matériaux dans le chapitre 3 et présentons des solutions

d'implémentation ainsi qu'un modèle approché pour l'identification de paramètres.

MODÈLE À BASE DE MICROFACETTES LAMBERTIENNES INTERFACÉES

3

SOMMAIRE

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | MODÈLES À BASE DE MICROFACETTES | 33 |
| 3.1.1 | Microfacettes Lambertiennes interfacées : une solution physiquement réaliste | 34 |
| 3.1.2 | Fonctions de distribution et facteurs d'atténuation géométrique associés | 39 |
| 3.1.3 | Evaluation de la BRDF par méthodes de Monte-Carlo et échantillonnage | 42 |
| 3.1.4 | Mise en œuvre du modèle Lambertien interfacé et tracé de chemin | 47 |
| 3.2 | MODÈLE LAMBERTIEN INTERFACÉ : ÉVOLUTIONS ET FORMULE APPROCHÉE | 51 |
| 3.2.1 | Réflexions multiples de la lumière entre microfacettes | 51 |
| 3.2.2 | Tabulation des données | 54 |
| 3.2.3 | Formulation approchée | 57 |
| 3.3 | RÉSULTATS | 60 |
| | CONCLUSION | 64 |

Les modèles à base de microfacettes représentent une surface au moyen d'une distribution statistique de microfacettes de réflectance de base (purement spéculaire ou purement diffuse). Ils présentent l'avantage d'être physiques, simples et utilisent un faible nombre de paramètres intuitifs à manipuler. La plupart des modèles de la littérature considèrent une distribution de microfacettes purement spéculaires. Cette représentation est simple à calculer et permet de représenter des surfaces spéculaires rugueuses. Mais ils sont restreint à une gamme de matériaux et ne prennent pas en compte le phénomène de transmission de la lumière par une interface. En effet, à une interface entre un milieu et un autre, la lumière peut être réfléchi presque totalement (c'est le cas à l'interface entre l'air et un matériau conducteur tel qu'un métal), ou en partie réfléchi ou encore totalement transmise (dans le cas de matériaux transparents [WMLT07]) ou en partie, interagir avec la matière et être retransmise. Kelemen et Szirmay-Kalos [KSK01] mettent l'accent sur ce phénomène, non géré par les modèles à base de microfacettes spéculaires approchant la transmission/retransmission de la lumière par un terme purement Lambertien. En effet, la loi de conservation impose une baisse des valeurs d'une composante lorsque les valeurs de l'autre composante augmentent. Cette balance s'observe très bien pour certains matériaux tels que des carrelages polis ou des bois vernis : lorsque la direction d'observation est rasante, la surface devient très réfléchissante et la couleur du matériau est moins visible, tandis que pour des directions d'observation moins rasantes la couleur du matériau est plus prononcée et l'aspect brillant l'est moins. De plus, les BRDF à base de microfacettes purement spéculaires, utilisant une composante diffuse purement Lambertienne dépendante ou non de la composante spéculaire, ne permettent pas de représenter l'influence de la rugosité sur l'aspect diffus d'une surface, produisant des

phénomènes tels que la rétrodiffusion de la lumière. Ce comportement peut être pris en compte grâce à la description d'un modèle à base de microfacettes purement diffuses, proposé par Oren et Nayar [ON94]. Dans ce cas, les surfaces représentées peuvent alors aller de purement diffuses à diffuses rugueuses, ce qui limite la gamme de matériaux concernés. De nombreux travaux ont été menés sur le choix de la fonction de distribution de microfacettes, mais à notre connaissance peu d'auteurs se sont penchés sur les phénomènes de transmission/retransmission de la lumière par une interface.

Dans l'optique de trouver un modèle capable de représenter une large gamme de matériaux tout en respectant les lois de la physique, nous nous sommes intéressés au modèle à base de microfacettes Lambertiennes Interfacées (modèle Lambertien interfacé) proposé par Simonot [Sim09]. Ce modèle, développé dans le domaine de l'optique, propose une balance physique entre composante diffuse et spéculaire et gère la transmission de la lumière par l'interface et son interaction avec le substrat puis sa retransmission. Nous proposons des extensions du modèle afin de prendre en compte les phénomènes de masquage et d'ombrage entre microfacettes, les inter-réflexions de la lumière entre elles ainsi que l'anisotropie. La réflectance des microfacettes n'étant pas purement spéculaire, la contribution de chacune d'elle à la réflectance macroscopique doit être prise en compte. Une intégration sur toutes les orientations de microfacette possibles doit donc être réalisée afin de calculer la réflectance de la surface. L'intégration explicite est coûteuse à réaliser, en termes de temps de calcul, et s'ajoute à l'intégration de l'équation du rendu pour la production d'image. La présence dans les calculs de la fonction de distribution, pouvant être à haute fréquence, demande également une stratégie d'échantillonnage adapté. Des solutions d'implémentation du modèle sont proposées dans ce chapitre pour calculer la réflectance de ce type de surface. Nous présentons également une formulation approchée, utile pour l'identification de paramètres sur des données de réflectance. Nous avons réalisés des tests sur des données mesurées issues de bases de données afin de valider l'adéquation du modèle aux données réelles.

3.1 Modèles à base de microfacettes

Les modèles à base de microfacettes, permettant de prendre en compte la géométrie microscopique d'une surface au moyen d'une distribution statistique de microfacettes, ont été développés dans un premier temps dans le domaine de l'optique afin de décrire le comportement de surfaces constituées de microrugosités purement spéculaires [BS63]. Ils ont été repris en synthèse d'image [TS67, CT82] et offrent une description statistique du comportement de la microsurface pour le calcul de la réflectance au niveau macroscopique. Ce calcul, pour une direction d'incidence et d'observation donnée consiste à sommer la contribution de toutes les microfacettes de l'élément de surface considéré :

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \int_{\Omega_+} \frac{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}|} f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) d\omega_m, \quad (3.1)$$

avec Ω_+ l'hémisphère supérieur à la surface. La contribution des microfacettes de normale m à la BRDF macroscopique $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ dépend de leur réflectance propre $f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$, de la fonction de distribution $D(\mathbf{m})$ qui décrit la proportion de microfacettes dont la normale est orientée dans la direction de \mathbf{m} , et de la fonction d'atténuation géométrique $G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$ qui donne la proportion de lumière atteignant une facette et repartant dans la direction \mathbf{o} en tenant compte des phénomènes de masquage et d'ombrage entre microfacettes.

Les premiers modèles à base de microfacette de la littérature considèrent des microfacettes purement spéculaires [TS67, CT82, War92]. Ce cas présente un avantage d'implémentation puisque pour une direction d'incidence de la lumière \mathbf{s} et une direction d'observation \mathbf{o} , seules les microfacettes dont la normale est orientée dans la direction bissectrice à \mathbf{s} et \mathbf{o} contribuent à la BRDF macroscopique. Le calcul est alors direct, la proportion des microfacettes dont la normale est correctement orientée est donnée par la fonction de distribution. Cependant, selon la loi de Fresnel, à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction différents, une onde électromagnétique incidente est en partie réfléchiée et en partie transmise (puis éventuellement absorbée). En présence d'un matériau purement métallique, la lumière est entièrement réfléchiée par la surface et en présence d'un matériau purement transparent, elle est entièrement transmise. Le calcul de la lumière transmise par une surface transparente lisse est direct et une surface rugueuse transparente peut être représentée par le modèle de Walter et al. [WMLT07]. Lorsque le matériau est opaque ou semi-transparent, la portion de lumière transmise dans le matériau interagit avec la matière puis est retransmise à l'extérieur, quittant la surface sous différentes directions et constituant la composante volumique. Une portion de la lumière pénétrant à l'intérieur du matériau est également absorbée, donnant ainsi l'aspect coloré de la surface. Hormis les modèles multicouches [HK93, PH00, JdJM14], relativement complexes à mettre en œuvre, aucun modèle de la littérature ne gère ce phénomène. Du fait de la complexité des calculs, les modèles mathématiques de réflectance approchent généralement la composante volumique par un terme diffus (alors appelée composante diffuse) purement Lambertien auquel est ajoutée une composante spéculaire [TS67, CT82, War92]. Cependant, pour ce type de configuration, les valeurs de la composante diffuse sont constantes quelles que soient les valeurs de la composante spéculaire. Or la loi de conservation de l'énergie impose :

$$\int_{\Omega_+} f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_o d\omega_o \leq 1. \quad (3.2)$$

Avec $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ la BRDF macroscopique (équation 3.14). La BRDF macroscopique s'obtient par addition d'une composante diffuse et d'une composante spéculaire. Lorsque la valeur de l'une des composantes augmente, cette condition (équation 3.2) impose une diminution de

la valeur de la seconde composante (pour un triplé \mathbf{s} , \mathbf{o} et \mathbf{n} donné). Par exemple, lorsque la direction d'incidence de la lumière est rasante, le lobe spéculaire est plus important que pour une direction d'incidence moins rasante, la composante diffuse doit donc prendre des valeurs plus faibles dans le premier cas que dans le second. Or une composante diffuse Lambertienne a les mêmes valeurs quel que soit le comportement de la composante spéculaire. Une balance entre composante diffuse Lambertienne et composante spéculaire est proposée dans certains modèles [SHSL97, vGSK98, APS00, KSK01] afin d'approcher ce phénomène, mais ces modèles ne gèrent pas de façon physique la portion de lumière pénétrant à l'intérieur du matériau. Ceci s'explique principalement par la difficulté à exprimer mathématiquement ce phénomène ainsi qu'à implémenter un modèle dont les microfacettes ne sont pas purement spéculaires. En effet, dans ce cas le calcul de la BRDF macroscopique présente une intégration supplémentaire sur les orientations des microfacettes puisque chacune d'elle peut contribuer à la BRDF macroscopique. A notre connaissance seul le modèle d'Oren et Nayar [ON94] considère des microfacettes non purement spéculaires, il décrit une surface constituée de microfacettes purement diffuses et propose un modèle approché pour permettre le calcul de la BRDF macroscopique. Ce modèle est cependant restreint aux surfaces diffuses rugueuses. Afin de proposer un modèle capable de gérer de façon explicite la lumière réfléchi et la lumière pénétrant à l'intérieur du matériau, nous proposons un modèle considérant des microfacettes Lambertiennes interfacées. Nous montrons également comment il est possible de réaliser une intégration numérique sans biais et avec un faible surcoût avec des approches de type *Tracé de chemins*, dans le cas des microfacettes Lambertiennes interfacées, mais la méthode est valable pour tout modèle de BRDF à base de microfacettes. Nous proposons également une formulation approchée pour notre représentation à base de microfacettes Lambertiennes interfacées, utile pour des approches de rendu interactif et l'identification de paramètres sur des données mesurées.

3.1.1 Microfacettes Lambertiennes interfacées : une solution physiquement réaliste

Les modèles à base de microfacettes de la littérature décrivent la BRDF d'une microfacette $f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$ comme l'ajout d'un terme spéculaire, noté $f_s^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$, et d'un terme diffus, ou volumique, noté $f_v^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$, avec \mathbf{m} la normale de la microfacette :

$$f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = f_s^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) + f_v^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}). \quad (3.3)$$

Par linéarité de l'intégrale, la BRDF macroscopique $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ est égale à l'ajout d'une composante spéculaire, notée $f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$, et d'une composante diffuse, ou volumique, notée $f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$. La composante diffuse est souvent considérée purement Lambertienne et la composante spéculaire est calculée en considérant des microfacettes purement spéculaires. La portion de lumière réfléchi de façon spéculaire dépend du coefficient de Fresnel $F(\mathbf{s}, \mathbf{m})$:

$$f_s^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = F(\mathbf{s}, \mathbf{m}) \frac{\delta_{\omega_o}(\mathbf{r}, \mathbf{o})}{|\mathbf{o}, \mathbf{m}|}, \quad (3.4)$$

avec \mathbf{r} la direction de réflexion miroir, δ_{ω_o} la distribution de Dirac associée à l'angle solide élémentaire $d\omega_o$. Cette fonction est intégrée à l'équation générale des modèles à base de microfacettes (équation 3.14), ce qui implique de réécrire l'expression en fonction de la normale à la microfacette et de son angle solide associé. Pour la partie spéculaire, seules celles dont la normale est orientée selon la direction bissectrice à \mathbf{o} et \mathbf{s} , notée \mathbf{h} , contribuent

à la BRDF (figure 3.1). Les directions \mathbf{o} et \mathbf{h} sont dépendantes et la relation entre elles (dont la démonstration géométrique est présentée dans [NIK91, WMLT07], et la démonstration algébrique dans [Stao1, TS67]) est :

$$d\omega_o = 4|\mathbf{s}\cdot\mathbf{h}|d\omega_h. \quad (3.5)$$

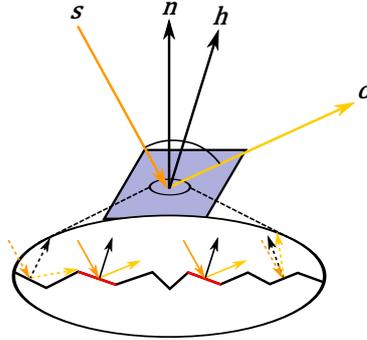


FIGURE 3.1 – Surface spéculaire rugueuse. Seules les microfacettes dont la normale est orientée dans la direction bissectrice entre la direction d'incidence de la lumière et la direction d'observation (microfacettes en rouge) contribuent à la BRDF macroscopique.

La BRDF d'une microfacette purement spéculaire s'écrit alors :

$$f_s^u(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = F(\mathbf{s}, \mathbf{h}) \frac{\delta_{\omega_m}(\mathbf{h}, \mathbf{m})}{4(\mathbf{s}\cdot\mathbf{h})^2}, \quad (3.6)$$

avec $F(\mathbf{s}, \mathbf{h})$ la réflectance de l'interface pour un éclairage non polarisé, répondant à la loi de Fresnel entre un milieu extérieur d'indice n_0 et un matériau d'indice n_1 dont Blinn [Bli77] et Cook et Torrance [CT82] proposent une formulation pratique pour les matériaux diélectriques sous une lumière non polarisée :

$$F(\mathbf{s}, \mathbf{h}) = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left\{ 1 + \frac{[c(g + c) - 1]^2}{[c(g - c) + 1]^2} \right\}, \quad (3.7)$$

où

$$c = \mathbf{s}\cdot\mathbf{h} \quad (3.8)$$

$$g^2 = n_i^2 + c^2 - 1, \quad (3.9)$$

avec $n_i = n_1/n_0$, un nombre complexe pour représenter un matériau conducteur et réel sinon. Dans le premier cas la lumière est entièrement réfléchiée par la surface, dans le second la transmission dans le matériau doit être prise en compte.

La composante spéculaire est obtenue en intégrant l'équation 3.6 à l'équation générale des modèles à base de microfacettes (équation 3.14) :

$$f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{F(\mathbf{s}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{h})}{4|\mathbf{s}\cdot\mathbf{n}||\mathbf{o}\cdot\mathbf{n}|}, \quad (3.10)$$

avec $D(\mathbf{h})$ la proportion de microfacettes dont la normale est orientée dans la direction bissectrice et donc contribuant à la BRDF macroscopique. Cette équation illustre un comportement observable pour des matériaux réels : lorsque la direction d'incidence de la lumière

ou d'observation devient rasante, e.g. lorsque $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}$ ou $\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}$ augmente, la composante spéculaire augmente (équation 3.10). Ce phénomène peut être observé par exemple avec un carrelage poli, illustré sur la figure 3.2 : le comportement de ce matériau observé d'une direction proche de la normale à la surface présente un comportement diffusant, mais observé depuis une direction rasante, la surface réfléchit l'objet posé à la surface tandis que la couleur des carreaux n'est presque plus visible. Ceci montre que lorsque la composante spéculaire augmente, la composante diffuse diminue en conséquence.

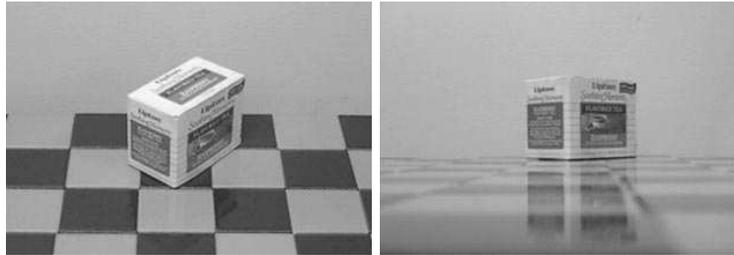


FIGURE 3.2 – Photographie illustrant le comportement d'un carrelage poli. La spécularité augmente lorsque la direction d'observation devient rasante, et la diffusion de la lumière diminue. Image présentée par Shirley et al. [SHSL97].

Afin de respecter ce principe, certains auteurs proposent d'apporter un facteur de correction afin de représenter la balance entre composante diffuse et composante spéculaire [Shi91] : $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) + (1 - f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}))f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$. D'autres modèles proposent une balance entre composante diffuse et composante spéculaire dépendant du facteur de Fresnel [HTcXSG91, SHSL97, APS00, KSK01]. Cependant ils ne prennent pas en compte explicitement l'influence de la rugosité sur la composante diffuse et ne peuvent pas représenter la rétrodiffusion de la lumière observée pour certaines surfaces [ON94, vGSK98, KF11]. En effet une surface rugueuse diffuse [ON94] ou partiellement diffuse [vGSK98], présente une rétrodiffusion de la lumière : les valeurs de réflectance sont plus forte vers la direction d'incidence de la lumière. Le problème d'implémentation devient plus complexe dans ce cas puisque toutes les microfacettes de la surface peuvent contribuer à la BRDF macroscopique (figure 3.3) et l'intégration de l'équation 3.14 doit être réalisée explicitement. C'est pourquoi [ON94] et [vGSK98] proposent des solutions approchées afin d'éviter le calcul explicite de l'intégrale pour chaque configuration \mathbf{s}/\mathbf{o} (équation 3.14).

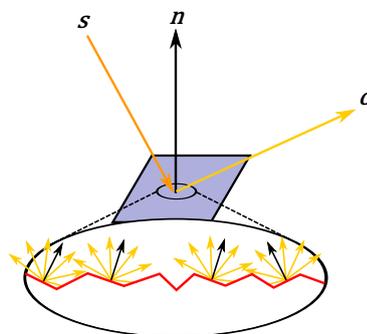


FIGURE 3.3 – Surface parfaitement diffuse rugueuse, quelle que soit la direction d'observation toutes les microfacettes contribuent à la BRDF macroscopique.

Aucun de ces modèles ne décrit de façon physique la pénétration de la lumière à l'intérieur du matériau et la balance entre composante spéculaire et composante diffuse. Afin de prendre en compte ce comportement, Simonot propose une description de la surface à l'aide de

microfacettes Lambertiennes interfacées [Simog]. Les microfacettes sont composées d'un substrat Lambertien recouvert d'une interface lisse (figure 3.4) dont l'indice de réfraction détermine la portion de lumière réfléchiée directement dans la direction spéculaire et la portion transmise à l'intérieur du matériau. La lumière pénètre à l'intérieur du matériau, puis le substrat Lambertien en rediffuse une partie vers l'interface, réfléchissant à nouveau la lumière vers le substrat et ainsi de suite de manière infinie. La lumière retransmise par l'interface dans la direction d'observation constitue alors la composante volumique.

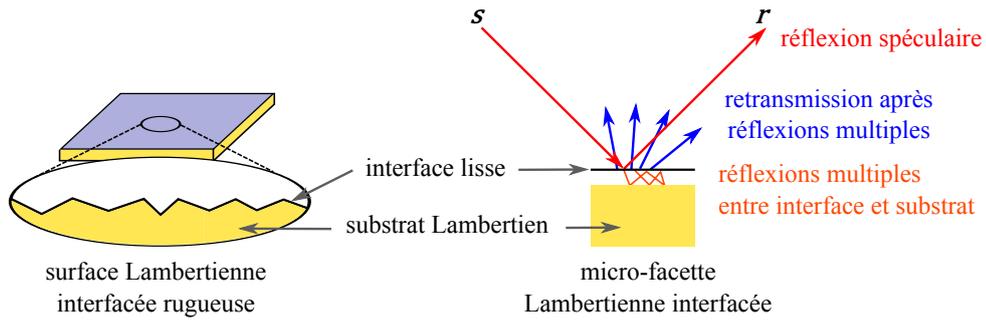


FIGURE 3.4 – Surface constituée de microfacettes Lambertiennes interfacées. Selon l'indice de réfraction de l'interface spéculaire une partie du rayonnement est réfléchiée de façon spéculaire (composante surfacique), et une partie est transmise à l'intérieur du matériau puis est dispersée par le substrat et constitue la composante diffuse (ou volumique).

Pour chaque microfacette, la composante spéculaire $f_s^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$ correspond à la lumière réfléchiée directement dans la direction de réflexion miroir, dépendant du facteur de Fresnel (équation 3.4) et la composante volumique tient compte d'une première traversée de l'interface (transmittance $T(\mathbf{s}, \mathbf{m}) = 1 - F(\mathbf{s}, \mathbf{m})$), de la diffusion par le substrat Lambertien (réflectance K_d), des réflexions multiples entre l'interface et le substrat Lambertien (facteur $1/(1 - K_d r_i)$), et enfin de la traversée finale de l'interface du matériau vers l'extérieur (transmittance $T(\mathbf{o}, \mathbf{m})$) [Simog] :

$$f_v^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = \frac{1}{\pi n_i^2} T(\mathbf{s}, \mathbf{m}) T(\mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{K_d}{(1 - K_d r_i)}, \quad (3.11)$$

où la réflectance r_i d'une interface plane éclairée par une source lumineuse Lambertienne provenant du milieu d'indice n_1 (figure 3.5), est dérivée de la réflectance de Fresnel :

$$r_i = \int_0^{\frac{\pi}{2}} F(\mathbf{u}, \mathbf{m}) \sin(2\theta_u) d\theta_u, \quad (3.12)$$

avec θ_u l'angle entre une direction \mathbf{u} considérée et \mathbf{m} , F_i la réflectance de Fresnel interne à la microfacette. Simonot propose d'utiliser l'expression analytique $n_i^2(1 - r_i) = 1 - r_e$. Avec r_e la réflectance de l'interface pour un flux lumineux provenant du milieu d'indice n_1 (figure 3.5), dont Molenaar *et al.* [MtBZ99] proposent une formulation approchée pour r_e :

$$r_e = \frac{1}{2} - \frac{2n_i^3(n_i^2 + 2n_i - 1)}{(n_i^2 + 1)(n_i^4 - 1)} + \frac{(n_i - 1)(3n_i + 1)}{6(n_i + 1)^2} + \frac{8n_i^4(n_i^4 + 1)}{(n_i^2 + 1)(n_i^4 - 1)^2} \ln(n_i) + \frac{n_i^2(n_i^2 - 1)^2}{(n_i^2 + 1)^3} \ln\left(\frac{n_i - 1}{n_i + 1}\right). \quad (3.13)$$

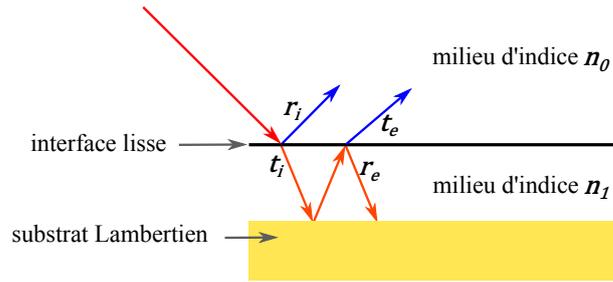


FIGURE 3.5 – Réflectance et transmittance par une interface lisse : un flux incident provenant du milieu d'indice n_0 induit la réflectance r_i et la transmittance t_i et le flux de lumière provenant du milieu d'indice n_1 de l'interface la réflectance r_e et la transmittance t_e .

Lorsque l'indice de réfraction n_i est égal à 1, la lumière est entièrement transmise du milieu n_0 vers n_1 , puis réfléchi par le substrat Lambertien et à nouveau entièrement transmise du milieu n_1 vers n_0 . Dans ce cas r_i et r_e sont nuls et $T = 1$, la surface est purement Lambertienne. Plus l'indice de réfraction est fort, plus la proportion de lumière réfléchi directement par l'interface est importante. La proportion de lumière pénétrant à l'intérieur du matériau et contribuant à la composante volumique est donc moins importante. La composante volumique du modèle Lambertien interfacé étant directement lié à l'indice de réfraction, ce comportement naturel est géré par le modèle (figure 3.6). De même pour une surface non purement diffuse, donc un indice de réfraction supérieur à 1, lorsque la direction d'incidence de la lumière devient rasante le modèle prévoit une diminution de la composante volumique compensant l'augmentation de la composante surfacique.

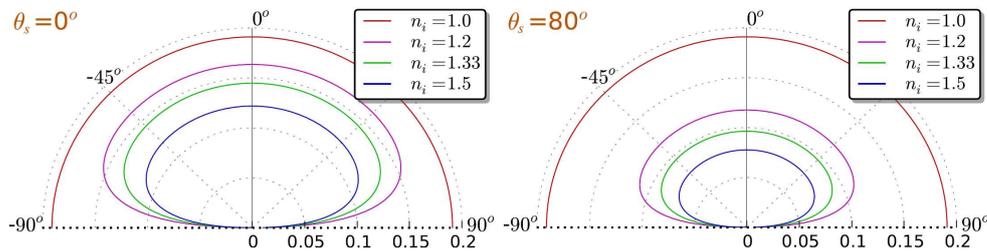


FIGURE 3.6 – Composante volumique d'une microfacette Lambertienne interfacée avec $K_d = 0.6$, en fonction de n_i .

Afin de décrire une surface constituée de microfacettes Lambertiennes interfacées, la BRDF $f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$ doit être intégrée à l'équation générale des modèles à base de microfacettes (équation 3.14) :

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \int_{\Omega_+} \frac{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}|} (f_s^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) + f_v^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})) \frac{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) d\omega_m, \quad (3.14)$$

Grâce à la propriété de linéarité de l'intégrale, la composante volumique, $f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ et la composante spéculaire, ou surfacique $f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ (équation 3.3), peuvent être calculées indépendamment l'une de l'autre et sommées afin d'obtenir la BRDF macroscopique : $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) + f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$. Le calcul de la composante spéculaire est direct (équation 3.10) et ne nécessite pas d'intégration. La composante diffuse en revanche est plus complexe à calculer puisque toutes les microfacettes de la portion de surface considérée peuvent potentiellement contribuer à la BRDF macroscopique :

$$f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{K_d}{\pi n_i^2 (1 - r_i K_d)} \int_{\Omega_+} T(\mathbf{s}, \mathbf{m}) T(\mathbf{o}, \mathbf{m}) D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}|} \frac{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} d\omega_m. \quad (3.15)$$

Lorsque $K_d = 0$, la composante volumique est alors nulle et seule la composante spéculaire contribue à la BRDF macroscopique. Dans l'article [Sim09], le modèle est présenté pour une distribution de normales Gaussienne, et ne prend pas en compte les phénomènes de masquage et d'ombrage. Aucun résultat en image n'est proposé dans l'article de Simonot du fait de la difficulté à calculer la composante volumique. L'intégration de ce type de fonction peut être réalisée grâce à une méthode de Monte-Carlo mais l'échantillonnage de la fonction doit être choisi selon la fonction de distribution des microfacettes (section 3.1.3).

3.1.2 Fonctions de distribution et facteurs d'atténuation géométrique associés

La fonction de distribution statistique des normales de microfacettes, notée $D(\mathbf{m})$ et dont l'unité est le sr^{-1} , indique la proportion de microfacettes orientées selon une direction \mathbf{m} . Une fonction de distribution physiquement plausible doit répondre à certaines contraintes [WMLT07] :

- les microfacettes sont orientées vers l'hémisphère supérieur à la surface, donc la fonction de distribution doit être positive et $0 \leq D(\mathbf{m}) \leq \infty$,
- l'air de la microsurface est au moins égale à l'air de la macrosurface, donc $1 \leq \int_{\Omega^+} D(\mathbf{m}) d\omega_m$.

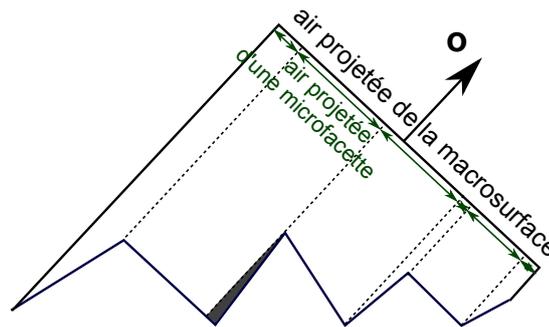


FIGURE 3.7 – Aire projetée des microfacettes et aire projetée de la macrosurface.

Différentes fonctions de distributions ont été présentées dans la littérature. Par exemple les modèles d'Oren et Nayar [ON94] et de Simonot [Sim09] utilisent une fonction de distribution Gaussienne. La fonction de distribution la plus répandue est la fonction de Beckmann et Spizichino [BS63], utilisée pour différents modèles [APS00, HTcXSG91, CT82, WMLT07, KSK01]. Une version anisotrope a été proposée par [War92] et reprise par Kurt *et al.* [KSKK10] afin de répondre à l'égalité entre l'aire projetée des microfacettes et l'aire de la macrosurface correspondante. Enfin plus récemment la fonction de distribution GGX a été proposée par Walter *et al.* [WMLT07] dont une version anisotrope a été proposée par Heitz [Hei14]. Cette dernière distribution est équivalente à la fonction de distribution de Trowbridge-Reitz [TR75], utilisée notamment par Blinn [Bli77] pour son adéquation avec les données mesurées. Les formules de ces distributions sont présentées dans la table 3.1. Lorsqu'une fonction de distribution Gaussienne est utilisée, le paramètre de rugosité est noté σ_G et est exprimé en radians, et lorsqu'une fonction de distribution de Beckmann, ou GGX, est utilisée, il est noté σ_B , n'a pas d'unité et correspondant à l'écart-type de la distribution des pentes. Pour un paramètre de rugosité σ_G ou σ_B égale à zéro, la surface est plane, et plus la valeur du paramètre augmente, plus la surface est rugueuse. Enfin σ_x et σ_y les paramètres de rugosité (déviations standard des pentes) associés à un système de coordonnées local à la surface macroscopique pour une distribution anisotrope.

La fonction d'atténuation géométrique est alors choisie en fonction de la fonction de distribution des microfacettes utilisée pour ces calculs et ce choix doit être fait avec précaution [APSo0, Hei14]. La fonction d'atténuation géométrique (ou GAF pour *Geometric Attenuation Factor*) ou coefficient d'ombrage et de masquage, notée $G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$, exprime la fraction d'une facette de normale \mathbf{m} , visible à la fois de la direction d'incidence et de la direction d'observation. Elle prend en compte deux phénomènes : l'ombrage, se produisant lorsque la lumière qui arrive d'une direction \mathbf{s} sur une facette est partiellement bloquée par une autre facette, noté $G_1(\mathbf{s}, \mathbf{m})$; et le phénomène de masquage, se produisant lorsque la lumière réfléchiée par une facette et observée depuis une direction \mathbf{o} est partiellement occultée par une autre facette, noté $G_1(\mathbf{o}, \mathbf{m})$.

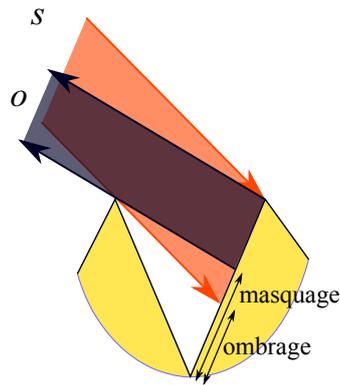


FIGURE 3.8 – Masquage et ombrage d'une V-cavité.

Pour être physiquement plausible, le GAF doit répondre à certaines contraintes [WMLT07, Hei14] :

- les valeurs de G sont telles que $0 \leq G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \leq 1$,
- le GAF est symétrique donc $G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = G(\mathbf{o}, \mathbf{s}, \mathbf{m})$,
- les microfacettes auto-masquées ou auto-ombrées ne sont pas visibles : $G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = 0$ si $(\mathbf{o}, \mathbf{m})(\mathbf{o}, \mathbf{n}) \leq 0$ ou $(\mathbf{s}, \mathbf{m})(\mathbf{s}, \mathbf{n}) \leq 0$,
- pour toutes les directions d'observation d'une surface, l'aire projetée de la surface visible du point de vue macroscopique et du point de vue microscopique sont les mêmes et doivent donc être égale (figure 3.7) :

$$(\mathbf{u}, \mathbf{n}) = \int_{\Omega} G_1(\mathbf{u}, \mathbf{m}) D(\mathbf{m}) |\mathbf{u}, \mathbf{m}| d\omega_m, \quad (3.16)$$

Afin de décrire les phénomènes d'ombrage et de masquage, Torrance et Sparrow [TS67] considèrent une surface constituée de V-cavités (figure 3.9a) et déterminent par construction géométrique la formule du GAF. Selon les directions d'incidence de la lumière, deux configurations sont possibles : la microfacette est entièrement éclairée ou visible, ou seule la partie supérieure est éclairée ou visible (figure 3.8). La partie visible simultanément des deux directions correspond au minimum entre la fonction de masquage et d'ombrage :

$$G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = \max \left[0, \min \left[1, \frac{2|\mathbf{s}, \mathbf{n}||\mathbf{m}, \mathbf{n}|}{|\mathbf{s}, \mathbf{m}|}, \frac{2|\mathbf{o}, \mathbf{n}||\mathbf{m}, \mathbf{n}|}{|\mathbf{o}, \mathbf{m}|} \right] \right] \quad (3.17)$$

Cette fonction est mathématiquement bien posée [SHSL97, Hei14] et son calcul est simple et rapide. Elle est utilisée par Oren et Nayar [ON94] en association avec une fonction de distribution Gaussienne et par Cook et Torrance [CT82] en association avec une fonction de

distribution de Beckmann. L'hypothèse d'une surface constituée uniquement de cavité en V semble cependant physiquement peu réaliste et la fonction est sujette à des discontinuités aux angles rasants.



FIGURE 3.9 – Exemples de microsurfaces : organisation en V-cavité ou microfacettes totalement indépendantes les unes des autres.

Smith décrit un type de surface différent pour lequel les microfacettes sont indépendantes les unes des autres [Smi67] (figure 3.9b). Les fonctions d'ombrage et de masquage sont alors indépendantes l'une de l'autre, et il n'y a aucune corrélation entre la normale d'une microfacette et la normale d'une autre microfacette, même proche. Dans l'équation 3.16, $G_1(\mathbf{u}, \mathbf{m})$ ne dépend pas de \mathbf{m} peut être sorti de l'intégrale. Le facteur d'atténuation géométrique est dit de forme séparable et est formulé comme suit :

$$G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) = G_1(\mathbf{s}, \mathbf{m})G_1(\mathbf{o}, \mathbf{m}), \quad (3.18)$$

avec $G_1(\mathbf{s}, \mathbf{m})$ la fonction d'ombrage et $G_1(\mathbf{o}, \mathbf{m})$ la fonction de masquage. La redéfinition de cette intégrale sur l'espace des pentes conduit à la formulation générale de Smith (la dérivation complète est reprise par Heitz [Hei14]) :

$$G_1(\mathbf{u}, \mathbf{m}) = \frac{1}{1 + \Lambda(\mathbf{u})}, \quad (3.19)$$

avec $\mathbf{u} = \mathbf{o}$ pour la fonction de masquage, $\mathbf{u} = \mathbf{s}$ pour la fonction d'ombrage et $\Lambda(\mathbf{u})$ dépendant de la fonction de distribution des pentes des microfacettes. Ce facteur d'atténuation géométrique a été repris par de nombreux auteurs [vGSK98, APS00, WMLT07]. Pour une fonction de distribution de Beckmann, le facteur d'atténuation géométrique est alors :

$$\Lambda(\mathbf{u}) = \frac{\operatorname{erf}(a) - 1}{2} + \frac{1}{2a\sqrt{\pi}}e^{-a^2}, \quad (3.20)$$

avec erf la fonction d'erreur, $a = 1/(\alpha_u \tan \theta_u)$, $\alpha_u = \sqrt{\cos^2 \phi_u \sigma_x^2 + \sin^2 \phi_u \sigma_y^2}$. Pour le cas isotrope σ_x est égal à σ_y .

Et pour une fonction de distribution GGX :

$$\Lambda(\mathbf{u}) = \frac{-1 + \sqrt{1 + 1/a^2}}{2}. \quad (3.21)$$

La comparaison des différentes fonctions de distribution et de leur GAF associés est proposée dans la section 3.1.4.

TABLE 3.1 – Différentes fonctions de distribution isotropes présentées dans la littérature, leur fonction anisotrope et leur GAF associés.

| | Gaussienne | Beckmann | GGX |
|-------------------------|--|---|--|
| Distribution isotrope | $C \frac{e^{(-\theta_m^2/2\sigma_G^2)}}{ \mathbf{m}\mathbf{n} }$ | $\frac{1}{\pi \sigma_B^2 \cos^4 \theta_m} e^{-\tan^2(\theta_m/\sigma_B^2)}$ | $\frac{\sigma_B^2}{\pi \cos^4 \theta_m (\sigma_B^2 + \tan^2 \theta_m)^2}$ |
| Distribution anisotrope | | $\frac{e\left(-\tan^2 \theta_m \left(\frac{\cos^2 \phi_m}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_m}{\sigma_y^2}\right)\right)}{\pi \sigma_x \sigma_y (\mathbf{m}\cdot\mathbf{n})^4}$ | $\frac{1}{\pi \sigma_x \sigma_y \cos^4 \theta_m} \times \frac{1}{\left(1 + \tan^2 \theta_m \left(\frac{\cos^2 \phi_m}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_m}{\sigma_y^2}\right)\right)^2}$ |
| GAF | $\max \left[0, \min \left[1, \frac{2 \mathbf{s}\cdot\mathbf{n} \mathbf{m}\cdot\mathbf{n} }{ \mathbf{s}\cdot\mathbf{m} }, \frac{2 \mathbf{o}\cdot\mathbf{n} \mathbf{m}\cdot\mathbf{n} }{ \mathbf{o}\cdot\mathbf{m} } \right] \right]$ | $\Lambda(\mathbf{u}) = \frac{\operatorname{erf}(a) - 1}{2} + \frac{1}{2a\sqrt{\pi}} e^{-a^2}$ | $\Lambda(\mathbf{u}) = \frac{-1 + \sqrt{1 + 1/a^2}}{2}$ |

3.1.3 Evaluation de la BRDF par méthodes de Monte-Carlo et échantillonnage

De nombreux outils basés sur un lancer de rayon (chapitre 2 section 2.1.2) utilisent une intégration par méthode de Monte-Carlo (Arnold global illumination renderer, V-Ray, Mitsuba etc.) pour estimer l'équation du rendu et réaliser des images de synthèse d'une scène :

$$L_r(\mathbf{o}) = L_e(\mathbf{o}) + \int_{\omega_s} L_i(\mathbf{s}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_s, \quad (3.22)$$

L'échantillonnage des directions d'incidence de la lumière sur le domaine ω_s permet de résoudre l'intégrale \int_{ω_s} . Chaque direction \mathbf{s} choisie par l'échantillonnage est utilisée afin de relancer un rayon dans la scène et rechercher la luminance incidente $L_i(\mathbf{s})$. L'utilisation en synthèse d'image d'un modèle à base de microfacettes non purement spéculaires implique la résolution d'une intégrale supplémentaire sur l'orientation des microfacettes afin de calculer $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$:

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \int_{\Omega^+} \frac{|\mathbf{s}\cdot\mathbf{m}|}{|\mathbf{s}\cdot\mathbf{n}|} f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{o}\cdot\mathbf{m}|}{|\mathbf{o}\cdot\mathbf{n}|} D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) d\omega_m, \quad (3.23)$$

Afin de résoudre l'intégrale de cette équation, un échantillonnage doit être réalisé sur Ω^+ : pour chaque valeur \mathbf{m} le calcul de $\frac{|\mathbf{s}\cdot\mathbf{m}|}{|\mathbf{s}\cdot\mathbf{n}|} f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{o}\cdot\mathbf{m}|}{|\mathbf{o}\cdot\mathbf{n}|} D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})$ est réalisé, la BRDF macroscopique est alors obtenue par addition de chaque contribution (e.g. la contribution des microfacettes orientées selon \mathbf{m}).

L'efficacité de la méthode de Monte-Carlo pour résoudre ce type d'intégration dans ce domaine a été démontrée par de nombreux auteurs [Laf96, Vea98, APSoo, WMLT07]. Nous nous sommes intéressés à son utilisation pour un modèle à base de microfacettes non purement spéculaires. Dans ce cas, bien que la BRDF semble relativement lisse, un échantillonnage uniforme n'est pas adapté. En effet les fonctions de distribution des microfacettes, intervenant dans le calcul, peuvent présenter un pic fin lorsque le paramètre de rugosité est faible. Dans ce cas un échantillonnage uniforme (figure 3.10) donne peu de normales de microfacettes sur le pic de la distribution (donc ayant une forte probabilité d'exister et contribuant à la BRDF macroscopique). En effet ce type de fonction, globalement de forme gaussienne, peut

comporter un pic fin produisant des effets de haute fréquences lors du rendu. La figure 3.10 illustre cela : pour un paramètre de rugosité faible, la fonction présente un pic de valeur pour θ_m proche de zéro, puis les valeurs de la fonction chutent et sont égales à zéro pour des valeurs plus fortes de θ_m . Dans le cas d'un échantillonnage uniforme des orientations des microfacettes pour ce paramètre de rugosité, seulement trois orientations de microfacettes (tirage 1, 2 et 3) contribueront à la BRDF macroscopique, les autres orientations (tirages 4 à 15), donnant $D(\mathbf{m}) = 0$, ne sont pas des orientations possibles pour cette rugosité de surface.

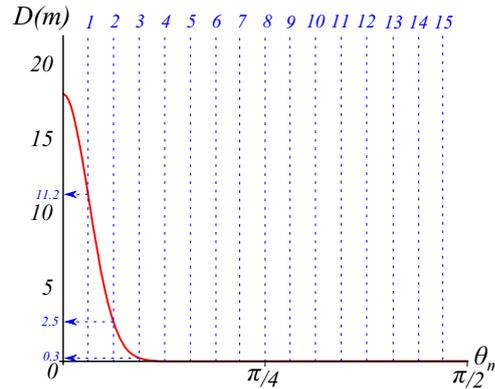


FIGURE 3.10 – Échantillonnage uniforme sur θ_m (traits pointillés bleus). Uniquement trois échantillons donnent des valeurs supérieures à 0 sur la distribution (Gaussienne à $\sigma = 0.1$). Chaque tirage est numéroté (chiffre en bleu) de 1 à 15.

Afin d'illustrer ce problème nous cherchons à échantillonner l'intégrale de l'équation 3.23. L'intégrale de la fonction, notée I , est considérée comme son espérance et peut être résolue en choisissant N échantillons de manière aléatoire suivant une loi uniforme de densité de probabilité $f dp(x) = 1/2\pi$, l'estimateur de Monte-Carlo donne :

$$\langle I \rangle = \frac{2\pi}{N} \sum_{i=1}^N f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) |\mathbf{s} \cdot \mathbf{m}| |\mathbf{o} \cdot \mathbf{m}|. \quad (3.24)$$

L'incertitude sur les résultats, appelée erreur ou déviation standard, est la différence entre le résultat de l'estimateur et la valeur de l'intégrale et est inversement proportionnelle à \sqrt{N} . L'augmentation du nombre d'échantillons lors de l'estimation par méthode de Monte-Carlo permet donc de réduire l'erreur.

La figure 3.11 illustre le calcul de la composante volumique du modèle Lambertien Interfacé avec une distribution Gaussienne et une fonction d'atténuation géométrique de Torrance et Sparrow. Le calcul par méthode de Monte-Carlo est réalisé à l'aide d'un échantillonnage uniforme, i.e. la variable est considérée de loi uniforme. L'augmentation du nombre d'échantillons permet de réduire la variance (chaque pixel donne lieu à un tirage différent, la variance est alors l'écart de valeur entre ces tirages).

Le défaut de l'échantillonnage uniforme apparaît de façon très nette pour de faibles valeurs de σ (figure 3.12). Pour une faible rugosité, la contribution d'une facette n'est prise en compte que lorsque θ_m est proche de 0 puisque pour toutes les autres valeurs de θ_m , la fonction de distribution est égale à 0. Plus la surface est lisse, plus la fonction de distribution présente un pic fin, plus il faut augmenter le nombre d'échantillons pour diminuer la variance, il devient alors très coûteux d'utiliser un échantillonnage uniforme.

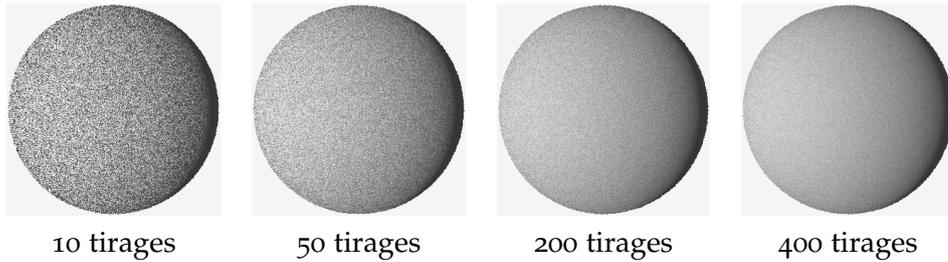


FIGURE 3.11 – Sphère Lambertienne interfacée rugueuse avec $K_d = 0.9$, $n_i = 1$ (sans interface donc non spéculaire) et $\sigma = 0.3$, éclairée par une source lumineuse ponctuelle. Une distribution uniforme est utilisée pour le choix aléatoire par pixel (tirages indépendants) des orientations de microfacettes.

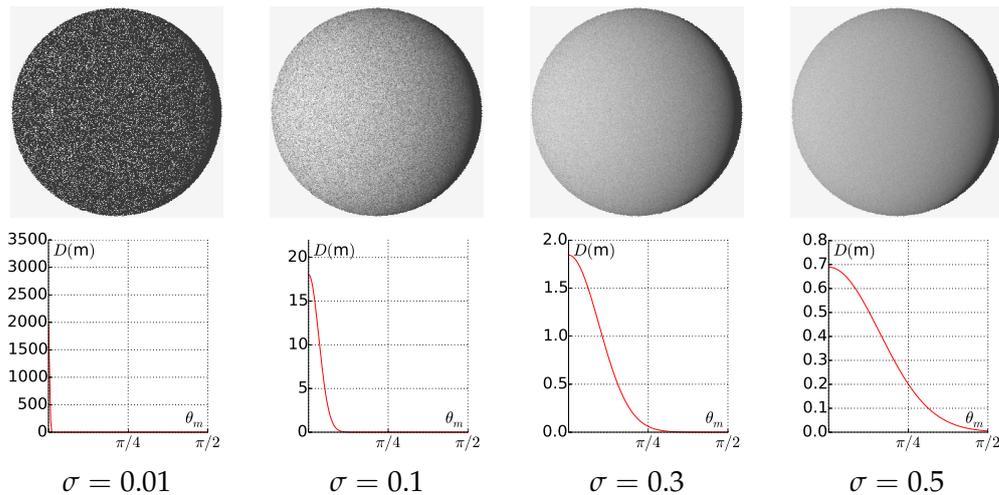


FIGURE 3.12 – Influence de σ sur la variance, observé sur une sphère Lambertienne interfacée rugueuse avec 400 tirages aléatoires uniformes de facettes par pixel. Les paramètres du modèle sont $K_d = 0.9$, $n_i = 1$.

Pour réduire le bruit et conserver une cohérence globale de l'aspect sur l'image sans augmenter le nombre d'échantillons, il est possible de réutiliser le tirage initial des orientations de facettes pour tous les points de l'objet. Ainsi la variance de l'estimateur ne produit pas de bruit sur l'image mais cette solution introduit un biais dans les calculs et la variance reste visible lorsque le même matériau est reproduit plusieurs fois dans les mêmes conditions d'éclairage (figure 3.13).

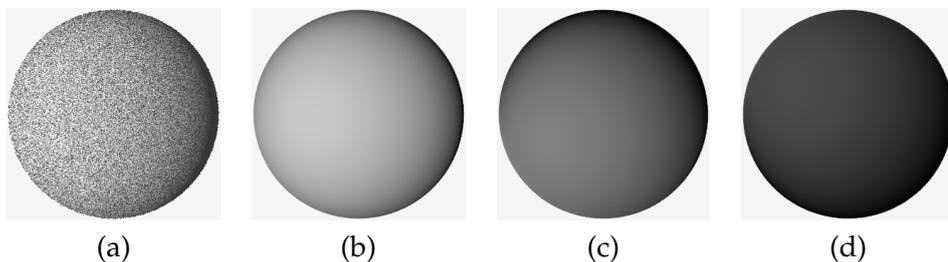


FIGURE 3.13 – Modèle Lambertien interfacé avec $K_d = 0.9$, $\sigma = 0.1$, $n_i = 1$. (a) 100 tirages aléatoires indépendants pour chaque pixel pour une distribution uniforme, le bruit observé illustre l'importance de la variance ; (b,c,d) le tirage aléatoire de distribution uniforme initial de 100 microfacettes est réutilisé pour chaque point de l'objet, les paramètres du modèle et l'éclairage sont identiques mais les images sont toutes différentes.

Lorsque la fonction échantillonnée présente de fortes variations, comme c'est le cas de la fonction de distribution des BRDF à base de microfacettes, la variance est importante avec un échantillonnage est uniforme. Afin de la diminuer, la méthode d'échantillonnage par

importance est souvent utilisée [Laf96, Veag8, KSKo1, WMLT07]. Elle consiste à échantillonner préférentiellement l'intégrale sur les zones importantes (sur le pic de la distribution puisqu'il représente les orientations de microfacettes les plus probables) en suivant une fonction de densité de probabilité (notée fdp dans la suite du document). Afin de concentrer les échantillons sur les régions importantes de la fonction de distribution, la fonction de densité de probabilité est choisie de forme semblable à $D(m)$. En effet le comportement d'une variable aléatoire x est décrit par la distribution des valeurs qu'elle peut prendre sur l'intervalle considéré, i.e. x est distribuée suivant la fdp . La fonction de densité de probabilité est telle que $fdp(x) \geq 0$ et $\int_{-\infty}^{\infty} fdp(x)dx = 1$. Afin de satisfaire cette condition, la fdp est choisie telle que $fdp(m) = D(m)|\mathbf{m.n}|$ (figure 3.14). L'espérance d'une fonction dépendant de x est :

$$E [g(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) fdp(x) dx, \quad (3.25)$$

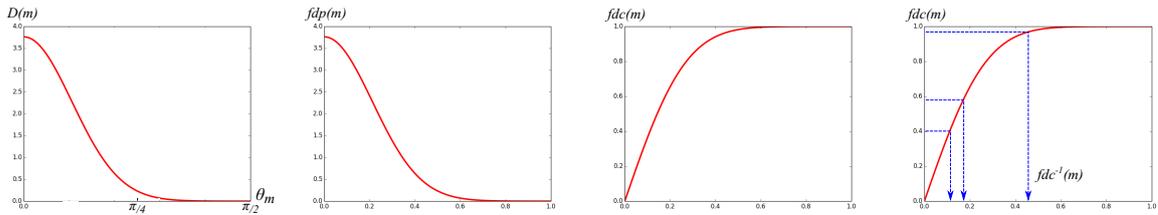
et l'estimateur de Monte-Carlo :

$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{g(x_i)}{fdp(x_i)}. \quad (3.26)$$

Pour résoudre l'intégrale de la composante diffuse (équation 3.15), l'échantillonnage par importance est réalisé en fonction de $D(\mathbf{m})$, avec la $fdp(\mathbf{m}) = D(\mathbf{m})|\mathbf{m.n}|$:

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \approx \frac{1}{N|\mathbf{s.n}||\mathbf{o.n}|} \sum_{k=1}^N f^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}_k) \frac{D(\mathbf{m})G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}_k)|\mathbf{s.m}_k||\mathbf{o.m}_k|}{fdp(\mathbf{m}_k)}. \quad (3.27)$$

Pour cela le calcul de la fonction de répartition (ou fonction de densité cumulative fdc) $fdc(x) = \int_{t=0}^x p(t)dt$ et son inversion permet d'effectuer un échantillonnage de manière à privilégier les échantillons sur le pic de la distribution (figure 3.14).



(a) fonction de distribution (b) fonction de densité de probabilité associée (c) fonction de répartition (d) échantillonnage sur la fonction de répartition

FIGURE 3.14 – Fonction de distribution Gaussienne $D(\mathbf{m})$ pour $\sigma = 0.2$, sa fonction de densité de probabilité associée $fdp = D(\mathbf{m})|\mathbf{m.n}|$ et sa fonction de répartition. L'inversion de la fonction de répartition permet d'échantillonner les valeurs de manière à éviter les échantillons θ_m tels que $D(\theta_m) \approx 0$.

Par exemple, pour la fonction de distribution Gaussienne, la fonction de densité probabilité s'écrit :

$$fdp(\theta_m) = D(\theta_m) \cdot |\mathbf{m.n}| = C \times e^{-\theta_m^2/2\sigma^2}, \quad (3.28)$$

et la fonction de répartition associée :

$$f_{dc}(\theta) = \int_{\theta_m=0}^{\theta} \int_{\varphi_m=0}^{2\pi} f_{dp}(\theta_m) \sin(\theta_m) d\theta_m d\varphi_m \quad (3.29)$$

$$= 2\pi \int_0^{\theta} C \times e^{-\theta_m^2/2\sigma^2} \sin(\theta_m) d\theta_m \quad (3.30)$$

$$= \frac{e^{-1/\sigma^2} \sqrt{2\pi^3} \left[-i \operatorname{erf} \left(\frac{i+\sigma^2\theta}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \operatorname{erfi} \left(\frac{i+\sigma^2\theta}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]}{2\sigma}. \quad (3.31)$$

Cette fonction étant difficile à inverser, l'échantillonnage par importance peut être effectué en utilisant une fonction de répartition associée à une fonction de distribution de forme semblable à la fonction de distribution Gaussienne. C'est le cas des distributions GGX [TR75, WMLT07] et Beckmann [BS63] qui sont équivalentes à la distribution Gaussienne pour des valeurs faibles de θ_m à condition d'utiliser $\tilde{\sigma} = \sqrt{2}\sigma$ (figure 3.15) et plus simple à inverser :

$$\operatorname{Gauss}(\sigma, \theta_m) \approx \operatorname{Beckmann}(\tilde{\sigma}, \theta_m) \approx \operatorname{GGX}(\tilde{\sigma}, \theta_m). \quad (3.32)$$

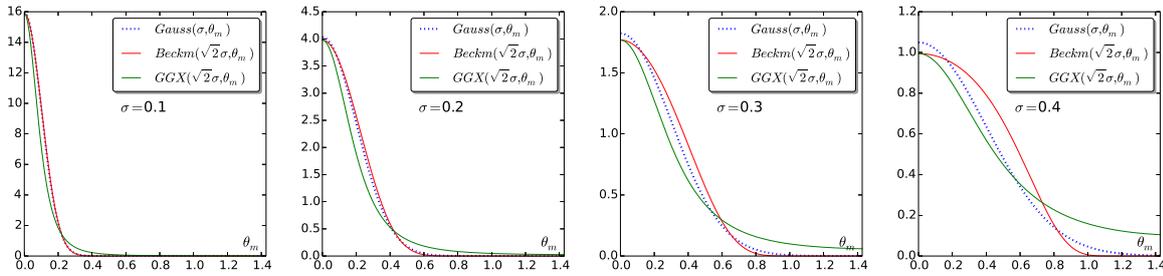


FIGURE 3.15 – Comparaison des distributions Gaussienne, Beckmann et GGX avec la correspondance $\tilde{\sigma} = \sqrt{2}\sigma$.

La fonction de distribution de Beckmann anisotrope présente deux paramètres de rugosité (déviations standard des pentes) associés à un système de coordonnées local, σ_x et σ_y . Le choix de l'orientation d'une normale pour un échantillonnage par importance d'une fonction de distribution anisotrope est réalisé grâce à deux variables aléatoires ζ_1 et ζ_2 de distribution uniforme [WMLT07]. Pour une fonction de distribution de Beckmann anisotrope, l'inversion de la f_{dc} donne :

$$\theta_m = \arctan \left(\sqrt{\frac{-\log(\zeta_1)}{\frac{\cos^2 \phi_m}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_m}{\sigma_y^2}}} \right), \quad (3.33)$$

$$\phi_m = \arctan \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \tan(2\pi\zeta_2) \right).$$

Les valeurs de la distribution de Beckmann pour des incidences rasantes décroissent beaucoup plus rapidement que celles d'une distribution Gaussienne (visible principalement pour des valeurs de $\sigma \geq 0.3$: figure 3.15), conduisant à des instabilités numériques si cette distribution est utilisée en remplacement de la fonction de Distribution Gaussienne. Au contraire l'utilisation de la fonction de distribution GGX, à la manière de Bagher et al. [BSH12], donne de meilleurs résultats. L'échantillonnage par importance d'une intégrale faisant intervenir une fonction de distribution Gaussienne peut donc être basé sur la distribution GGX de Walter et

al. [WMLT07, Bur12]. L'inversion de sa *fdc* donne :

$$\begin{aligned}\theta_m &= \arctan\left(\frac{\tilde{\sigma}\sqrt{\xi_1}}{\sqrt{1-\xi_1}}\right), \\ \varphi_m &= 2\pi\xi_2.\end{aligned}\quad (3.34)$$

Et pour la version anisotrope :

$$\begin{aligned}\theta_m &= \arctan\left(\sqrt{\frac{\xi_1}{(1-\xi_1)\left(\frac{\cos^2\phi_m}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2\phi_m}{\sigma_y^2}\right)}}\right), \\ \phi_m &= \arctan\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\tan(2\pi\xi_2)\right).\end{aligned}\quad (3.35)$$

La réflectance d'une surface à base de microfacettes non purement Lambertiennes suivant une distribution Gaussienne (e.g. modèle de Simonot ou modèle d'Oren et Nayar) peut donc être évaluée par un échantillonnage d'importance sans biais grâce à la distribution GGX avec la correspondance suivante lors de son utilisation :

$$Gauss(\sigma, \theta_m) \approx GGX(\tilde{\sigma}, \theta_m), \quad \tilde{\sigma} = \sqrt{2}\sigma. \quad (3.36)$$

La figure 3.16 présente une comparaison des résultats obtenus entre un échantillonnage uniforme et un échantillonnage d'importance avec quatre cents échantillons par pixel. Avec le même nombre de tirages, l'échantillonnage d'importance permet de réduire la variance ; plus σ est faible, plus les orientations de facettes sont choisies de manière efficace.

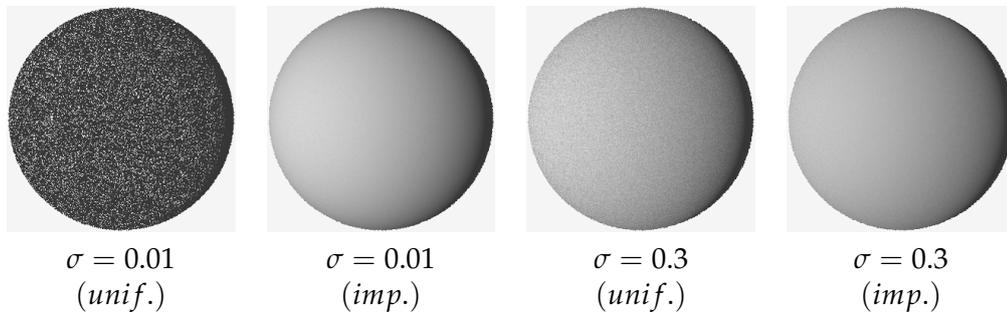


FIGURE 3.16 – Comparaison entre échantillonnage uniforme et échantillonnage d'importance pour $\sigma = 0.01$ et $\sigma = 0.3$, avec 400 tirages aléatoires par pixel ; $K_d = 0.9$, $n_i = 1$.

3.1.4 Mise en œuvre du modèle Lambertien interfacé et tracé de chemin

Afin de réaliser le rendu de scènes comportant des objets constitués d'un matériau Lambertien interfacé rugueux, nous proposons une solution d'implémentation simple et réalisable pour n'importe quel système de rendu utilisant une méthode de tracé de chemins.

Pour chaque élément de surface donné, la luminance réfléchie dans une direction d'observation est estimée :

$$L_r(\mathbf{o}) = \int_{\omega_s} L_i(\mathbf{s}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos\theta_s d\omega_s. \quad (3.37)$$

L'intégration sur les directions d'incidence de la lumière peut être réalisée par une méthode de Monte-Carlo. La fonction à échantillonner dépend de la BRDF du matériau (équation 3.37). Or la BRDF du modèle à base de microfacettes Lambertiennes interfacées est composée de deux termes : $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = f_b(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) + f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$. Si l'échantillonnage par importance est réalisé en fonction de la forme de la BRDF, lorsque le matériau présente un fort indice de réfraction et une rugosité faible (i.e. un matériau hautement spéculaire), les directions sont choisies principalement dans des directions proches du pic spéculaire. Dans ce cas la composante volumique, très peu échantillonnée engendre des erreurs de calcul sur la partie diffuse. Afin d'éviter ce problème, le choix des directions d'incidences entre composante diffuse et composante spéculaire doit être adapté. Nous proposons de réaliser l'échantillonnage par importance soit sur la composante diffuse, soit sur la composante spéculaire grâce à un choix orienté par la balance entre ces composantes. Cette balance dépend de l'indice de réfraction du matériau, le choix des directions d'incidence de lumière est donc réalisé en fonction de ce paramètre. La réflectance spéculaire totale est notée $R_s = r_i$ (r_i la réflectance de l'interface entre le milieu n_0 et n_1 , équation 3.13), et la réflectance totale du terme volumique est égale à :

$$R_d = \frac{1}{n_i^2} (1 - r_e)^2 \frac{K_d}{1 - K_d r_i} \quad (3.38)$$

La proportion entre R_s et R_d indique alors la contribution entre la direction de réflexion volumique et de réflexion spéculaire. Une variable aléatoire est choisie telle que $\xi_1 \in [0; 1[$ et si $\xi_1 < R_s / (R_s + R_d)$ alors l'échantillonnage est effectué pour la direction de réflexion spéculaire, sinon pour la direction de réflexion volumique.

L'échantillonnage d'importance pour la composante spéculaire dépend de :

$$f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{F(\mathbf{s}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{h})}{|\mathbf{s}, \mathbf{h}||\mathbf{o}, \mathbf{h}|}, \quad (3.39)$$

La direction est donc choisie en fonction de la fonction de densité de probabilité $D(\mathbf{m})|\mathbf{m}, \mathbf{n}|$ (section 3.1.3) et le poids associé est défini par [WMLT07] :

$$w(\mathbf{s}) = \frac{f_s(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})D(\mathbf{m})G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})}{4|\mathbf{s}, \mathbf{n}||\mathbf{o}, \mathbf{n}|p_o(\mathbf{s})}, \quad (3.40)$$

avec :

$$p_o(\mathbf{s}) = f d p(\mathbf{m}) \left\| \frac{\partial \omega_h}{\partial \omega_o} \right\| = f d p(\mathbf{m}) \frac{1}{4|\mathbf{o}, \mathbf{m}|}. \quad (3.41)$$

L'échantillonnage d'importance sur la partie volumique est plus complexe puisqu'une intégrale supplémentaire intervient (intégration sur toutes les orientations de microfacettes possibles) :

$$f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{K_d}{\pi n_i^2 (1 - r_i K_d)} \int_{\Omega_+} T(\mathbf{s}, \mathbf{m})T(\mathbf{o}, \mathbf{m})D(\mathbf{m})G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{s}, \mathbf{m}|}{|\mathbf{s}, \mathbf{n}|} \frac{|\mathbf{o}, \mathbf{m}|}{|\mathbf{o}, \mathbf{n}|} d\omega_m, \quad (3.42)$$

Pour simplifier le calcul, nous proposons de transférer cette intégration dans le système d'estimation de l'équation du rendu :

$$L_o(\mathbf{o}, \mathbf{n}) = \int_{\Omega_s^+} L_i(\mathbf{s}, \mathbf{n}) \int_{\Omega_m^+} \hat{f}_b(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_m d\omega_s, \quad (3.43)$$

où \hat{f}_b correspond à la composante volumique du modèle :

$$\hat{f}_b(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}|} f_b^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}). \quad (3.44)$$

Le choix de la direction d'incidence \mathbf{s} (intégration sur Ω_s^+ : équation 3.37) dépend de la *fdp* $\cos\theta_s/\pi$, et l'échantillonnage des orientations de microfacettes est réalisé par importance en fonction de la *fdp* $D(\mathbf{m})|\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}|$ (intégration de l'équation 3.44). L'échantillonnage par importance dépendant donc de la fonction de distribution choisie (section 3.1.3).

Afin de discuter le choix de différentes fonctions de distribution de microfacettes, et de leurs GAF associés, nous avons étudié le comportement du modèle pour ces différentes configurations. Le tableau 3.2 présente les configurations de distributions et de facteurs d'atténuation que nous avons utilisés (avec LI pour des microfacettes Lambertiennes interfacées).

TABLE 3.2 – Configurations des distributions et des facteurs d'atténuation géométrique

| Notation | Distribution (D) | Facteur d'atténuation géométrique (G) |
|-----------|----------------------|---|
| Gauss, TS | normales Gaussiennes | Torrance-Sparrow |
| Beckm, TS | Beckmann (pentes) | Torrance-Sparrow |
| Beckm, SB | Beckmann (pentes) | Smith-Bourlier |
| Walter | Walter TR-GGX | Walter GAF |

La figure 3.17 illustre l'influence des différentes configurations D-G sur notre modèle en fonction de l'indice de réfraction et de la rugosité de la surface. La discontinuité correspondant au GAF de Torrance-Sparrow influence essentiellement la BRDF pour des angles d'incidence de la lumière et d'observation rasants. En outre, lorsque la rugosité est faible et/ou lorsque n_i est proche de 1, la différence entre le GAF de Torrance-Sparrow et celui de Smith a tendance à diminuer. L'utilisation de la distribution GGX entraîne également un comportement particulier pour un matériau spéculaire (figure 3.17c rugosité faible et fort indice de réfraction) : la réflectance augmente pour des directions d'observation très rasantes. Ceci est dû à la traîne de cette distribution, plus haute que les autres distributions traditionnellement utilisées pour les modèles à base de microfacettes. Les matériaux suivant une distribution GGX sont alors plus sombres.

Pour comparaison, la figure 3.18 montre les variations relatives des différentes configurations D-G pour les mêmes paramètres (à noter que pour la distribution Gaussienne, σ est divisé par $\sqrt{2}$: équation 3.36). Pour des distributions Gaussiennes ou Beckmann, le GAF choisi influe très peu sur l'apparence des objets représentés. Le GAF de Torrance et Sparrow reste donc intéressant pour sa simplicité d'implémentation. La comparaison des distributions montre de nettes différences sur l'utilisation de la fonction de distribution GGX. Dans tous les cas, la traîne de cette distribution diminue lentement, ce qui peut être un avantage pour certains matériaux (comme le montre la figure 10 de l'article [WMLT07] et les figures 8 et 9 de l'article [BSH12]). Cette longue traîne implique cependant des orientations de microfacettes presque verticales, influençant largement la réflexion aux angles rasants et induisant des phénomènes peu réalistes ainsi que du bruit. Certains auteurs ont également mis en évidence les surfaces plus sombres obtenues avec cette distribution, ce qui est clairement visible pour de fortes rugosités sur les images de différence de la figure 3.18. Pour ces raisons nous préférons utiliser les distributions de Beckmann et Gaussienne.

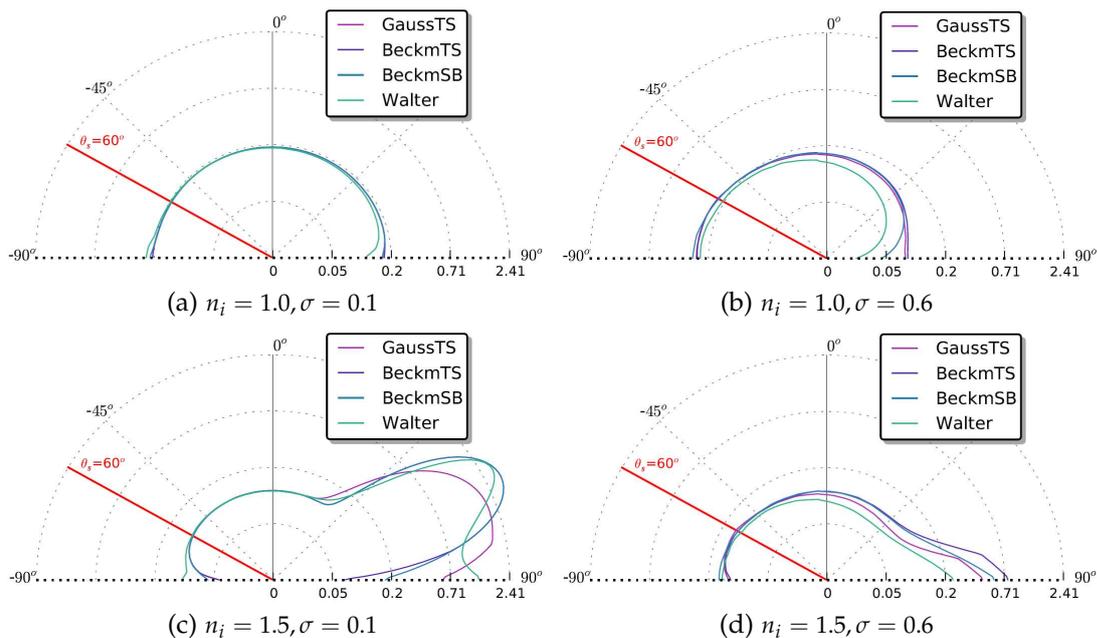


FIGURE 3.17 – Influence de l'indice de réfraction et de la rugosité sur la BRDF pour différente valeur de n_i et σ , avec $\theta_i = 60^\circ$ et pour différentes configurations D-G.

| | | IL/Beckm Smith | IL/Beckm Torr-Sparr | IL/Gauss Torr-Sparr | IL/Walter GGX |
|-----------------|-------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| $\sigma = 0.05$ | $n_i = 1.0$ | | | | |
| | $n_i = 1.5$ | | | | |
| $\sigma = 0.6$ | $n_i = 1.0$ | | | | |
| | $n_i = 1.5$ | | | | |

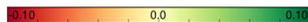


FIGURE 3.18 – Images et images de différence de surfaces composées de microfacettes Lambertiennes interfacées avec différentes distributions et GAF, avec $K_d = 0.6$. Les images de différences correspondent à une erreur quadratique moyenne.

3.2 Modèle Lambertien interfacé : évolutions et formule approchée

Notre recherche d'un modèle de réflectance est orientée par différents critères, avec notamment un souci de respect des lois de la physique. Notre choix s'est porté sur l'utilisation du modèle décrit par Simonot [Sim09], présenté dans le domaine de l'optique. Nous proposons des solutions d'implémentation de ce modèle pour différentes fonctions de distributions ainsi que leur facteur d'atténuation géométrique associé, non pris en compte par le modèle de Simonot. Nous proposons également de prendre en compte l'influence des réflexions lumineuses multiples entre microfacettes et d'ajouter leur contribution au modèle. Pour cela, nous avons réalisé des simulations par une méthode de lancer de rayons afin d'étudier l'influence sur la BRDF macroscopique de ces inter-réflexions entre microfacettes. Les résultats, enregistrés au moyen d'un capteur virtuel montrent une contribution non négligeable. Nous utilisons également une méthode de tabulation, constituant un système générique de sauvegarde, et permettant d'uniformiser le stockage des données de réflectance, mesurées ou simulées. Ainsi des données issues de simulation et sauvegardées dans ces tableaux, ainsi que la contribution des inter-réflexions, servent de référence à l'élaboration de formulations approchées permettant de réaliser des identifications de paramètres sur des données mesurées. Des résultats d'identification sur des données réelles, issues de bases de données, sont présentés en dernière section.

3.2.1 Réflexions multiples de la lumière entre microfacettes

L'équation générale des modèles à base de microfacettes (équation 3.14) ne prend en compte qu'une seule réflexion de la lumière par les microfacettes (figure 3.19a). Or un rayon lumineux peut être réfléchi plusieurs fois entre les microfacettes avant de quitter la micro-surface (figure 3.19). Cela rajoute un niveau d'intégrale sur un intervalle non borné aux calculs (le nombre de rebonds de la lumière peut être infini). Seuls Oren et Nayar [ON94] proposent de prendre en compte deux réflexions de la lumière entre microfacettes (figure 3.19b) purement Lambertiennes d'une surface constituée de V-cavités. Une formule approchée, notée L_2 , est proposée pour ce calcul (section 3.2.3).

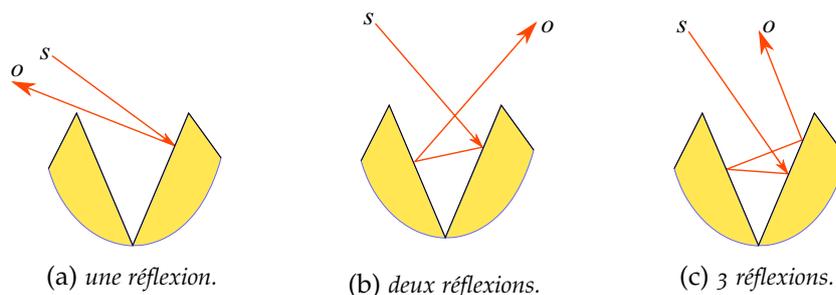


FIGURE 3.19 – Chemin de la lumière à l'intérieur d'une V-cavité. (a) Exemple de chemin à une réflexion : les modèles de BRDF à base de microfacettes ne considèrent généralement pas les inter-réflexions entre facette et prennent en compte une seule réflexion de la lumière. (b) Exemple de chemin à deux réflexions : la formulation L_2 d'Oren et Nayar prend en compte ces chemins. (c) Exemple de chemin à trois réflexions.

Lorsque l'on considère la possibilité de réflexions multiples entre les microfacettes, la BRDF totale réfléchi par la surface, notée $f_\infty(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$, est égale non seulement à la BRDF prenant en compte une réflexion de lumière par les microfacettes, notée f_1 , mais également à la BRDF prenant en compte exactement deux réflexions de lumière, notée f_2 (figure 3.19), et ainsi de suite jusqu'à un nombre potentiellement infini de réflexions. Ainsi : $f_\infty = f_1 + f_2 + \dots$, avec f_k correspondant à la luminance observée (ou à la réflectance si l'éclairement est égal à 1) pour

exactement k réflexions de lumière entre les microfacettes. Le calcul de $f_\infty(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ implique de prendre en compte la luminance totale réfléchiée par une microfacette, notée $R_\infty^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$, pour chaque orientation de microfacette possible. Ainsi la luminance réfléchiée dans la direction \mathbf{o} pour un faisceau collimaté de lumière incidente dans la direction \mathbf{s} considérée est définie par :

$$f_\infty(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \int_{\Omega_+} \frac{R_\infty^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m})}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}|} \frac{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{m}|}{|\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}|} D(\mathbf{m}) d\omega_m. \quad (3.45)$$

La luminance totale réfléchiée par une microfacette, $R_\infty^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ résulte de différents chemins de lumière possibles entre microfacettes : chemin de lumière après une réflexion, chemin après deux réflexions, chemin après k réflexions. La contribution de chacun de ces chemins \bar{x} est notée $L(\bar{x})$ et leur intégration sur le domaine S des chemins possibles permet d'estimer $R_\infty^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$:

$$R_\infty^\mu(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \int_S L(\bar{x}) d\bar{x}. \quad (3.46)$$

Pour prendre en compte la contribution de chaque chemin de lumière pour chaque orientation de microfacette possible nous proposons de réaliser le calcul par simulation. Pour cela, une source de luminance unitaire est considérée et un chemin est tracé à partir de celle-ci vers une microfacette grâce à une méthode de tracé de chemin. L'orientation de la microfacette est déterminée par échantillonnage d'importance et un point x_s est choisi sur la microfacette vers lequel le chemin partant de la source est tracé. La direction de réflexion est alors choisie selon la BRDF considérée afin de privilégier les directions de réflexion les plus probables (section 3.1.4) et de même pour chaque intersections du chemin avec une microfacette de la V-cavité. Lorsque le chemin de lumière sort de la V-cavité sa contribution est collectée par un capteur virtuel hémisphérique divisé en cellules d'angle solide égal (figure 3.20). La cellule par laquelle passe le rayon réfléchi enregistre la contribution du chemin. Cette opération est répétée pour un nombre de chemins fixé. Enfin pour chaque cellule du capteur la réflectance est estimée grâce à la contribution de tous les chemins collectés par une cellule :

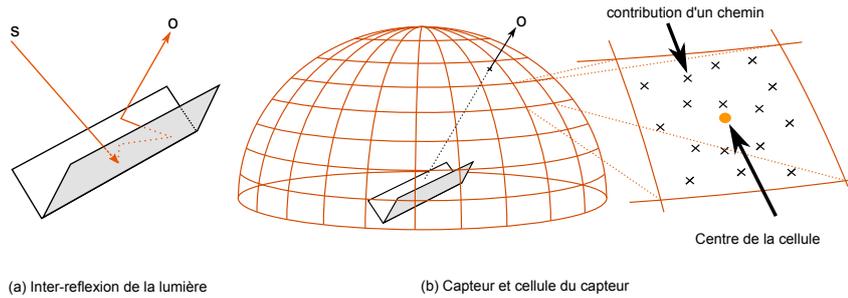


FIGURE 3.20 – Inter-réflexions sur une cavité en V : (a) la lumière provient d'une direction \mathbf{s} , interagit avec les microfacettes de la cavité avant de quitter la surface dans une direction \mathbf{o} . Sa contribution est collectée par un capteur hémisphérique (b) divisé en cellule d'angle solide égal. $f_\infty(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ avec \mathbf{o} passant par le centre de la cellule, est estimée grâce à la contribution de tous les chemins passant par cette cellule.

$$f_\infty(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \approx \sum_{j=1}^N \frac{1}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}|} L(\bar{x}_j) \frac{|\mathbf{o}_{\bar{x}_j} \cdot \mathbf{m}_j|}{|\mathbf{o}_{\bar{x}_j} \cdot \mathbf{n}|} \frac{D(\mathbf{m}_j)}{N_{tot} \Delta_0}, \quad (3.47)$$

avec \mathbf{m}_j la normale de la microfacette choisie par l'échantillonnage par importance, $\mathbf{o}_{\bar{x}_j}$ la direction de sortie du chemin \bar{x}_j , \mathbf{o} la direction entre le point de surface et le centre de la cellule, N le nombre de chemins passant par la cellule considérée et N_{tot} le nombre total

d'échantillons utilisés pour évaluer l'équation 3.45 et Δ_0 l'angle solide correspondant à la cellule.

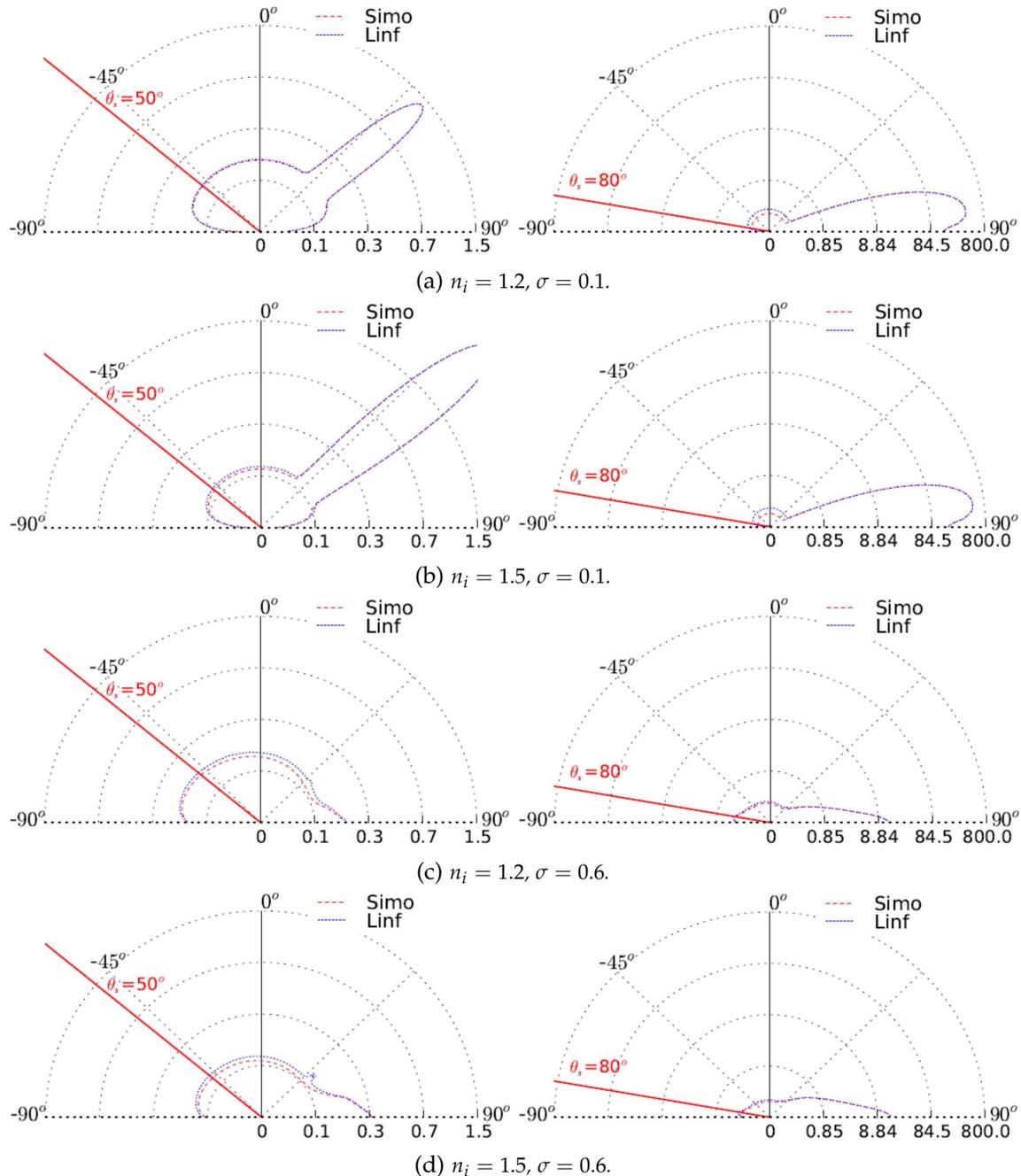


FIGURE 3.21 – Surface Lambertienne interfacée rugueuse sans réflexions entre microfacettes (courbes en traits pointillés rouges : Simonot) et avec un nombre infini de réflexions entre microfacettes (courbes en bleu : Linf). Les simulations pour le calcul des inter-réflexions sont réalisées par méthode de tracé de chemin avec un milliard de chemins.

La figure 3.21 illustre les effets des inter-réflexions sur la réflectance totale. Lorsque la rugosité de la surface augmente, les inter-réflexions apportent une contribution plus importante à la réflectance. En effet plus la surface est rugueuse (plus les pentes des cavités sont fortes), plus la lumière est réfléchi à l'intérieur d'une cavité avant d'en ressortir. Lorsque θ_s l'angle entre la direction d'incidence de la lumière et la normale à la surface augmente, la contribution des inter-réflexions est significative sur la composante diffuse de la BRDF. Ceci est dû à la redistribution de la lumière dans différentes directions après réflexions multiples à l'intérieur

des cavités. Pour certaines configurations, un pic fin est observable dans la direction de réflexion miroir, principalement pour un fort indice de réfraction. Lorsque le lobe spéculaire est dans la direction de réflexion miroir ce pic fin, masqué par le lobe, n'est plus observable. Lorsque les microfacettes sont correctement orientées, une double réflexion spéculaire à l'intérieur d'une cavité, d'autant plus probable que n_i est forte, entraîne la réflexion du rayon quittant la cavité dans la direction de réflexion miroir par rapport à la direction d'incidence pour la surface macroscopique (figure 3.22).

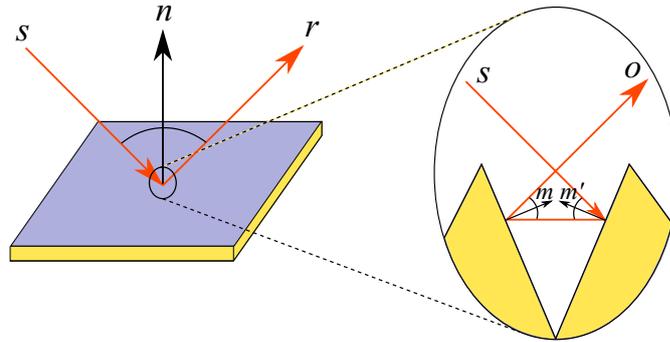


FIGURE 3.22 – Construction d'une double réflexion purement spéculaire à l'intérieur d'une cavité dont les microfacettes sont de normales m et m' . Du point de vue de la surface macroscopique de normale n la réflexion est orienté dans la direction de réflexion miroir r .

La figure 3.23 montre que l'apport à la réflectance est principalement dû à une double réflexion de la lumière et est importante pour une surface diffusante rugueuse. En revanche elle est presque inexistante pour des microfacettes purement spéculaires. L'écart entre f_2 l'apport d'une double réflexion de la lumière à l'intérieur d'une cavité et f_∞ l'apport d'un nombre infini de réflexions est à son maximum pour des microfacettes purement diffuses et diminue avec l'augmentation de la specularité des microfacettes.

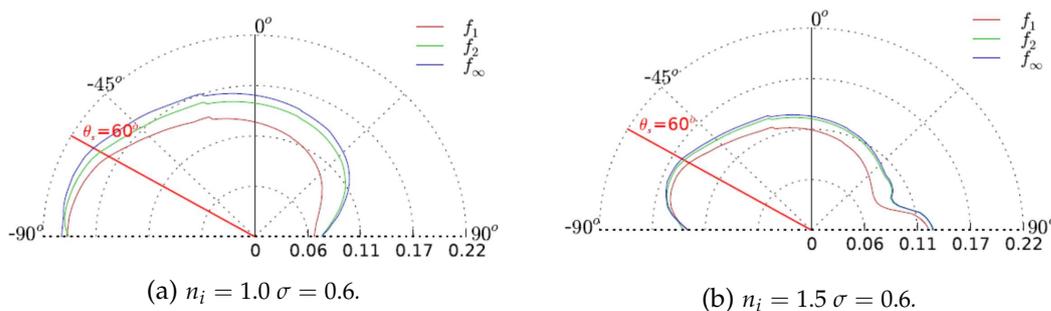


FIGURE 3.23 – Réflectance des cavités avec inter-réflexions : f_1 correspond à une BRDF avec une seule réflexion de la lumière ; f_2 correspond à une BRDF avec une deuxième réflexion de la lumière à l'intérieur d'une cavité ; f_∞ inclut un nombre j de réflexions dont l'arrêt est déterminé grâce à une roulette Russe.

3.2.2 Tabulation des données

L'utilisation en rendu d'un modèle à base de microfacettes non purement spéculaires pose un problème de performance des calculs. En effet, l'intégration de la contribution de toutes les orientations de microfacettes demande un échantillonnage du domaine d'intégration et une répétition des calculs pour chacun de ces échantillons. Afin de permettre des calculs plus rapides, pour le rendu par exemple, il est possible de tabuler les données de réflectance, à la manière des données mesurées disponibles dans différentes bases de données et présentée

sous forme de tableaux. L'organisation des données dans les tableaux permet un accès plus rapide aux données recherchées que la résolution de l'intégrale (équation des modèles à base de microfacette 3.14).

La fonction de BRDF dépend au total de cinq paramètres : θ_s et ϕ_s les angles polaires de la direction d'incidence de la lumière, θ_o et ϕ_o les angles polaires de la direction d'observation, et λ la longueur d'onde considérée. Dans le cas d'une BRDF isotrope, cela peut être réduit à quatre paramètres puisque la fonction est symétrique sur ϕ_s . Chaque ligne de nos tableaux contiennent ainsi ces cinq paramètres, le paramètre λ pouvant renseigner une longueur d'onde ou un canal RGB, ainsi que la valeur de réflectance. Ainsi pour chaque jeu de paramètres possible, les données issues de notre modèle Lambertien interfacé sont calculées pour des directions échantillonnées à intervalle d'angle fixe (tous les cinq degrés ou tous les dix degrés par exemple) entre 0 et 90° pour θ_s et θ_o et de 0 à 360° pour ϕ_o . Le pas de tabulation à adopter dépend du niveau de précision recherché et donc de l'utilisation prévue pour les tableaux. Les valeurs sont sauvegardées de façon triée suivant l'angle θ_s , puis θ_o en enfin ϕ_o , permettant ainsi un accès direct et rapide aux données lors de l'utilisation des tableaux. Cette tabulation, pour le modèle Lambertien interfacé, ne concerne que la composante volumique. En effet, le calcul de la composante spéculaire est direct et l'échantillonnage du lobe spéculaire entraînerait une perte de précision importante.

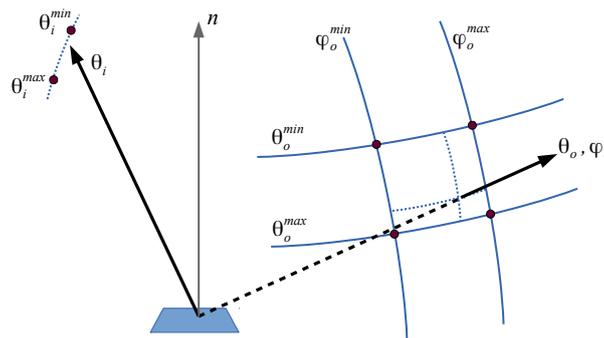


FIGURE 3.24 – Interpolation à partir des valeurs tabulées ; bilinéaire sur (θ_o, ϕ_o) puis linéaire sur θ_i .

Lors de l'utilisation des tableaux, l'accès aux données est direct : pour une direction d'incidence et une direction d'observation donnée l'indice dans le tableau se déduit grâce aux angles θ_s , θ_o et ϕ_o . Les données étant échantillonnées, un processus d'interpolation trinéaire entre les échantillons est utilisé pour obtenir la valeur recherchée (figure 3.24). Les valeurs de BRDF $f(\theta_s, \theta_o, \phi_o)$ sont estimées par interpolation linéaire entre $f(\theta_s^{min}, \theta_o, \phi_o)$ et $f(\theta_s^{max}, \theta_o, \phi_o)$, θ_s^{min} et θ_s^{max} étant les angles d'incidence respectivement inférieur et supérieur à θ_s les plus proches ; les valeurs de $f(\theta_s^{min}, \theta_o, \phi_o)$ et de $f(\theta_s^{max}, \theta_o, \phi_o)$ étant elles-mêmes obtenues par interpolation bilinéaire sur (θ_o, ϕ_o) . Ce processus permet de produire des images avec le moins de crénelage possible (figure 3.25).

La production d'images de synthèse à l'aide de tableaux pour notre modèle peut donc se faire par recherche de la valeur de la composante volumique dans un tableau et ajout de la composante spéculaire, calculée analytiquement. Lors du calcul de l'équation du rendu, l'échantillonnage de l'intégrale peut être réalisé de manière uniforme pour la composante volumique puisque celle-ci présente des variations basses fréquences. En revanche la composante spéculaire doit être évaluée grâce à un échantillonnage d'importance dépendant de la fonction de distribution choisie (section 3.1.3). En effet la tabulation de la composante spéculaire entraîne une perte d'information sur le lobe lorsqu'il est fin et n'apporte pas de gain

de temps de calcul puisque l'équation est simple et son évaluation directe.

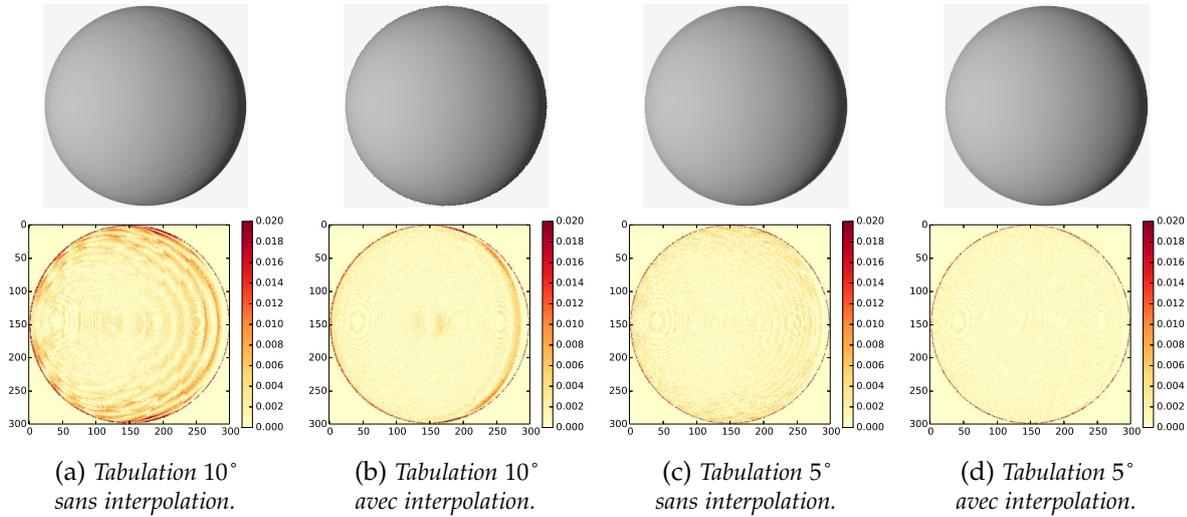


FIGURE 3.25 – Comparaison de l'influence du pas de tabulation de la partie volumique du modèle Lambertien interfacé (5 et 10°), et de l'interpolation (avec et sans) sur le rendu et image de différence correspondante entre les modèles tabulés et une image de référence réalisée directement par échantillonnage d'importance avec 1600 tirages par pixel.

La figure 3.25 montre l'influence du pas de tabulation et de l'interpolation sur les images de synthèse produites à partir de tableaux. Elle permet d'observer le rendu obtenu grâce à l'utilisation de tableaux dont les données sont échantillonnées tous les 5° et tous les 10°, avec et sans interpolation et la différence par rapport une image de référence réalisée par un échantillonnage par importance. Les images issues d'une tabulation tous les 10° sans interpolation présentent très nettement des cercles concentriques que l'interpolation permet de corriger mais un effet de crénelage apparaît alors sur les bords de la sphère. Une tabulation tous les 5° sans interpolation permet une très nette amélioration du rendu, les cercles concentriques sont très peu perceptibles et les résultats avec interpolation ne présentent pas de défaut visuel. La figure 3.26 présente une courbe sur laquelle figurent les échantillons d'un tableau dont le pas de tabulation est de 5° ainsi que leur interpolation. Le nombre d'échantillons pour cette tabulation est suffisamment important pour obtenir une courbe lisse et sans crénelage grâce à l'interpolation des données.

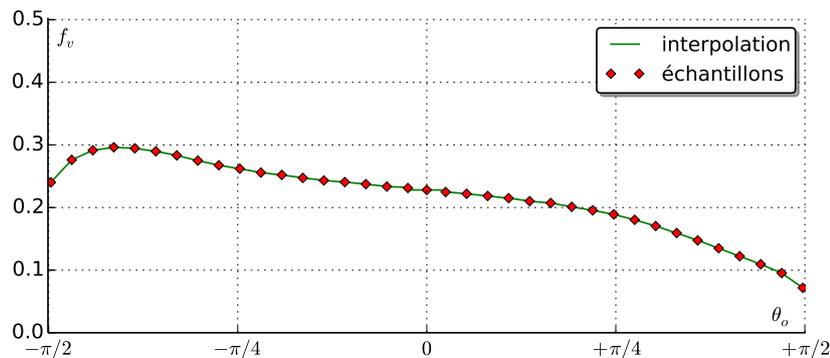


FIGURE 3.26 – Tabulation de la partie volumique du modèle Lambertien interfacé tous les 5 degrés, illustration sur le plan d'incidence, avec $K_d = 0.9$, $n_i = 1.2$, $\sigma = 0.3$, pour une incidence à 60°.

Les données issues de simulations, sauvegardées dans des tableaux, servent de base à

l'élaboration d'un modèle approché. Ainsi des tableaux, avec un pas de tabulation de 5° ont été produits pour différents paramètres du modèle.

3.2.3 Formulation approchée

Afin d'utiliser notre modèle Lambertien interfacé en rendu, nous avons proposé des solutions d'implémentation par méthode de Monte-Carlo ainsi que la sauvegarde des données sous forme de tableau. Cependant l'identification de paramètres sur un modèle mathématique nécessite l'estimation d'un grand nombre de valeurs du modèle, ce processus est alors trop long avec une estimation par méthode de Monte-Carlo. Pour permettre l'utilisation du modèle Lambertien interfacé pour l'identification de paramètres, nous proposons une version approchée, plus rapide à calculer. Notre modèle généralise différents modèles de la littérature, parmi lesquels celui d'Oren et Nayar [ON94]. Nous nous basons sur leur formulation approchée pour l'élaboration de celle des microfacettes Lambertiennes interfacées. Nous proposons deux versions approchées : une version pour une fonction de distribution de microfacettes Gaussienne et une autre version pour une distribution de Beckmann. La formulation de la composante volumique étant :

$$f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{K_d}{\pi n_i^2 (1 - r_i K_d)} \int_{\Omega_+} T(\mathbf{s}, \mathbf{m}) T(\mathbf{o}, \mathbf{m}) D(\mathbf{m}) G(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{m}) \frac{|\mathbf{s}, \mathbf{m}|}{|\mathbf{s}, \mathbf{n}|} \frac{|\mathbf{o}, \mathbf{m}|}{|\mathbf{o}, \mathbf{n}|} d\omega_m. \quad (3.48)$$

Notons $\bar{T}(\mathbf{u}, \mathbf{n})$ une expression approchée pour l'intégration de la fonction de transmittance du matériau de l'extérieur du matériau vers l'intérieur pour $\mathbf{u} = \mathbf{s}$ et de l'intérieur vers l'extérieur pour $\mathbf{u} = \mathbf{o}$:

$$\bar{T}(\mathbf{u}, \mathbf{n}) = a T(\mathbf{u}, \mathbf{n}) + b t_{01}, \quad (3.49)$$

avec $t_{01} = 1 - r_e$ la transmittance de l'interface.

Notons également F_a une approximation de l'intégration des fonctions de distributions et d'atténuation géométrique. L'équation 3.48 peut alors être formulée de la façon suivante :

$$f_v(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \approx \frac{1}{n_i^2 (1 - K_d r_i)} \bar{T}(\mathbf{s}, \mathbf{n}) \bar{T}(\mathbf{o}, \mathbf{n}) F_a, \quad (3.50)$$

avec :

$$F_a = (1 + \max[-1, c * F'_a]) f_a^*(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}), \quad (3.51)$$

$$F'_a = (F + (r_e - F)) (1 - |\mathbf{s}, \mathbf{n}|)^2 (1 - |\mathbf{o}, \mathbf{n}|)^2 \text{Min}[0, \cos(\varphi_o - \varphi_s)], \quad (3.52)$$

où $f_a^*(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ correspond à une formulation approchée pour une surface Lambertienne rugueuse avec une distribution de Beckmann ($f_a^b(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ pour laquelle nous proposons une formulation approchée) ou Gaussienne ($f_a^g(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ correspondant au modèle approché d'Oren et Nayar). Nous avons choisi d'utiliser des fractions rationnelles de polynômes, rapides à évaluer :

$$a = \frac{(a_1^* + a_2^* \sigma + a_3^* \sigma^2)}{(a_4^* + a_5^* \sigma + a_6^* \sigma^2)} \quad (3.53)$$

$$b = \frac{(b_1^* + b_2^* \sigma + b_3^* \sigma^2)}{(b_4^* + b_5^* \sigma + b_6^* \sigma^2)} \quad (3.54)$$

$$c = \frac{(c_1^* + c_2^* \sigma + c_3^* \sigma^2)(c_4^* + c_5^* n_i + c_6^* n_i^2)}{(c_7^* + c_8^* \sigma + c_9^* \sigma^2)(c_{10}^* + c_{11}^* n_i + c_{12}^* n_i^2)} \quad (3.55)$$

Les coefficients a , b et c dépendent de la distribution utilisée (tableaux 3.3 et 3.4). Afin d'identifier ces coefficients (tables 3.3, 3.4 et 3.5), les données de réflectance pour la composante volumique ont préalablement été précalculées pour des valeurs de n_i (indice de réfraction) de 1 à 1.5 et de σ (paramètre de rugosité) de 0.01 à 0.6, pour chacune des deux distributions. Cette formulation approchée prend également en compte les inter-réflexions entre microfacettes. Elles sont simulées pour un nombre infini d'inter-réflexion entre facettes d'une cavité et pour K_d de 0 à 0.9, n_i de 1 à 1.5 et σ de 0.2 à 0.6 (en dessous de $\sigma = 0.2$ les inter-réflexions n'apportent aucune contribution supplémentaire notable à la luminance réfléchie).

TABLE 3.3 – Valeurs des constantes pour des microfacettes Lambertiennes avec une distribution de Beckmann.

| a | | | |
|---------|----------|------------|----------|
| a_1^b | 0.8835 | a_4^b | 0.8821 |
| a_2^b | 6.84 | a_5^b | 8.421 |
| a_3^b | -2.821 | a_6^b | 29.312 |
| b | | | |
| b_1^b | -1.252 | b_4^b | 57.04 |
| b_2^b | 203.341 | b_5^b | 73.376 |
| b_3^b | -313.617 | b_6^b | -252.889 |
| c | | | |
| c_1^b | 0.2623 | c_7^b | 1.2746 |
| c_2^b | -50.2477 | c_8^b | -7.303 |
| c_3^b | 379.377 | c_9^b | -19.669 |
| c_4^b | -89.235 | c_{10}^b | 25.3924 |
| c_5^b | 146.273 | c_{11}^b | -17.6218 |
| c_6^b | -36.1669 | c_{12}^b | -8.951 |

TABLE 3.4 – Valeurs des constantes pour des microfacettes Lambertiennes avec une distribution Gaussienne.

| a | | | |
|--------------|----------|-----------------|----------|
| a_1^σ | 12.006 | a_4^σ | 11.99 |
| a_2^σ | -19.028 | a_5^σ | 31.336 |
| a_3^σ | 7.571 | a_6^σ | -10.886 |
| b | | | |
| b_1^σ | -6.378 | b_4^σ | 698.885 |
| b_2^σ | 3113.067 | b_5^σ | 2083.959 |
| b_3^σ | -291.368 | b_6^σ | 64.749 |
| c | | | |
| c_1^σ | 0.0162 | c_7^σ | -1.159 |
| c_2^σ | 16.044 | c_8^σ | -0.3348 |
| c_3^σ | 88.159 | c_9^σ | -28.214 |
| c_4^σ | -58.829 | c_{10}^σ | 1.164 |
| c_5^σ | 79.44 | c_{11}^σ | 2.12 |
| c_6^σ | -17.7189 | c_{12}^σ | -3.298 |

Les termes f_a^σ et f_a^b , correspondant aux fonctions approchées représentant des surfaces Lambertiennes rugueuses avec respectivement une distribution de microfacettes Gaussienne et de Beckmann, suivent la formule générale du modèle d'Oren et Nayar [ON94] :

$$f_a^*(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{K_d}{\pi} \left[C_1^* + C_2^* \cos(\varphi_o - \varphi_s) \tan \beta + C_3^* \left(1 - |\cos(\varphi_o - \varphi_s)| \tan \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \right]. \quad (3.56)$$

Les valeurs C_1^* , C_2^* et C_3^* pour une surface Lambertienne rugueuse suivant une distribution de microfacettes Gaussienne (correspondant au modèle approche d'Oren et Nayar) sont :

$$\begin{aligned} C_1^g &= 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33} \\ C_2^g &= \begin{cases} 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.99} \sin \alpha & \text{si } \cos(\phi_o - \phi_s) \geq 0 \\ 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.99} \left(\sin \alpha - \left(\frac{2\beta}{\pi} \right)^3 \right) & \text{sinon} \end{cases} \\ C_3^g &= 0.125 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \left(\frac{4\alpha\beta}{\pi^2} \right)^2, \end{aligned} \quad (3.57)$$

avec $\alpha = \text{Max}(\theta_s, \theta_o)$ et $\beta = \text{Min}(\theta_s, \theta_o)$.

Les valeurs pour une surface Lambertienne rugueuse suivant une distribution de microfacettes de Beckmann (identifiée sur les données issues de nos simulations) sont :

$$\begin{aligned} C_1^b &= 1.0 - \frac{A\sigma^2}{B + C\sigma + D\sigma^2}, \\ C_2^b &= \tan(\beta) \frac{E\sigma^2}{F + G\sigma + H\sigma^2 + I\sigma^3} (\sin \alpha - C_4), \\ C_3^b &= \tan\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \frac{J\sigma^2}{K + L\sigma + M\sigma^2} \left(\frac{4\alpha\beta}{\pi^2}\right)^2, \\ C_4 &= \begin{cases} 0 & \text{si } \cos(\phi_o - \phi_s) \geq 0 \\ \frac{2\beta^3}{\pi} & \text{sinon} \end{cases}, \end{aligned}$$

Les valeurs des constantes A, \dots, L sont données dans la table 3.5.

TABLE 3.5 – Valeurs des paramètres du modèle approché pour des surfaces constituée de microfacettes Lambertiennes à distribution de Beckmann.

| | | | | | | | | | |
|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|
| A | 7.07944 | D | 8.34372 | G | 179.001 | J | 345.335 | M | 1623.54 |
| B | 8.66467 | E | 169.905 | H | 222.806 | K | 1024.89 | | |
| C | 11.4317 | F | 21.7364 | I | 13.7846 | L | 1125.28 | | |

Enfin lors de l'utilisation d'une fonction de distribution Gaussienne (table 3.1), le paramètre C correspond à la constante de normalisation telle que la fonction de distribution réponde à $\int_{\Omega^+} D(\mathbf{m})|\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}|d\omega_m = 1$. Cette constante n'a pas de solution analytique, nous en proposons une fonction approchée :

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} &= \int_{\Omega^+} e^{(-\theta_m^2/2\sigma^2)} d\omega_m \\ &= \int_{\varphi_m=0}^{2\pi} \int_{\theta_m=0}^{\pi/2} e^{(-\theta_m^2/2\sigma^2)} \sin\theta_m d\theta_m d\varphi_m \\ &= 2\pi \int_{\theta_m=0}^{\pi/2} e^{(-\theta_m^2/2\sigma^2)} \sin\theta_m d\theta_m \\ &= \frac{\sigma\sqrt{\pi^3}}{\sqrt{2}} e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \times \left[2 \operatorname{erfi}\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erfi}\left(\frac{2\sigma^2 - i\pi}{2\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erfi}\left(\frac{2\sigma^2 + i\pi}{2\sqrt{2}\sigma}\right) \right], \end{aligned} \quad (3.58)$$

où erfi est la fonction d'erreur imaginaire. Afin de réduire les temps de calcul par rapport aux calculs utilisant la fonction d'erreur imaginaire, nous proposons une fonction approchée [TSB⁺14] plus pratique à manipuler et basée sur une fraction rationnelle, à la manière de Schlick [Sch94] :

$$\frac{1}{C} = 2\pi \left(\frac{K_2\sigma^2 + K_3\sigma^3 + K_4\sigma^4 + K_5\sigma^5 + K_6\sigma^6}{K'_0 + K'_2\sigma^2 + K'_3\sigma^3 + K'_4\sigma^4 + K'_5\sigma^5 + K'_6\sigma^6} \right), \quad (3.59)$$

avec :

| | | | |
|---------|----------|----------|---------|
| | | $K'_0 =$ | 145.294 |
| $K_2 =$ | 146.79 | $K'_2 =$ | 1.12103 |
| $K_3 =$ | -34.7145 | $K'_3 =$ | 677.137 |
| $K_4 =$ | 241.138 | $K'_4 =$ | 752.726 |
| $K_5 =$ | -384.291 | $K'_5 =$ | -49.709 |
| $K_6 =$ | 2287.69 | $K'_6 =$ | 2231.53 |

Les calculs sont 8 fois plus rapides par rapport à l'utilisation de la fonction d'erreur imaginaire et l'erreur est inférieure à 0.11%.

La figure 3.27 présente des comparaisons entre une intégration par méthode de Monte Carlo associée aux données d'inter-réflexions multiples et le modèle approché proposé avec respectivement la déclinaison Gaussienne et la déclinaison Beckmann. Une faible différence est observée entre les données issues de simulation et le résultat prédit par le modèle approché aux directions d'observation rasantes pour une incidence de lumière rasante. L'écart est plus grand pour la distribution de Beckmann que pour la distribution Gaussienne mais ce comportement n'est observable que pour de fortes valeurs de n_i et σ .

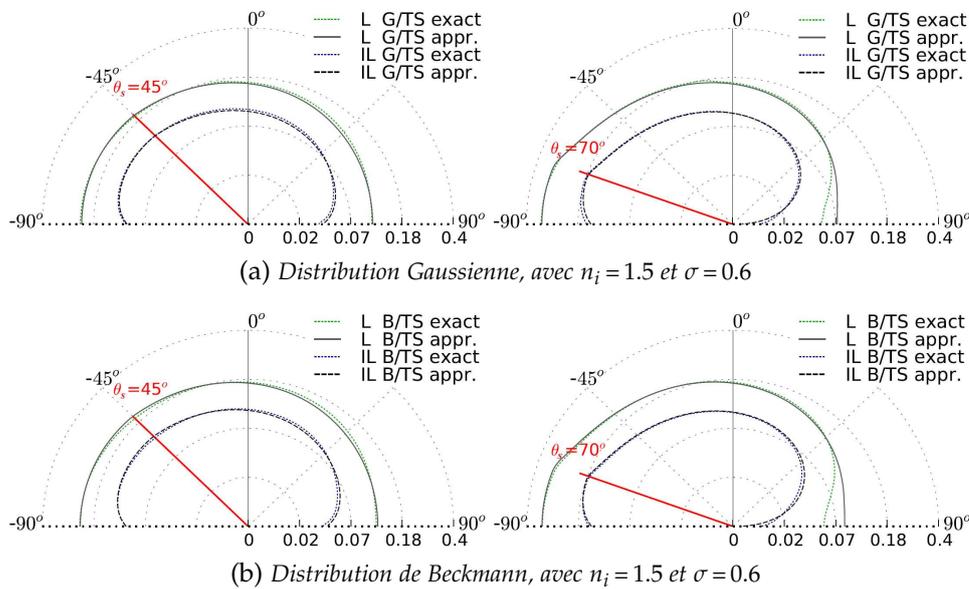


FIGURE 3.27 – Comparaison entre l'évaluation du modèle par méthode de Monte-Carlo et le modèle approché (a) avec une distribution Gaussienne (b) avec une distribution de Beckmann. Les deux pour un GAF de Torrance et Sparrow.

3.3 Résultats

Les modèles à base de microfacettes de la littérature permettent de représenter à l'échelle macroscopique les phénomènes lumineux induits par la microgéométrie d'une

surface. Ils décrivent des microfacettes purement Lambertiennes [ON94] ou purement spéculaires [TS67, CT82] pour lesquels la composante volumique est gérée par l'ajout d'un terme Lambertien. Pour prendre en compte la corrélation entre la composante diffuse et la composante spéculaire certains modèles introduisent une balance dépendante du terme de Fresnel [SHSL97, vGSK98, KSK01]. Le modèle que nous proposons, tout d'abord développé dans le domaine de l'optique par Simonot [Sim09], considère des microfacettes Lambertiennes interfacées. La composante volumique et la composante spéculaire sont liées de manière physique et le modèle permet de représenter des surfaces Lambertiennes ainsi que des surfaces constituées de microfacettes spéculaires ou de microfacettes Lambertiennes, mais également les cas intermédiaires. Il peut donc représenter des effets de rétrodiffusion, non modélisés par des modèles à base de microfacettes spéculaires [TS67, CT82, SHSL97, KSK01]. Le modèle de Simonot [Sim09] ne propose aucune solution d'implémentation et n'utilise pas de facteur d'atténuation géométrique. Nous avons proposé plusieurs approches pour le compléter et le mettre en œuvre pour différentes fonctions de distribution (y compris des fonctions de distribution anisotropes) et leur facteur d'atténuation géométrique associé. L'évaluation du modèle par méthode de Monte-Carlo avec échantillonnage d'importance et sa mise en œuvre dans un outil de rendu permet d'observer le comportement de ce type de matériau grâce à des images non bruitées (section 3.1.4). Enfin pour permettre l'identification de paramètres sur des données acquises nous avons proposé une version approchée du modèle avec deux déclinaisons, l'une pour une distribution de microfacettes Gaussienne, l'autre pour une distribution de Beckmann (section 3.2.3), et toutes deux prennent en compte les inter-réflexions multiples entre microfacettes.

La description de surfaces composées de microfacettes Lambertiennes interfacées permet de représenter une large gamme de matériaux (figure 3.28) et d'englober différentes configurations précédemment décrites dans la littérature selon les valeurs des paramètres du modèle :

- lorsque $K_d = 0$ la composante volumique est nulle et la formulation devient celle de microfacettes purement spéculaires ;
- lorsque $n_i = 1$, alors $T = 1$ et $r_i = 0$, ce qui correspond à des microfacettes Lambertiennes ;
- lorsque $\sigma = 0$, la rugosité est nulle et la réflectance macroscopique est égale à la réflectance d'une microfacette ;
- lorsque $n_i = 1$ et $\sigma = 0$, le matériau est purement Lambertien.

Notre modèle peut être comparé à la combinaison du modèle d'Oren-Nayar (utilisant une distribution Gaussienne et une fonction d'atténuation géométrique de Torrance et Sparrow) et des microfacettes purement spéculaires (suivant la même distribution et pour la même fonction d'atténuation géométrique). La composante spéculaire de ces deux modèles étant la même, le lobe spéculaire a la même forme. Cependant le comportement de la composante diffuse est très différent. Les valeurs du modèle Lambertien interfacé pour sont plus faibles dans certains cas (lorsque les valeurs de la composante spéculaire augmentent), suivant la transmission de la lumière à l'intérieur du matériau puis ses réflexions entre le substrat diffusant et l'interface avant sa retransmission pour le modèle Lambertien interfacé (facteur $1/(1 - K_d r_i)$). La balance entre composante diffuse et composante spéculaire du modèle à base de microfacettes Lambertiennes interfacées s'observe facilement lorsque l'indice de réfraction augmente : l'augmentation du lobe spéculaire entraîne une perte d'énergie sur la composante diffuse (figures 3.29d, 3.29e et 3.29f). Au contraire, pour l'association du modèle d'Oren-Nayar et de microfacettes spéculaires la partie volumique reste identique quel que soit n_i et dépend uniquement de K_d et σ . Les courbes du modèle Lambertien interfacé présentent également une diminution de la réflexion aux angles rasants, impossible à représenter par la combinaison du modèle d'Oren Nayar et de microfacettes spéculaires. Ce phénomène est observable sur

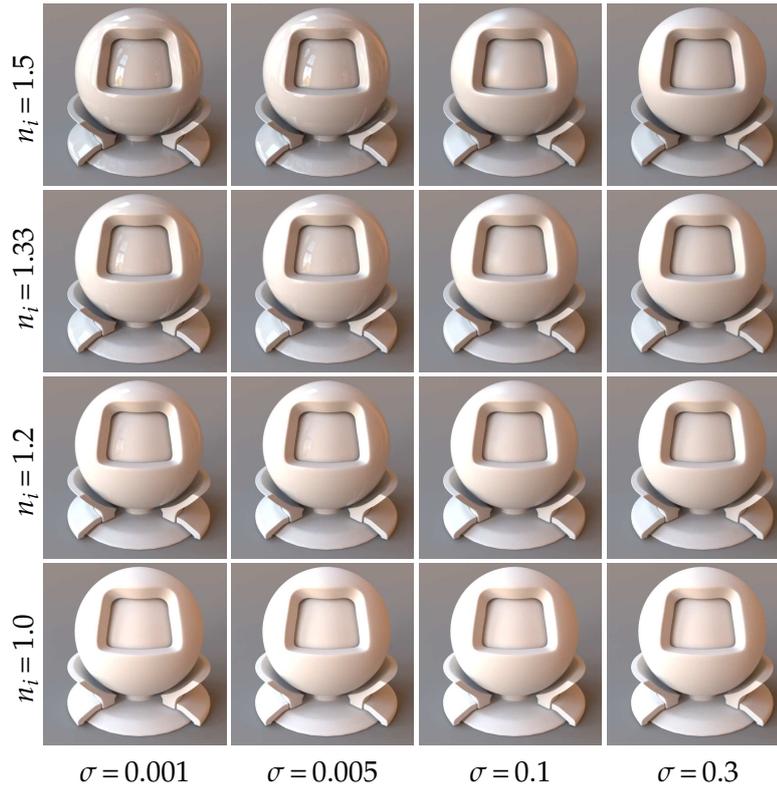


FIGURE 3.28 – Illustration du modèle Lambertien interfacé pour une sphère éclairée par une carte d’environnement et une source ponctuelle, avec une variation des paramètres σ et n_i . La fonction de distribution utilisée est celle de Beckmann [BS63] et le GAF est celui de Smith et Bourlier [Smi67].

la figure 3.30 qui illustre pour une direction d’incidence de lumière donnée, les différences pour chaque direction d’observation entre le modèle d’Oren-Nayar et la partie volumique du modèle Lambertien interfacé.

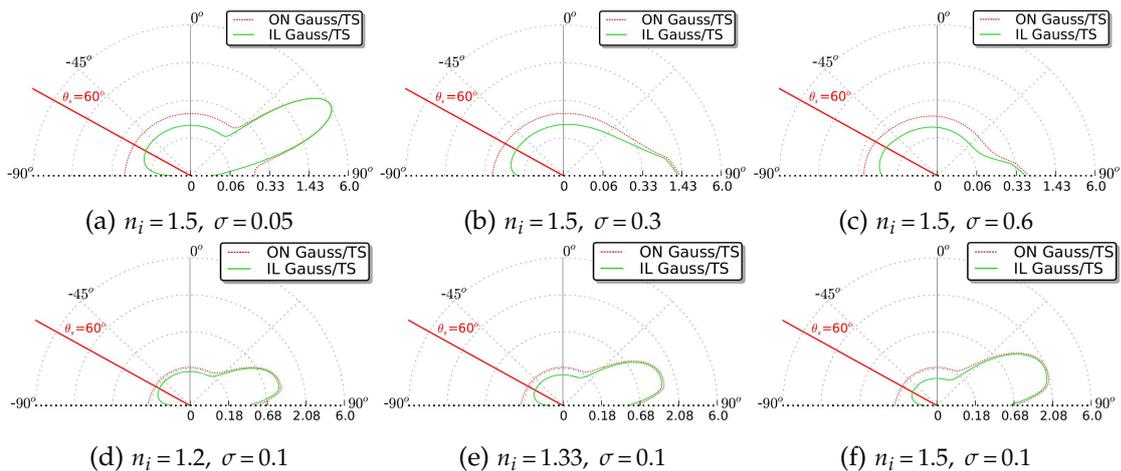


FIGURE 3.29 – Comparaison du modèle d’Oren Nayar couplé à des microfacettes spéculaires (à distribution Gaussienne et un facteur d’atténuation géométrique de Torrance et Sparrow) avec le modèle Lambertien interfacé (même distribution et GAF), pour $K_d = 0.6$ et différentes valeurs de n_i et σ .

Afin d’observer l’influence de l’anisotropie sur l’apparence d’un objet, la figure 3.31 présente des matériaux Lambertiens interfacés brillants anisotropes et la figure 3.32, des matériaux Lambertiens interfacés mats anisotropes et, pour comparaison, la première ligne

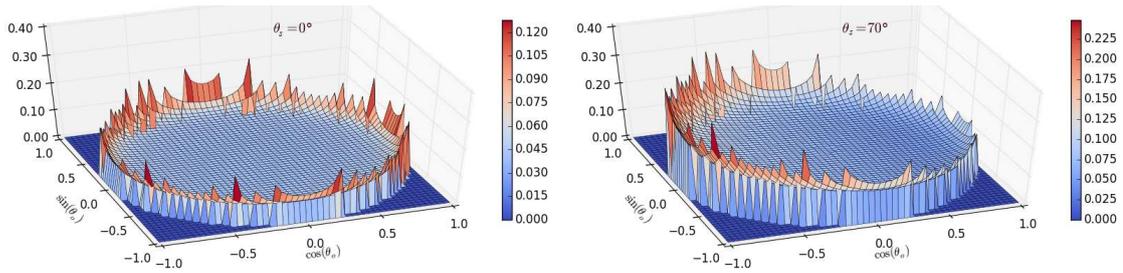


FIGURE 3.30 – Courbes 3D des valeurs de différence pour chaque direction d’observation entre le modèles d’Oren-Nayar et la composante volumique du modèle Lambertien interfacé avec $K_d = 0.9$, $n_i = 1.5$, $\sigma = 0.3$ pour $\theta_s = 0^\circ$ et $\theta_s = 70^\circ$.

de la première figure représente une surface Lambertienne interfacée rugueuse isotrope. L’anisotropie est bien visible lorsque la surface est spéculaire, même pour une forte rugosité (figures 3.31g et 3.31j) et s’observe également pour un matériau mat (figure 3.32). Ce type de matériau est peu utilisé à notre connaissance, pourtant l’influence de l’anisotropie sur un matériau mat est clairement visible sur cette figure.

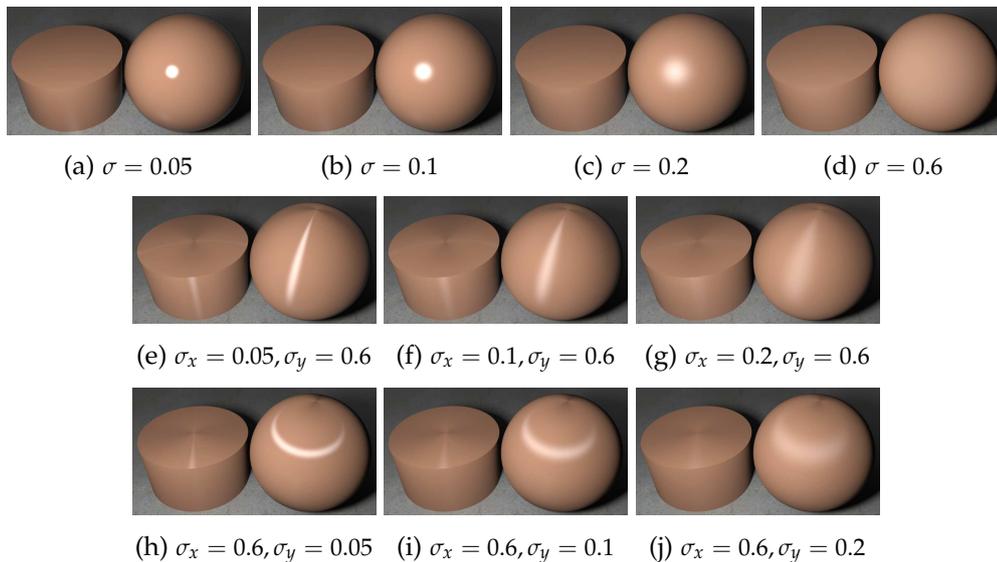


FIGURE 3.31 – Surface Lambertienne interfacée anisotrope, distribution de Beckmann et GAF de Smith, $n_i = 1.5$; la première ligne présente la configuration isotrope pour comparaison.

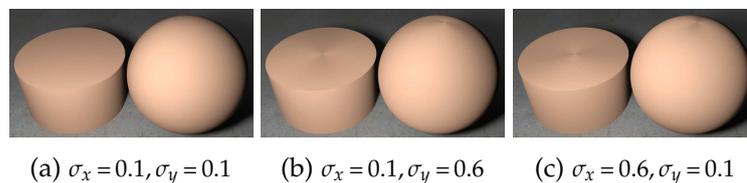
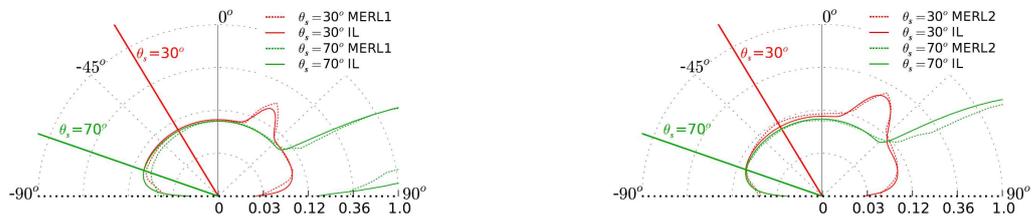


FIGURE 3.32 – Surface Lambertienne interfacée anisotrope, distribution de Beckmann et GAF de Smith, $n_i = 1.0$; la première image de la ligne présente la configuration isotrope pour comparaison.

Afin de tester l’adéquation entre notre modèle et des matériaux réels nous avons réalisé une identification de paramètres sur des données mesurées issues de la base de données MERL [MPBM03] et CORNELL. Les données du matériau nommé House Paint, de la base de données CORNELL, présentent une rétrodiffusion de la lumière et la composante diffuse n’est pas Lambertienne mais décroît lorsque les directions d’observation deviennent rasantes (figure 3.33). L’identification du modèle Lambertien interfacé, obtenue par la méthode des

moindres carrés, permet d’obtenir des paramètres pour lesquels le modèle correspond bien aux données mesurées.



(a) specular-white-phenolic : $K_d = 0.34$, $n_i = 1.12$, $\sigma = 0.065$ (b) white paint : $K_d = 0.425$, $n_i = 1.2$, $\sigma = 0.1$

FIGURE 3.33 – Comparaisons entre les données mesurées issues de la base de données MERL et le modèle Lambertien interfacé identifié pour deux directions d’incidence $\theta_s = 30^\circ$ et $\theta_s = 70^\circ$ (échelle logarithmique).

Enfin la comparaison visuelle de matériaux réels et de notre modèle Lambertien interfacé utilisant une distribution de Beckmann et un facteur d’atténuation géométrique de Torrance et Sparrow, dont les paramètres ont été identifiés sur les données, sont présentés sur la figure 3.34.

| | House Paint (CORNELL) | White Phenolic (MERL) | White Paint (MERL) |
|------------------------------|---|---|---|
| Données mesurées interpolées | | | |
| Valeurs identifiées | $n_i = 1.12, \sigma = 0.16$ $K_d = 0.48; 0.48; 0.48$ | $n_i = 1.25, \sigma = 0.11$ $K_d = 0.43; 0.42; 0.42$ | $n_i = 1.11, \sigma = 0.09$ $K_d = 0.32; 0.265; 0.155$ |

FIGURE 3.34 – Données mesurées interpolées et modèle Lambertien interfacé identifié (distribution de Beckmann et GAF de Torrance-Sparrow).

Conclusion du chapitre

Afin de prendre en compte la géométrie microscopique des surfaces, qui influence la réflexion de la lumière à l’échelle macroscopique, au moyen d’un modèle mathématique de réflectance nous avons choisi de nous intéresser aux modèles à base de microfacettes. La

réflexion de la lumière par une surface dépend de sa géométrie microscopique mais également de ses paramètres intrinsèques. En effet, en présence d'un matériau conducteur, tel qu'un métal, la lumière est réfléchi quasi-entièrement par la surface dans la direction de réflexion miroir. Seule la rugosité de la surface influence les directions de réflexion de la surface macroscopique. En revanche, en présence d'un matériau diélectrique, la lumière est en partie réfléchi par l'interface et en partie transmise. Cette portion de flux lumineux interagit avec la matière et est retransmise à l'extérieur du matériau, lui donnant son aspect. Du fait de sa complexité, ce phénomène n'est pas pris en compte par les modèles de la littérature, hormis par les modèles multicouches dont les calculs sont complexes. La majorité des modèles à base de microfacettes présentent une distribution statistique de microfacettes spéculaires à laquelle est ajoutée une composante diffuse Lambertienne afin de simplifier les calculs. Cette représentation revient à considérer une rugosité de surface spéculaire associée à une surface plane Lambertienne en ignorant ainsi l'influence de la rugosité sur l'aspect diffus (phénomène de rétrodiffusion de la lumière) et la transmission de la lumière à l'intérieur du matériau puis sa retransmission après interaction avec la matière. Cette représentation n'est pas physiquement valide et aucun lien n'est assuré entre les deux composantes. Or la loi de conservation de l'énergie impose que lorsque les valeurs d'une composante augmentent (par exemple les valeurs de la composante spéculaire), les valeurs de l'autre composante diminuent en conséquence. Cette condition n'est pas respectée dans le cas d'une composante spéculaire considérant une distribution de microfacettes spéculaires associée à une composante Lambertienne dont les valeurs sont constantes quelles que soit les directions d'incidence ou d'observation et quel que soit l'indice de réfraction du milieu et la rugosité de surface. Afin de prendre en compte de façon physique l'interaction de la lumière avec une surface opaque rugueuse, nous avons choisi la description d'une surface Lambertienne interfacée rugueuse. Les microfacettes sont constituées d'un substrat diffusant, recouvert d'une interface lisse. La portion du flux lumineux directement réfléchi par l'interface et celle transmise à l'intérieur du matériau est déterminée par l'indice de réfraction de l'interface. Simonot [Simog] développe une formulation mathématique exprimant la proportion de lumière incidence transmise par l'interface puis réfléchi plusieurs fois par le substrat et l'interface puis à nouveau transmise dans une direction d'observation donnée. Nous avons choisi de reprendre cette formulation pour l'élaboration d'un modèle à base de microfacettes physiquement valide. Notre description permet non seulement de prendre en compte la pénétration de la lumière dans le matériau, mais présente également une balance physique entre composante diffuse et composante spéculaire. L'influence de la rugosité sur l'aspect spéculaire ainsi que sur l'aspect diffus est gérée par le modèle qui englobe ainsi des phénomènes tels que l'étalement du lobe spéculaire autour de la direction de réflexion miroir et la rétrodiffusion de la lumière.

Le modèle à base de microfacettes Lambertiennes interfacées permet naturellement la description d'une large gamme de matériaux, allant de surfaces purement Lambertiennes à purement spéculaires en passant par des surfaces spéculaires rugueuses et diffuses rugueuses. L'utilisation de distributions anisotropes permet également d'étendre cette gamme à la représentation de surfaces rugueuses anisotropes. Ce modèle physiquement plausible, utilise seulement trois paramètres : la réflectance du substrat, l'indice de réfraction de l'interface et la rugosité de la surface.

L'implémentation d'un modèle constitué de microfacettes non purement spéculaires n'est pas un problème trivial. En effet, chaque microfacette peut contribuer à la BRDF macroscopique, le calcul présente alors une intégrale supplémentaire à résoudre. La résolution numérique peut être faite par méthode de Monte-Carlo, nous avons étudié différentes solutions d'échantillonnage et mis en évidence l'efficacité de l'échantillonnage par importance pour ce type

de modèle. En effet, la fonction de distribution des microfacettes intervenant dans l'intégrale peut présenter un pic fin pour un paramètre de rugosité faible. Un échantillonnage uniforme sur ce type de fonction engendre une forte variance de l'estimateur de Monte-Carlo tandis qu'un échantillonnage par importance permet de la réduire de façon importante. Nous avons proposé des solutions d'implémentation permettant le calcul du modèle et son utilisation dans un moteur de rendu basé méthode de Monte-Carlo avec toutes les fonctions de distribution et les facteurs d'atténuation géométrique possibles. Cette méthode d'implémentation peut également être utilisée pour tous les modèles à base de microfacettes et notamment à base de microfacettes non purement spéculaires.

Nous proposons également une formulation approchée utile pour le rendu en temps interactif et pour l'identification de paramètres. La formulation proposée, en deux déclinaisons (l'une pour une distribution de microfacettes Gaussienne et l'autre pour une distribution de Beckmann), intègre également les inter-réflexions entre microfacettes, apportant une contribution non négligeable notamment pour les matériaux très rugueux et pour des directions d'incidence de lumière rasante. Enfin l'utilisation de notre modèle approché pour l'identification de paramètres met en évidence l'adéquation du modèle aux données mesurées pour des matériaux d'aspects très différents.

ANALYSE PHOTOMÉTRIQUE ET RE- CONSTRUCTION 3D 4

SOMMAIRE

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES SYSTÈMES DE RECONSTRUCTION 3D | 69 |
| 4.1.1 | Reconstruction de la géométrie à partir d'images | 69 |
| 4.1.2 | Méthodes de Stéréophotométrie calibrées | 72 |
| 4.1.3 | Discussion | 78 |
| 4.2 | NOTRE SYSTÈME DE RECONSTRUCTION STÉRÉO | 79 |
| 4.2.1 | Notre solution de reconstruction par stéréophotométrie | 81 |
| 4.2.2 | Estimation de la réflectance, filtrage et identification | 85 |
| 4.3 | VALIDATION ET RÉSULTATS | 92 |
| 4.3.1 | Validation virtuelle du système de reconstruction | 93 |
| 4.3.2 | Application à des objets réels | 102 |
| | CONCLUSION | 108 |

Ce chapitre est consacré à la présentation du développement d'un système d'acquisition dédié à l'analyse de matériaux à partir de photographies. Notre objectif est de permettre un travail complet sur des objets : estimation de la forme, des informations photométriques et des détails géométriques associés tels que de la rugosité de surface. L'une des contraintes du système est de réduire au maximum les manipulations des objets afin de proposer un système non invasif et demandant un minimum d'intervention de l'utilisateur pour l'acquisition ; une autre contrainte est de proposer un unique système d'acquisition pour éviter les mises en correspondances car elles introduisent généralement des incertitudes dans les résultats.

La littérature fait état de nombreux systèmes pour extraire de manière précise la forme d'un objet, ou les informations de réflectance pour un échantillon de surface. Pourtant, peu de systèmes permettent de retrouver précisément à la fois la forme et la réflectance d'un objet avec un nombre de manipulations réduit, et une identification de paramètres de modèles de réflectance physiquement plausibles.

Dans un premier temps, ce chapitre présente un état de l'art des méthodes de reconstruction tridimensionnelle pouvant être utilisées pour un système réalisant ce type d'estimations conjointes. Nous nous intéressons notamment aux méthodes de reconstruction tridimensionnelle multi-vues permettant d'estimer une carte de hauteurs et les méthodes de stéréophotométrie permettant de retrouver les gradients de surfaces en chaque point. Ces dernières permettent de retrouver directement des informations d'orientation de la surface grâce à l'inversion du modèle Lambertien ou d'un modèle de réflectance incluant une

composante spéculaire. Les méthodes de stéréophotométrie ne nécessitent pas de recalage des données géométrique et de réflectance contrairement aux méthodes multi-vues. Cependant les ombres entraînent des erreurs dans l'inversion des modèles de réflectance. De même l'inversion du modèle Lambertien n'est efficace que pour des surfaces diffusantes ou lorsque les phénomènes de specularité sont écartés des calculs. L'utilisation d'un modèle de réflectance incluant une composante spéculaire semble alors une bonne alternative à la suppression de ces points particuliers, mais leur inversion n'a pas de solution analytique. La résolution du problème passe alors par un algorithme itératif visant à rechercher le meilleur ensemble paramètres du modèles/normale à la surface par la minimisation de l'erreur entre le modèle et les données de référence. Le temps de traitement est donc plus long que les méthodes basées sur l'inversion du modèle Lambertien. Pour ces raisons nous nous orientons vers une reconstruction par stéréophotométrie et nous proposons une méthode permettant de contourner les problèmes rencontrés par les méthodes actuelles.

Notre objectif est d'éviter au maximum les traitements itératifs et la mise en correspondance des données tridimensionnelles avec les informations de réflectance. Pour cela, nous proposons d'exploiter la redondance des informations afin de filtrer le bruit présent dans les données, issu des estimations successives (géométrie et réflectance). La configuration de notre système, utilisant seulement douze sources de lumière et une position d'observation unique, permet une reconstruction de la géométrie de l'objet mais l'estimation de la réflectance pour des directions rasantes n'est pas possible et la BRDF acquise est alors partielle. Nous utilisons un mécanisme d'identification des paramètres pour obtenir une estimation complète de l'apparence des objets. Notre méthodologie de validation consiste à confirmer l'efficacité de la configuration (choix du nombre de lampes et de leurs positions) et les étapes du système une à une grâce à des données issues de simulations. La configuration du système réduit les interventions de l'utilisateur et la manipulation des objets d'étude. Des objets de tests, de taille, de forme et de réflectance variées, ont été réalisés afin de tester la chaîne complète sur des objets réels.

Ce chapitre est organisé autour de quatre grandes sections. La première présente l'étude bibliographique des méthodes de reconstruction et plus particulièrement les méthodes de stéréophotométrie ainsi que notre proposition d'une nouvelle méthode de reconstruction. La seconde décrit et valide la configuration de notre système d'acquisition grâce à des données issues de simulation, puis présente le système élaboré suite à cette étape de validation virtuelle. La troisième partie explique la méthode de reconstruction et d'estimation des paramètres d'apparence que nous avons mis en œuvre, avec le modèle de BRDF présenté dans ce manuscrit. Elle présente également un ensemble de tests permettant de valider notre méthodologie complète, avec des objets virtuels et des images de synthèse. La dernière section présente les résultats que nous avons obtenus avec des acquisitions d'objets réels.

4.1 Analyse bibliographique des systèmes de reconstruction 3D

La plupart des systèmes d'estimation de la réflectance précis sont basés sur des échantillons de surface plans et uniformes. Lorsque l'analyse porte sur un objet complet, ce type de système n'est plus adapté et les laboratoires ont recours à des mécanismes de reconstruction de la géométrie pour estimer dans un premier temps la forme de l'objet (chapitre 2 section 2.2). Lorsque deux systèmes différents sont utilisés (l'un pour estimer la forme, l'autre pour avoir des informations de réflectance), le recalage des informations est source d'erreurs. Il est préférable de joindre les deux systèmes en un seul lorsque cela est possible.

Cependant l'utilisation d'un seul et même système nécessite d'intégrer le système de reconstruction tridimensionnelle dans celui d'estimation de la réflectance. Ceci est possible lorsque la reconstruction est réalisée à partir d'images puisqu'elles peuvent ensuite permettre l'estimation de la réflectance. Nous présentons dans cette section les différentes méthodes de reconstruction tridimensionnelle utilisant des images ainsi que les systèmes d'acquisition réalisant une estimation conjointe de la géométrie et de la réflectance d'objets.

4.1.1 Reconstruction de la géométrie à partir d'images

Les méthodes de reconstruction tridimensionnelles utilisant un appareil photographique numérique (APN) ou une caméra sont nombreuses. Elles peuvent être classées en trois catégories : les approches géométriques, les approches photométriques et les méthodes basées sur les propriétés physiques du système d'acquisition. Les approches géométriques utilisent le principe de triangulation (grâce à la projection d'un signal lumineux ou de plusieurs vues du même objet) afin de retrouver la carte de profondeur de la scène. Dans le cas des approches photométriques, l'évaluation de l'intensité des pixels permet de déduire des informations de variations grâce à l'inversion de l'équation de luminance. Enfin les dernières méthodes utilisent les propriétés des systèmes d'acquisition (notamment la profondeur de champ) afin de déduire une information de distance des points à la caméra. Ces méthodes sont très spécifiques et applicables uniquement dans certaines conditions d'acquisition bien précises. Nous présentons rapidement ces différentes méthodes afin d'illustrer les avantages et inconvénients de chacune et de justifier notre choix.

Parmi les approches géométriques, deux familles se distinguent : les méthodes de reconstruction par triangulations actives ou passives. La première famille utilise des lumières structurées [SWI97, FCo4] ou des lasers [DC01] pour projeter un motif sur un objet. Les déformations produites par le relief de l'objet permettent de déduire une carte de profondeur. La figure 4.1 illustre le principe de base de ces méthodes : un faisceau lumineux fin est projeté sur l'objet et la position sur le capteur photographique du point lumineux sur l'objet est directement liée à la distance de ce point. Un balayage de l'objet entier reproduit ainsi une carte de hauteur de celui-ci. Ces méthodes permettent de traiter un large panel de matériaux et de proposer une reconstruction dont le niveau de détail peut aller jusqu'à 2 micromètres de précision [Bla04]. Pour ces raisons, ce type de système est souvent utilisé en aval d'un système d'acquisition de la réflectance [FKIS02, WMP⁺05, WMP⁺06]. Ces méthodes peuvent être intégrées directement dans le système d'acquisition de la réflectance [SWRK11, NRS13, SSWK13] mais cela implique de réaliser deux acquisitions pour chaque configuration caméra/source : l'une avec lumière structurée, l'autre sans, afin d'estimer la réflectance de la surface. Aucun recalage des données n'est nécessaire mais les temps d'acquisitions sont doublés.

Les techniques de triangulation passives (également appelées *stéréovision*) [SCD⁺06, Ike14],

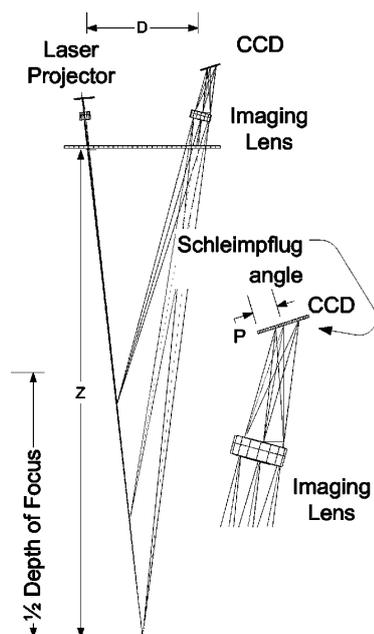


FIGURE 4.1 – Principe de base des méthodes de triangulation. Le laser projette un faisceau très fin produisant un point lumineux sur l'image. La position de la projection sur le capteur CCD permet de déduire la distance de ce point. Images extraites de l'article [Bla04].

au contraire des techniques de triangulation actives, n'utilisent pas de projection de motif mais effectuent la triangulation grâce à l'utilisation de deux APN ou plus. Comme toutes les méthodes utilisant différents points de vue, le problème réside alors dans la recherche des points communs. L'augmentation du nombre de points de vue permet de faciliter la mise en correspondance des points mais augmente inévitablement les temps de traitement et les coûts de mise en place. Une variante permettant de contourner ces problèmes consiste à utiliser une caméra dont la position varie [JAP99, Cha14]. Dans ce dernier cas les déplacements de la caméra doivent être connus ou estimés. Quelle que soit la méthode de triangulation choisie, la difficulté pour ces méthodes est le recoupement des points communs, source d'erreur de reconstruction. Ce processus complexe peut être facilité par la projection d'un motif sur l'objet étudié [SPBo4] mais pose à nouveau un problème de l'utilisation des images pour le calcul de la réflectance.

L'utilisation d'une approche géométrique (triangulation active ou passive) pour l'estimation de la réflectance des surfaces impliquent l'appariement des données géométrique et de réflectance pour ensuite pouvoir estimer la BRDF de la surface. Cette étape est réalisée par détection et par recoupement de points d'intérêts. Cependant les distorsions entre les différentes vues et les phénomènes d'occlusions entraînent des erreurs d'appariement et en font un processus relativement complexe à mettre en œuvre. Cette source d'erreur entraîne inmanquablement du bruit dans les données de réflectance.

Les méthodes basées silhouette (également appelées *Shape from Silhouette*) consistent à faire varier le point de vue tout autour de l'objet et à en extraire, pour chacune d'elle, la silhouette. Le recoupement des informations entre chaque image permet de reconstruire la forme par intersection des volumes [MA83] ou par projection [Sze93]. Afin de corriger les défauts de parallaxe inhérents aux méthodes utilisant différents points de vue, des boîtes englobantes sont souvent utilisées [MYA03, MMo4]. Mais les zones concaves sont difficiles à détecter sans l'utilisation conjointe d'une autre méthode comme l'illustre la figure 4.2. Dans cet exemple l'une des prises de vue utilisée pour la reconstruction est présentée, ainsi

que la silhouette extraite de cette image et enfin la reconstruction estimée à partir de tous les points de vue. L'anse de la tasse est reconstruite mais l'intérieur de la tasse n'est pas rempli car les silhouettes détectées ne permettent pas de retrouver les zones concaves. Ces méthodes sont souvent utilisées dans le cadre d'une étude de réflectance d'objet de géométrie inconnue [MPN⁺02b, MPN⁺02a, MBK05, MMF07] mais impliquent des mouvements d'objets ou de caméra entre chaque acquisition. Le contrôle des mouvements ainsi que l'estimation des positions à l'issus de ceux-ci doivent être précis afin de ne pas entraîner d'erreur dans l'estimation finale. Chaque acquisition est suivie d'un mouvement, puis d'une nouvelle acquisition et ainsi de suite. Comme pour les gonio-réfectomètres les temps d'acquisition sont donc relativement importants.

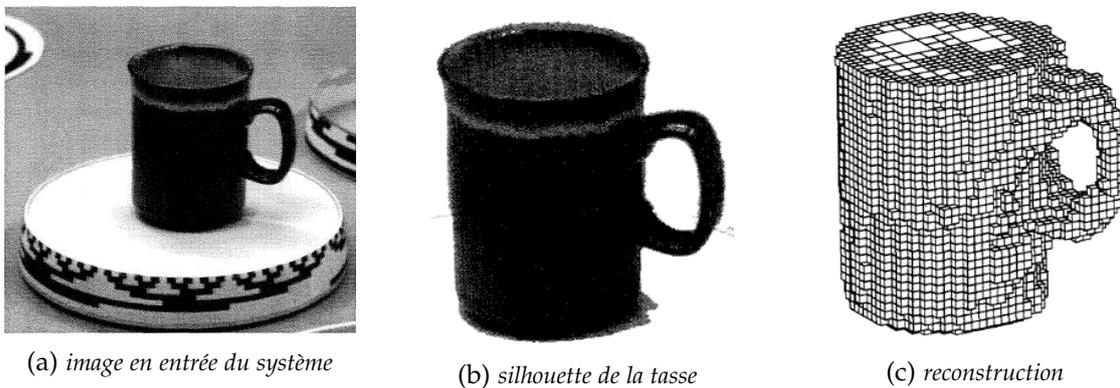


FIGURE 4.2 – Estimation du volume occupé par une tasse par méthode d'étude des contours (images extraites de [Sze93]).

Les problèmes communs à ces méthodes sont les distorsions entre les images rendant difficiles le recouplement des données entre chacune d'elles. De plus, pour toutes ces méthodes multi-vues, une étape de mise en correspondance entre la géométrie estimée et les données de réflectance est nécessaire. Enfin l'information tridimensionnelle calculée est une information de profondeur et nécessite d'estimer la normale en chaque point de surface afin de permettre le calcul de la réflectance. Au contraire, les méthodes de reconstruction par étude de l'intensité des pixels n'utilisant qu'un seul point de vue, ne présentent pas ces inconvénients. A partir d'une ou plusieurs images d'un point de vue fixe et sous différentes condition d'éclairage, l'inversion d'un modèle de réflectance permet d'estimer les gradients de surface grâce à des conditions d'acquisition contrôlées. La méthode présentée par Horn [Hor70] en fait partie : le modèle Lambertien (en supposant le même coefficient de diffusion pour tous les pixels de l'objet) est inversé afin de chercher des solutions d'orientation de la surface correspondant à l'intensité des pixels d'une seule image. L'équation à résoudre présente deux inconnues (le gradient de l'axe X et le gradient de l'axe Y) pour une seule valeur d'intensité fournie par l'image, et offre donc plus d'une possibilité de reconstruction en chaque point. Cette méthode n'est applicable que pour des surfaces Lambertiennes (des erreurs sont produites si la surface ne remplit pas cette condition) et le nombre de solutions possibles à l'équation la rendent peu précise [Pen84]. Une évolution de cette méthode, appelée *stéréophotométrie*, consiste à utiliser plusieurs images (même point de vue, conditions d'éclairage différentes) afin d'inverser le modèle Lambertien ou un autre modèle de réflectance choisi (e.g. le modèle de Torrance et Sparrow [TS67]) [Woo80, HW11, Nay91, Geo03, SI96, HMI10, GCHS10]. Par rapport à la méthode proposée par Horn, un plus large panel de matériaux peut être traité et ces méthodes sont plus précises. Les acquisitions réalisées pour la reconstruction peuvent être directement utilisées afin d'estimer la réflectance de la surface des objets d'étude.

Le dernier type d'approches pour la reconstruction tridimensionnelle consiste à exploiter les caractéristiques techniques des systèmes d'acquisition afin de déduire une information de profondeur. C'est le cas des méthodes de mesure de flou [FS05, PPG13] utilisant la possibilité de modifier la distance focale d'un APN. Pour une valeur donnée, seuls certains points de l'image sont nets, ce sont les points situés sur le plan de mise au point, dont la distance peut être calculée. Un balayage de la scène permet de déduire une carte de profondeur. L'inconvénient de ces méthodes réside dans la nécessité d'avoir une surface texturée [BCJ⁺13]. En effet la mesure de mise au point est basée sur la teneur en haute fréquence de la scène. Enfin pour balayer toute la profondeur d'une scène un grand nombre d'acquisitions doit être réalisé, ce qui rend le processus très long.

De manière générale, l'utilisation de plusieurs points de vue pose un problème de mise en correspondance des points d'une image à l'autre. Différentes solutions peuvent être mises en œuvre telles que l'utilisation d'un motif projeté sur l'objet [FCo4, Bla04], la recherche de la silhouette [MA83, Ccc86] ou encore des mesures de corrélation du voisinage [Fua93]. Enfin lorsque la position de la caméra doit être déterminée (c'est le cas pour des acquisitions à main levée), l'utilisation d'un objet de référence est possible [SSI99], ou encore d'une mire [Gui00] ou de matrice de passage [Tsa87]. Mais dans ce cas du matériel supplémentaire apparaît sur les images à côté des objets, réduisant le nombre de pixels utiles à l'analyse. Les erreurs de précisions de ces différentes méthodes, dues aux problèmes de distorsion ou d'un éclairage insuffisant, entraînent du bruit dans l'estimation de la réflectance. Au contraire lorsque la position de la caméra est fixe, l'erreur commise est seulement relative. C'est le cas des méthodes de stéréophotométrie, qui utilisent une unique caméra dont la position est connue ainsi que plusieurs positions de sources de lumière, de position connue également, afin de retrouver la géométrie d'un objet. Parmi les méthodes d'estimation de la géométrie, c'est la seule qui permet de retrouver directement les gradients de surface et sans nécessiter de processus d'appariement des données géométriques avec les données de réflectance. Contrairement à d'autres méthodes, l'utilisation de la stéréophotométrie permet d'éviter de gérer les problèmes liés aux points de vue multiples ou aux déplacements de caméra, difficiles à contrôler et nécessitant une étape d'estimation supplémentaire.

4.1.2 Méthodes de Stéréophotométrie calibrées

Afin de pouvoir intégrer le système de reconstruction tridimensionnelle à celui d'estimation de la réflectance, nous nous orientons vers l'utilisation d'une méthode de reconstruction par stéréophotométrie calibrée. Le principe a été présenté par Woodham [Woo80] en extension de la méthode proposée par Horn [Hor70]. Elle consiste à utiliser un point de vue fixe connu et différentes directions d'éclairage également connues afin d'inverser le modèle de Lambert pour retrouver l'orientation de la surface. La luminance réfléchiée par chaque point de surface dépend de la direction d'observation \mathbf{o} , de la direction d'incidence de la lumière \mathbf{s} , de l'orientation de la surface \mathbf{n} , de la puissance de la source et de la réflexion de la lumière par le matériau :

$$L_r(\mathbf{o}) = L_i(\mathbf{s}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_s, \quad (4.1)$$

avec $L_i(\mathbf{s})$ la lumière incidente au point de surface considéré provenant d'une direction \mathbf{s} , $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ la BRDF propre à la surface et $\cos \theta_s$ dépendant de \mathbf{n} et \mathbf{s} . Ces grandeurs sont dépendantes de la longueur d'onde et, dans le cas d'un matériau diélectrique, le calcul des valeurs de luminance réfléchiée est réalisé indépendamment pour chacune des longueurs

d'onde. Par simplification, les canaux R, V et B des images sont considérés comme une longueur d'onde unique et le calcul est ainsi réalisé pour chaque canal indépendamment l'un de l'autre. Cette équation constitue une simplification de l'équation du rendu. La valeur des pixels est directement liée à $L_r(\mathbf{o})$ (chapitre 2, section 2.2.2), pour un système de projection orthographique :

$$\begin{aligned} E_p &= L_r \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{d_l}{f} \right)^2, \\ &= L_r k. \end{aligned} \quad (4.2)$$

avec k constant sur l'image et d_l et f , l'ouverture et la distance focale, des paramètres connus de l'APN. Les valeurs d'éclairement enregistrées pour chaque pixel sont alors exprimées dans l'espace RVB par trois valeurs : rouge, vert et bleu. Bien que chacune de ces composantes ne représente pas une longueur d'onde unique, il est souvent considéré un calcul indépendant pour chacune de ces valeurs.

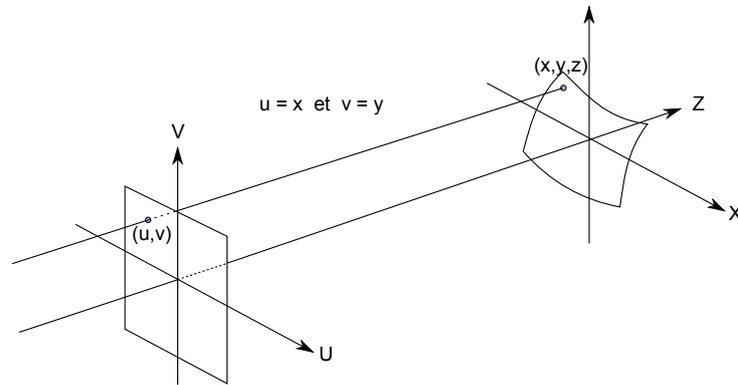


FIGURE 4.3 – Projection orthographique.

Afin de se placer dans des conditions permettant l'inversion de l'équation de la luminance pour une seule source de lumière (équation 4.1) de façon simple et directe, le système peut être contraint : l'objet est placé loin de l'appareil de manière à ce que le système de projection puisse être considéré orthographique (figure 4.3), avec l'axe optique orienté selon l'axe Z, ainsi chaque point de l'image (u, v) correspond à un point de la surface (x, y, z) ; les sources doivent être suffisamment éloignées (ou utilisation de sources collimatées) pour que les directions d'incidence soient également considérées constantes sur l'image, ainsi l'angle entre la direction d'observation et la direction d'incidence de la lumière est constante pour tous les points de l'image ; l'intensité de chaque source est considérée identique ; la surface est considérée Lambertienne. Dans ces conditions, Woodham [Woo80] exprime l'éclairement pour chaque pixel de l'image et pour une source, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} E_{S_1} \\ E_{S_2} \\ E_{S_3} \end{bmatrix} = \frac{\rho}{\pi} \left(\begin{bmatrix} S_{1_x} & S_{1_y} & S_{1_z} \\ S_{2_x} & S_{2_y} & S_{2_z} \\ S_{3_x} & S_{3_y} & S_{3_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ 1 \end{bmatrix} \right), \quad (4.3)$$

où ρ est le coefficient de réflexion du matériau, $p = \delta z / \delta x$ et $q = \delta z / \delta y$ les gradients pour le pixel considéré, E_{S_1} l'éclairement pour la source 1 et $[S_{1_x}, S_{1_y}, S_{1_z}]$ le vecteur directeur de la direction de la source 1. La valeur E_{S_1} correspond à la valeur du pixel de l'image et

présente ainsi trois valeurs distinctes dans le cas d'un système RVB : la canal Rouge, le canal Vert et le canal Bleu. Parmi les valeurs R, V et B de chaque pixel, le canal vert est souvent choisi pour E afin d'estimer la forme d'une surface car c'est celui dont la gamme de longueurs d'ondes considérée est la moins étendue et pour lequel l'inversion est considérée la plus fiable. Cependant en théorie les reconstructions sont les mêmes quel que soit le canal choisi.

L'équation 4.3 comporte trois inconnues : p , q et ρ . Trois solutions à l'équation suffisent ainsi à retrouver ces valeurs : trois images pour trois positions de source différentes sont suffisantes et nécessaires pour résoudre le problème. L'inversion du système, écrit sous forme matricielle, permet d'écrire :

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\pi} &= \left\| \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E} \right\|, \\ \begin{bmatrix} p \\ q \\ 1 \end{bmatrix} &= \frac{\pi}{\rho} \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

avec $\left\| \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E} \right\|$ la norme de $\mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E}$. Pour simplifier les notations nous notons \mathbf{E} la matrice d'éclairement et \mathbf{S} la matrice de direction d'incidence de la lumière, définies par :

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{S_1} \\ \vdots \\ E_{S_x} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{1_x}, S_{1_y}, S_{1_z} \\ S_{2_x}, S_{2_y}, S_{2_z} \\ S_{3_x}, S_{3_y}, S_{3_z} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

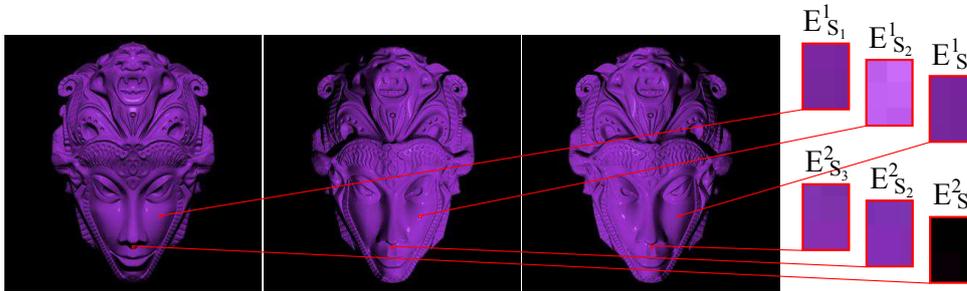


FIGURE 4.4 – Exemple de matériau non Lambertien. Images obtenues par lancer de rayon avec un modèle de Cook-Torrance ($n_i = 1.2$ et $\sigma = 0.05$). Pour un point de surface considéré l'un des pixels est dans la partie spéculaire du matériau : $E_{S_2}^1$ a une valeur forte. Pour le second point de surface, l'un des pixels est dans une zone d'ombre : $E_{S_3}^2$ a une valeur faible.

Pour un point de surface considéré, si les trois configurations (trois positions de sources lumineuses) donnent trois valeurs E_{S_1} , E_{S_2} et E_{S_3} répondant au modèle Lambertien, l'inversion peut être réalisée (figure 4.4). Il existe deux cas dans lesquels cette condition peut ne pas être remplie. Tout d'abord si la position de la source de lumière et la géométrie de la surface sont telles que le point considéré est dans l'ombre, alors la valeur E_{S_x} associée au point est faible. Le deuxième cas intervient lorsqu'un matériau n'est pas Lambertien : une partie de lumière est réfléchi de façon diffuse, une partie de façon spéculaire. Différents points de surface peuvent être dans une zone de spécularité et présente une valeur E_{S_x} forte et ne suivant plus le modèle Lambertien. La présence de ces comportements dans une matrice d'éclairement introduit inévitablement une erreur sur l'estimation de la réflectivité et des gradients de surface. Des évolutions de la méthode de Woodham ont été proposées pour gérer ces problèmes :

- l'utilisation d'objets de référence, de géométrie connue et dont la réflectance est la même que l'objet de l'étude afin de déduire la normale d'une surface à reconstruire à partir de la réflectance des points [HS03, HS05];
- l'utilisation d'une fonction de réflectance incluant une composante spéculaire afin d'améliorer la reconstruction tridimensionnelle des objets de réflectance non purement Lambertienne [Nay91, Geo03, SI96, GCHS10];
- l'augmentation du nombre de sources de lumière (supérieur à trois) afin de supprimer les points spéculaires et/ou les points dans l'ombre tout en conservant pour chaque pixel au moins trois valeurs E_{s_x} suivant l'équation 4.3 [JJ82, BP03, ABP08, SSS+07, BBK12];

L'utilisation d'objets de référence dont la réflectance est la même que l'objet de l'étude, appelés *objets cibles*, implique d'appliquer la même peinture sur l'objet à reconstruire et l'objet de référence (figure 4.5). La géométrie de ce celui-ci doit également être connue (e.g. utilisation d'une sphère) ainsi la valeur de chaque pixel est associée à une normale. Les acquisitions sont réalisées pour les deux objets sous les mêmes conditions. Pour chaque point de l'objet cible la valeur du pixel permet de déduire sa normale par comparaison avec les valeurs de l'objet de référence. Ce type de méthode n'est bien sûr pas utilisable dans le cadre d'un outil d'étude de la réflectance d'objet de géométrie inconnue, et encore moins lorsque les surfaces à étudier sont des objets historiques importants.



FIGURE 4.5 – La géométrie d'une bouteille est retrouvée grâce à l'utilisation d'une sphère, dont la géométrie est connue, recouverte de la même peinture. Les points ayant la même valeur possèdent la même normale. Image extraite de l'article [HS05].

L'utilisation d'une fonction de réflectance particulière est une alternative permettant la gestion des matériaux non Lambertiens. L'inversion de l'équation 4.1 donne alors :

$$(\mathbf{n}, \mathbf{s}) = \frac{E_p}{L_i(\mathbf{o}) \cdot k \cdot f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) d\omega_s'} \quad (4.6)$$

Peu de solutions analytiques existent pour l'inversion d'une fonction de BRDF f^{-1} car elle dépend elle-même de la normale recherchée. Afin de résoudre ce problème, les solutions proposées dans la littérature utilisent des algorithmes itératifs visant à minimiser l'erreur entre la mesure et le modèle choisi. Les paramètres du modèle et la normale à la surface sont ajustés successivement (e.g. par une méthode de descente de gradient) et l'algorithme est arrêté lorsque la meilleure estimation est trouvée. Cependant si le matériau ne correspond pas à la BRDF choisie, les erreurs de reconstruction peuvent être importantes. La présence d'ombres dans les images est également un problème supplémentaire qui doit être géré et n'est pas résolu par cette méthode.

Afin de permettre la reconstruction de surfaces non purement Lambertiennes et comportant des zones d'ombre, une autre solution consiste à utiliser un nombre de sources supérieur à trois, de façon à pouvoir éliminer pour chaque pixel les valeurs trop fortes (un reflet spéculaire), ou trop faibles (une ombre) (figure 4.4). En effet, les matériaux spéculaires présentent généralement une composante diffuse pouvant répondre à l'équation ?? et une composante spéculaire plus ou moins importante. La figure 4.6 illustre ceci sur la BRDF du matériau du masque de la figure 4.4 : selon la configuration direction d'incidence/normale à la surface/direction d'observation un pixel peut être dans la partie diffuse (en bleu) ou dans la partie spéculaire (en rouge et dont les solutions de détection proposées dans la littérature sont multiples). Pour chaque point de surface une valeur d'éclairement est produite par image et l'élimination des fortes valeurs permet de conserver uniquement des valeurs d'éclairement suivant un modèle Lambertien et ainsi d'appliquer l'inversion de l'équation ?. Cependant un minimum de trois valeurs d'éclairement par point de surface est nécessaire pour inverser cette équation, le nombre de sources doit alors être augmenté en fonction du nombre de valeurs supprimées (pour une seule valeur supprimée quatre sources doivent être utilisées, pour deux supprimées cinq sources et ainsi de suite). Ces méthodes présentent l'avantage de pouvoir être utilisées pour tous types de matériaux diélectriques opaques. De plus la configuration de ce type de système est similaire aux systèmes d'acquisition de réflectance utilisant un ensemble de sources : un capteur fixe et des sources de positions différentes. Il peut donc parfaitement s'intégrer au système d'estimation de réflectance sans besoin de recalage des données tridimensionnelles avec les données de réflectance. Un survol de ces méthodes est proposé dans l'article d'Ackermann et Goesele [AG15]. Nous ne présentons ici que succinctement quelques méthodes afin d'expliquer le principe de l'utilisation de plus de trois sources et l'évolution de l'algorithme pour permettre l'élimination des comportements non Lambertiens.

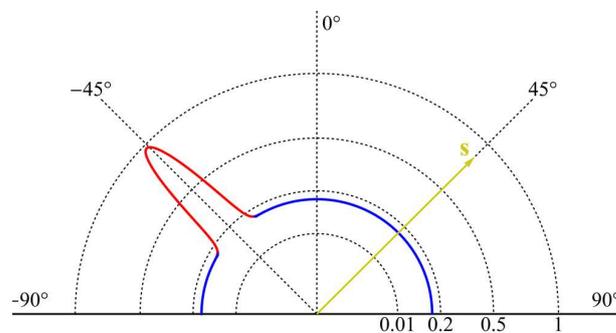


FIGURE 4.6 – Courbe de la BRDF du matériau appliqué au masque : modèle de Cook-Torrance ($n_i = 1.2$ et $\sigma = 0.05$). La composante diffuse, représentée en bleu, constitue la partie Lambertienne ; la composante spéculaire, représentée en rouge, est la partie à écarter pour permettre une reconstruction par inversion du modèle Lambertien.

La première méthode à utiliser le principe d'élimination des comportements non Lambertiens est proposée par Coleman et Jain [JJ82]. Les auteurs proposent d'adapter la méthode de Woodham pour l'utilisation de quatre sources de lumière afin de permettre la détection des points spéculaires. La figure 4.7 présente la méthodologie suivie : les quatre combinaisons de triplets de valeurs possibles formant chacun une matrice d'éclairement E différente sont calculées afin d'estimer le coefficient de diffusion ρ pour chacune d'elle. Pour chaque point de surface, l'écart entre les différentes valeurs de ρ , permet de détecter la présence ou non d'un point spéculaire. Lorsqu'une déviation est observée (i.e. lorsque l'écart dépasse un seuil fixé), la valeur E_{S_x} la plus forte est supprimée et les trois valeurs restantes sont à nouveau utilisées pour calculer les gradients de surface et le coefficient de diffusion. Si aucune variance n'est détectée une moyenne des quatre normales et des quatre coefficients de diffusion, issus des

quatre configurations possibles, est effectuée. Cette méthode n'élimine qu'une seule des trois valeurs si un point spéculaire est détecté. Lorsque les lobes spéculaires se recoupent d'une image à l'autre une erreur subsiste alors. De plus cette méthode ne tient pas compte des ombres.

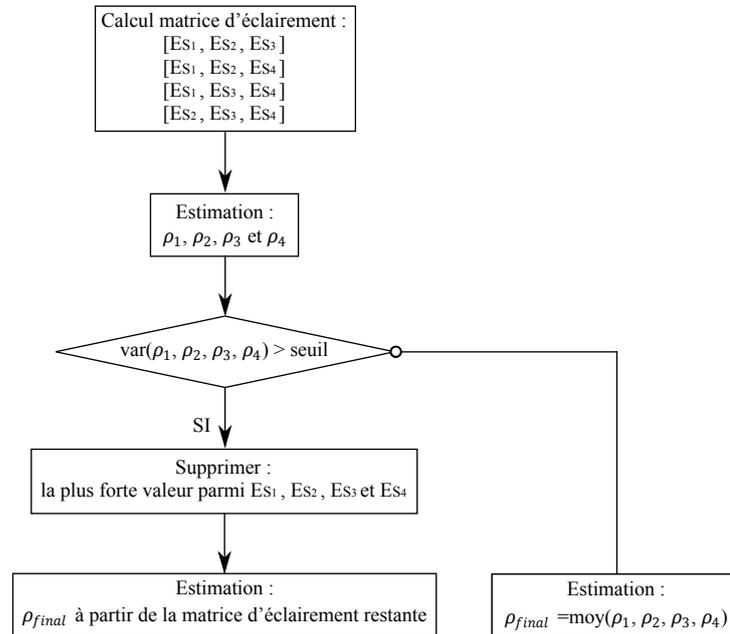


FIGURE 4.7 – Algorithme de la méthode d'élimination proposée par Coleman et Jain [JJ82].

Basky et Petrou [BP03] présentent également une nouvelle méthode à quatre sources utilisant la dépendance linéaire des sources de lumière pour élaborer une équation définissant un rapport entre elle. Le calcul de l'erreur quadratique produite par cette équation et sa comparaison à une valeur seuil permet de déterminer la présence ou non d'un point spéculaire ou d'une ombre dans le quadruplet de valeurs. En effet lorsqu'il y a une variance entre les coefficients de diffusion retrouvés, l'erreur peut provenir d'un point spéculaire mais également d'une ombre. La méthode détecte la présence de l'un ou l'autre de ces comportements et adapte la stratégie en conséquence. Nous supposons également qu'un point peut être spéculaire pour une position de source mais dans l'ombre par rapport à une autre position de source. Les zones de spécularité peuvent également se recouper. Pour permettre de conserver trois valeurs suivant le modèle Lambertien, si nous supposons que deux valeurs peuvent être spéculaires et une dans l'ombre c'est à dire potentiellement trois points supprimés, il faut au moins six sources de lumière. De manière générale l'augmentation du nombre de sources et leur positionnement permet de s'assurer d'obtenir au moins trois valeurs suivant le modèle Lambertien. Différentes méthodes, partant du principe que l'augmentation du nombre de sources permet de s'assurer d'obtenir au moins trois valeurs répondant au modèle Lambertien, proposent l'utilisation d'une dizaine de sources de lumières [ABP08, SSS⁺07], voire même d'une centaine [AZK08, HMI10]. Cependant plus le nombre de sources est important, plus les temps d'acquisition et de traitement sont importants. Un équilibre entre précision et temps de traitement doit donc être trouvé.

Les méthodes de reconstruction par stéréophotométrie estiment donc des champs de gradients d'une surface, contrairement aux autres méthodes de reconstruction 3D qui estiment une carte de hauteur. L'information de profondeur peut cependant être retrouvée à partir des informations d'orientation de surface. Celle-ci s'obtient par l'intégration des champs de gradients permettant de calculer l'élévation de la surface $\hat{\zeta}$ sur l'axe z du repère de la scène, aligné avec l'axe optique. Cependant, les erreurs d'estimation des gradients, même faibles, rend

impossible l'intégration directe des champs de gradients. Deux solutions ont été proposées dans la littérature afin de résoudre ce problème : utiliser un chemin d'intégration (méthodes locales) ou approcher la solution par la méthode des moindres carrés (méthodes globales ou par relaxation).

Les méthodes locales [JJ82, WL88, DC07] consistent à parcourir les champs de gradients selon un chemin d'intégration et déduire la hauteur de la surface de proche en proche. L'initialisation du premier point, ou de la première ligne, est nécessaire afin d'avoir un point de départ et est souvent considérée de hauteur égale à zéro. Cependant lorsqu'une erreur de calcul intervient, elle est propagée le long du chemin et les différentes erreurs rencontrées se cumulent petit à petit.

Les méthodes de relaxation et les méthodes globales se basent sur une minimisation de l'écart entre la dérivée partielle des champs de gradients et la dérivée de la surface estimée. Ceci peut être réalisé par itération successive : ce sont les méthodes par relaxation [HB86, HK04]. La convergence de ces algorithmes peut cependant être longue. Les méthodes globales résolvent la même équation mais utilisent l'équation de Poisson afin de passer dans le domaine fréquentiel, permettant de déterminer une relation entre les gradients p et q et l'estimation de l'élévation de la surface [FC88]. L'estimation de la hauteur de la surface peut ainsi être calculée. La méthode globale présentée par Frankot et Chellapa est ainsi connue pour son rapport qualité d'estimation de la hauteur / temps de traitement. L'objectif de cette thèse n'étant pas la recherche d'une nouvelle méthode d'intégration, nous ne proposons ici qu'un bref résumé des différentes familles de méthodes d'intégration des champs de gradient. La carte de hauteur estimée grâce à ces différentes méthodes permet ainsi de calculer la normale à la surface pour chaque point d'un objet.

4.1.3 Discussion

Parmi les systèmes d'acquisition de réflectance d'objet de géométrie inconnue, les systèmes utilisant une reconstruction géométrique à partir d'images nous intéressent particulièrement puisqu'elles permettent de proposer un seul et même système pour ces estimations successives. En effet l'estimation de la réflectance peut être réalisée à partir d'images lorsque la direction d'observation, la direction d'incidence de la lumière et les normales à la surface sont connues. Cette solution permet de réduire les coûts de mise en place ainsi que les manipulations par rapport à des systèmes utilisant plusieurs outils. Nous avons donc réalisé une étude bibliographique des méthodes d'estimation de la géométrie à partir d'images. Il ressort de cette étude que les méthodes de reconstruction par triangulation active permettent une grande précision (de l'ordre du micromètre) mais la projection du motif lumineux sur l'objet oblige à doubler les acquisitions pour permettre une estimation de la réflectance une fois la géométrie estimée, doublant ainsi le temps d'acquisition. Ce problème de temps d'acquisition important se pose également pour les méthodes de type mesure de flou nécessitant un grand nombre d'acquisitions pour une reconstruction complète d'une scène. L'utilisation de systèmes de reconstruction par triangulation passive et de méthodes basées silhouette, utilisant différentes vues d'un même objet pour retrouver sa géométrie, permet l'exploitation des images initialement utilisées pour la reconstruction 3D, pour l'estimation de la réflectance. Cependant les données géométriques et les données de réflectance doivent être appariées afin de réaliser cette estimation ce qui peut entraîner des erreurs et donc fausser l'estimation. Ce problème ne se pose pas lorsqu'un seul point de vue de la scène est utilisé, telles que pour les méthodes de reconstruction par étude de l'intensité des pixels. La stéréophotométrie nous

intéresse particulièrement pour la qualité de ses résultats sur des matériaux opaques avec seulement un point de vue et des positions de sources connues. Les solutions de reconstruction permettent non seulement la réutilisation des images pour l'estimation de la réflectance mais également d'effectuer ce calcul sans recalage des données géométrique avec les données des images puisque le point de vue est unique. Cette solution permet donc de répondre à nos différentes exigences concernant un système d'acquisition unique et limitant les étapes pouvant être sources d'erreur (tel que le recalage des données géométrique et de réflectance) ainsi que les manipulations.

Nous avons donc étudié les solutions de reconstruction par stéréophotométrie proposées dans la littérature. La méthode, initialement élaborée pour des surfaces diffuses, a été étendue à différents types de surfaces opaques. En effet, les comportements spéculaires et les ombres entraînent des erreurs de reconstruction et peuvent être gérés grâce à trois stratégies différentes : l'utilisation d'un modèle de réflectance plus complexe afin de gérer les comportements spéculaires, l'élimination des ombres et des points spéculaire ou encore l'utilisation d'un objet de référence de même réflectance que l'objet d'étude. Cette dernière solution n'est pas envisageable pour n'importe quel objet puisqu'il implique de recouvrir celui-ci d'une peinture identique à l'objet de référence. L'utilisation d'un modèle de réflectance incluant une composante spéculaire, utile pour la gestion de ces comportements entraînant des erreurs pour l'inversion du modèle Lambertien, limite la méthode de reconstruction à un type particulier de matériau et n'inclut pas la gestion des ombres. Nous nous sommes donc tournés vers les systèmes proposant une élimination des ombres et des points spéculaires pour permettre l'inversion du modèle Lambertien.

4.2 Notre Système de reconstruction stéréo

Notre objectif étant l'élaboration d'un système d'acquisition tridimensionnel couplé à un système d'estimation de la réflectance d'objets opaques, nous avons étudié les différentes solutions proposées dans la littérature pour ce type de système. Parmi les méthodes de stéréophotométrie nous nous sommes tournés vers celles qui utilisent un nombre de sources supérieur à trois afin d'éliminer les comportements spéculaires ou les ombres tout en conservant au moins trois valeurs répondant au modèle Lambertien. Afin de gérer ces problèmes ainsi que les zones de specularité pouvant se recouper d'une image à l'autre, nous proposons une méthode d'élimination hiérarchique : la détection des ombres, les comportements non Lambertiens puis la détections des différents points spéculaires. En effet, plus le nombre de sources utilisées est grand, plus le nombre de points spéculaires peut être important, et d'autant plus que le pic spéculaire est large. Ce problème de recoupement des zones spéculaires est peu géré par la plupart des algorithmes de reconstruction de la littérature et entraîne souvent des erreurs lorsqu'il n'est pas pris en compte. Ainsi notre méthode d'élimination permet d'estimer l'orientation de la surface sur tous types de matériaux opaques. Pour l'utilisation de la stéréophotométrie, le système doit être composé d'un point de vue fixe et de plusieurs sources de lumières de position connue. Pour de meilleurs résultats de reconstruction nous proposons une configuration de système utilisant douze sources de lumière placées sur deux cercles concentriques. Cette configuration, illustrée en figure 4.8, est détaillée dans cette section et son efficacité est confirmée lors de l'étape de validation virtuelle. Pour diminuer le bruit dans les images et permettre une meilleure reconstruction géométrique nous utilisons des acquisitions HDR. Les images sont obtenues par fusion d'images LDR au moyen d'une méthode élaborée pour une utilisation en stéréophotométrie.

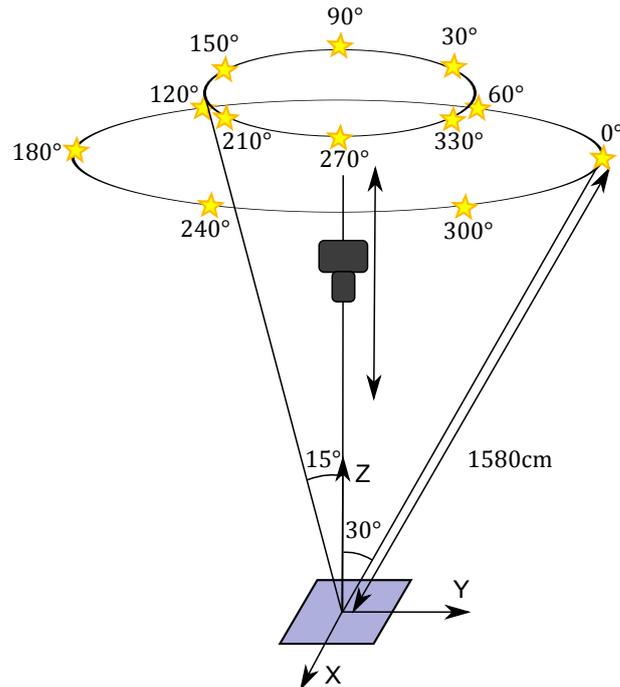


FIGURE 4.8 – Configuration de notre système d’acquisition. L’APN est fixé sur un bras métallique permettant de modifier sa position en hauteur. L’angle entre l’axe des Z et la direction d’incidence de la lumière est $\theta_s = 15^\circ$ pour la couronne des lampes à LED la plus haute et $\theta_x = 30^\circ$ pour la plus basse.

La configuration des systèmes de reconstruction par stéréophotométrie permet d’effectuer l’acquisition de la réflectance à la suite de l’estimation de la géométrie grâce aux mêmes images. En effet les systèmes d’estimation de réflectance utilisent différentes positions de sources de lumière afin d’estimer la réflectance à la surface. Le modèle tridimensionnel estimé et les images HDR sont utilisés pour retrouver la réflectance des objets d’étude. Pour chaque point de surface et pour chaque image, la connaissance de la position de l’APN et de la source ainsi que l’estimation de la normale à la surface permet le calcul de la réflectance du matériau de ce point de l’objet. Afin de permettre l’estimation d’un nombre de points suffisant, chaque objet est supposé constitué d’un seul et même matériau pour toute sa surface.

Les données de réflectance estimées, comme pour tout système de mesure, présentent du bruit dans les données acquises. Ce bruit est limité grâce à l’acquisition d’images HDR et à l’utilisation d’une méthode de reconstruction tridimensionnelle précise, mais les estimations successives de la géométrie puis de la réflectance entraînent inévitablement la présence de bruit dans les données de réflectance estimées. Afin d’éliminer ce bruit haute fréquence tout en conservant l’information utile des données, nous proposons une méthode de filtrage passe bas. Enfin la configuration de notre système d’acquisition (une seule position de caméra et peu de sources) permet des temps d’acquisition réduits mais n’offre qu’une reconstruction partielle de la réflectance des matériaux. Afin de compléter les données de réflectance acquises, nous réalisons une identification des paramètres de notre modèle à base de microfacettes sur les données de réflectance estimées. Cette étape d’identification, facilitée par l’utilisation des formulations approchées que nous avons élaboré (chapitre 3, section 3.2.3), est réalisée grâce à un algorithme génétique permettant une bonne convergence des résultats en peu de temps et sans nécessiter l’utilisation de valeurs de départ fournis par l’utilisateur.

La chaîne complète est représentée sur la figure 4.9. Cette chaîne d’acquisition est entièrement automatique et ne demande aucune intervention de la part de l’utilisateur. Cela

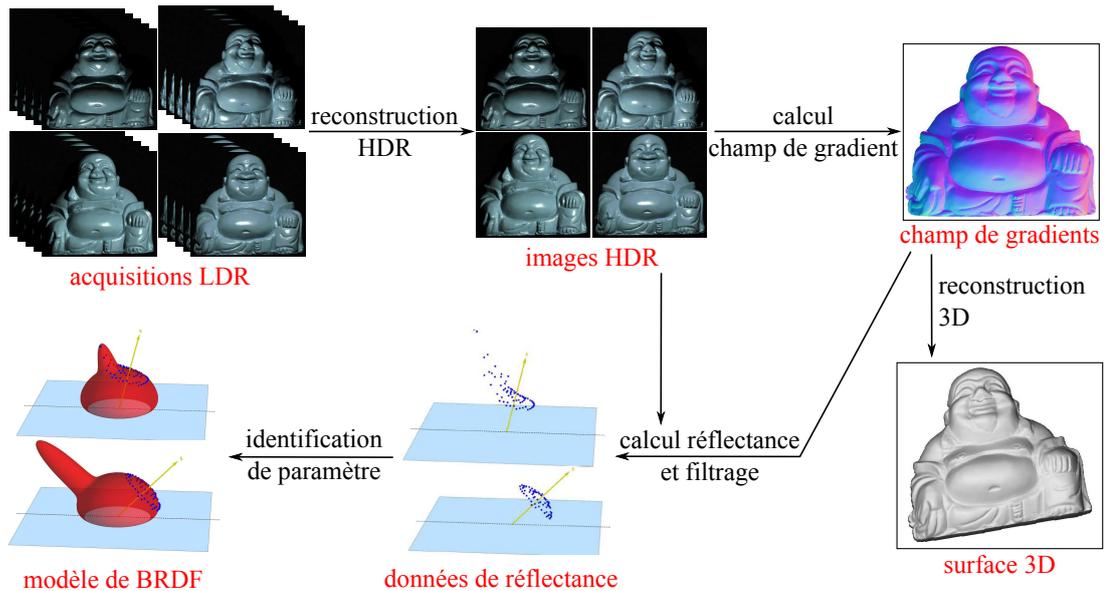


FIGURE 4.9 – Chaîne d'acquisition complète de notre système d'acquisition pour l'estimation de la réflectance de surface de géométrie quelconque.

permet une manipulation réduite des objets d'étude. Les grandes étapes de l'estimation de la réflectance d'objet de géométrie inconnue sont présentées dans cette section. La première partie présente tout d'abord notre méthode de reconstruction par stéréophotométrie ainsi que ses conditions de mise en œuvre pour de meilleurs résultats, avec notamment l'utilisation d'images HDR et le choix des positions des sources de lumière. Dans un deuxième temps notre système de filtrage des données ainsi que l'algorithme utilisé pour l'identification sont présentés et expliqués.

4.2.1 Notre solution de reconstruction par stéréophotométrie

Notre solution de reconstruction est une évolution de la méthode de Woodham consistant à utiliser plus de trois sources de lumière (i.e. nombre de sources m tel que : $m > 3$) et effectuer une élimination des comportements non Lambertiens et des ombres. Le nombre de sources et leurs positions sont choisis de manière à conserver au maximum trois valeurs suivant le modèle Lambertien pour chaque pixel. Le choix de ce type de méthode est discuté dans la suite de ce chapitre. Des acquisitions sont réalisées pour chaque source de lumière, ainsi pour chaque pixel de l'image, chaque combinaison de trois sources possibles (au nombre de $C_m^3 = \frac{m!}{3!(m-3)!}$) permet d'inverser le modèle Lambertien afin d'estimer les gradients de surface. Pour chaque point, autant d'estimations que de combinaisons sont possibles :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E}}{\|\mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E}\|}, \quad (4.7)$$

avec p et q les gradients de la surface au point considéré, \mathbf{S}^{-1} la matrice inverse des sources et \mathbf{E} la matrice des estimations d'éclairage de la scène. Pour chaque pixel, la matrice \mathbf{E} est construite grâce aux valeurs d'éclairage du canal vert de chaque image.

Différents problèmes peuvent se présenter lors de ces calculs. Selon les configurations

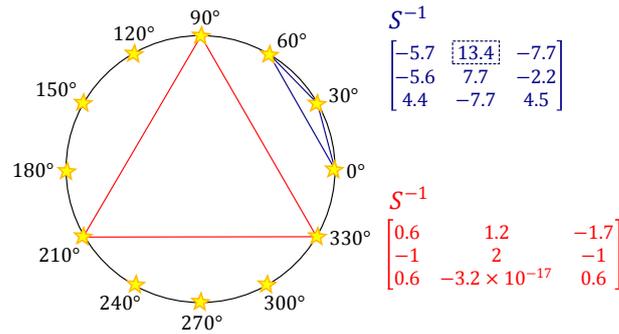


FIGURE 4.10 – Exemple de configurations possibles d'un triplet de trois sources de lumière et leur matrice inverse S^{-1} associée. L'utilisation d'une configuration pour laquelle les sources de lumière sont proches, telle que la configuration bleue ($\phi_{S_1} = 0^\circ, \phi_{S_2} = 30^\circ, \phi_{S_3} = 60^\circ$ et $\theta = 30^\circ$ pour chaque source) présentant une forte valeur dans S^{-1} engendre de fortes erreurs dans l'estimation des gradients en présence de bruit dans la matrice d'éclairage. La configuration rouge ($\phi_{S_1} = 90^\circ, \phi_{S_2} = 210^\circ, \phi_{S_3} = 330^\circ$ et $\theta = 30^\circ$ pour chaque source), dont les valeurs de la matrice inverse sont plus uniformes

choisies (trois sources de positions distinctes : figure 4.10) la matrice inverse, S^{-1} , peut présenter de fortes valeurs. L'utilisation de telles matrices pour les calculs permet la reconstruction de fort gradient mais induit également des erreurs importantes dans l'estimation des gradients si la matrice d'éclairage présente un bruit, ce qui est souvent le cas lors d'acquisition d'image. Les configurations telles que la rouge sur la figure, correspondent à des valeurs uniformes ne permettant pas la reconstruction de forts gradients. En revanche, elles sont moins sensibles aux bruits et offrent des estimations plus fiables. D'autres problèmes se présentent également lorsque les valeurs de la matrice d'éclairage ne suivent pas le modèle Lambertien (figure 4.11). Cela se traduit par des valeurs faibles ou fortes par rapport aux autres valeurs d'éclairage pour un même point des images, respectivement en présence d'une ombre ou d'un point spéculaire. Or lorsque la matrice des estimations d'éclairage de la scène E correspond à une valeur faible (une ombre : troisième ligne de pixels sur la figure 4.11) l'estimation de la normale est faussée. On observe dans ce cas une différence par rapport à la normale réelle et la normale estimée est orientée plutôt dans la direction opposée à la source causant l'ombre. De même, lorsqu'une valeur de la matrice d'éclairage est forte (un point spéculaire), l'estimation de la normale est faussée et la normale estimée est déviée vers la position de la source ayant produit le point spéculaire (cf. deuxième ligne de la figure 4.11).

Afin d'éliminer ces problèmes il convient d'en supprimer les causes. Nous proposons d'ignorer les configurations de sources défavorables, pour lesquelles les matrices inverses présentent de fortes valeurs. Nous proposons également de détecter et d'ignorer les points de surface dans l'ombre et les points spéculaires. Le nombre de sources à utiliser pour obtenir un compromis entre temps d'acquisition et qualité de reconstruction ainsi que leur position représente un choix important. Un nombre de cinq sources au minimum est nécessaire pour permettre l'élimination d'un point dans l'ombre et d'un point spéculaire. Cependant le nombre de configurations est encore trop faible pour permettre la conservation de trois valeurs suivant le modèle Lambertien pour toutes les zones des objets, notamment au niveau des bords où les zones d'ombre sont importantes. Par la suite nous proposons une comparaison des résultats pour six, huit et douze sources de lumières.

L'algorithme que nous proposons présente deux étapes principales : une étape globale, réalisée pour l'ensemble des images, et une étape locale, réalisée pour chaque pixel des images. L'étape globale consiste à calculer l'ensemble des matrices de sources possibles (l'ensemble des $C_m^3 = \frac{m!}{3!(m-3)!}$ configurations de trois sources possibles), ainsi que leurs inverses. Les matrices

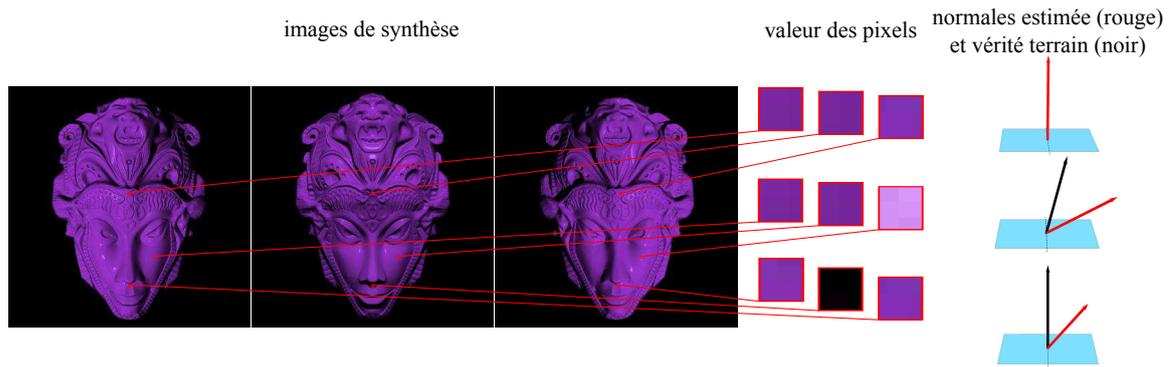


FIGURE 4.11 – Déviations des normales estimées en présence d'ombre ou de point spéculaire pour un système à trois sources. Trois configurations sont sélectionnées sur les trois images de synthèse : la première ligne représente un pixel dont la réflexion de la surface suit le modèle Lambertien pour ces directions d'incidence ; la deuxième ligne présente une configuration pour laquelle l'un des pixels est spéculaire ; la dernière ligne présente une configuration pour laquelle l'un des pixels est dans l'ombre. Les normales réelles sont représentées en noir et les estimations en rouge.

inverses contenant de fortes valeurs, supérieures à un seuil T_{source} , sont éliminées afin d'éviter des erreurs importantes lors du calcul de $(\mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{E})$ présent dans l'équation d'estimation des gradients (équation 4.7).

L'étape locale consiste à éliminer les comportements non Lambertiens, de façon hiérarchique. La première partie consiste à estimer la normale à la surface pour chaque couple de matrice d'éclairage et de matrice inverse des sources (avec un maximum de $C_m^3 = \frac{m!}{3!(m-3)!}$ normales estimées). Ces estimations pouvant être faussées du fait de la présence d'ombre et de points spéculaires, nous cherchons à éliminer ces comportements. Pour cela nous avons choisi dans un premier temps de chercher à conserver uniquement les valeurs d'éclairage faisant partie de la BRDF du matériau grâce à l'élimination des ombres. Cette étape est réalisée grâce à l'estimation de l'angle entre la normale à un point de la surface et les sources de lumière. En effet, pour les pixels correspondants à des points à l'ombre (figure 4.12), la normale estimée est déviée à l'opposé de la source. L'angle formé par la direction de la source et la normale est alors au moins égale à $\pi/2$ (correspondant à la configuration d'une ombre propre). L'estimation de l'angle entre la direction d'incidence et la normale est réalisée pour chaque source de lumière : les différentes estimations de normale calculées à partir d'une matrice faisant intervenir la source concernée sont utilisées pour calculer une normale moyenne pour obtenir l'estimation de l'angle entre la normale et la source. Au-delà d'un angle critique, notée T_{ombre} , nous considérons qu'un point de surface, pour une direction d'incidence de lumière, est dans l'ombre. Ce seuil est donc en théorie proche de $\pi/2$, mais en pratique nous avons observé que le choix d'une valeur plus faible permet de rendre les calculs plus robustes aux bruits. Lorsque l'angle calculé est supérieur au seuil T_{ombre} , nous supprimons les matrices d'éclairage dans lesquelles intervient le pixel ainsi que les matrices de sources dans lesquelles intervient la source pour le point de surface considéré (figure 4.13).

Toutes les valeurs de matrice d'éclairage restantes après l'élimination des zones d'ombre sont des valeurs de BRDF. Seule la présence d'un point spéculaire dans une matrice d'éclairage peut donc fausser l'estimation de la normale par celle-ci. Ainsi si la variance est importante pour l'ensemble des estimations de normale, cela indique la présence d'un ou plusieurs points spéculaires dans une ou plusieurs normales estimées. Si la variance est supérieure au seuil $T_{speculaire}$, nous considérons qu'elle est due à la présence d'un point spéculaire (figure 4.13) et le pixel ayant la plus forte valeur E_{S_x} , parmi toutes les matrices

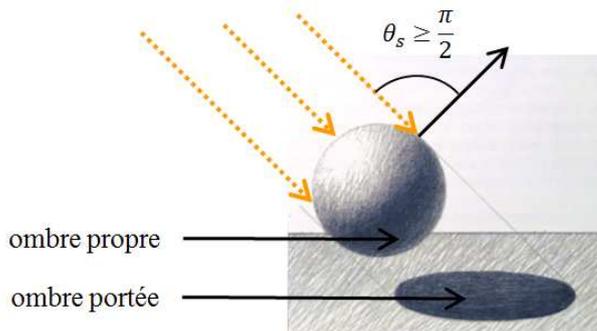


FIGURE 4.12 – Exemple d’une ombre propre et d’une ombre portée : l’ombre propre est formée par la portion non éclairée d’un objet tandis que l’ombre portée est une zone d’un objet voisin pour lequel l’objet considéré bloque la lumière.

d’éclairage, est supprimé. Les combinaisons dans lesquelles intervient la source S_x ayant produit cette forte valeur sont alors rejetées. Après l’élimination de ce point, la variance est recalculée et une nouvelle élimination peut être effectuée si nécessaire. Lorsque la variance est inférieure au seuil $T_{\text{speculaire}}$ ou lorsqu’il ne reste plus qu’une combinaison de trois lampes les itérations sont arrêtées. Ce seuil est théoriquement égal à zéro (aucune variance acceptée). Mais en pratique une valeur plus importante permet de meilleurs résultats. L’estimation finale de la normale est ensuite réalisée pour chaque pixel, elle est obtenue par moyenne de l’ensemble des normales restantes. Enfin la géométrie complète est retrouvée grâce au calcul de la carte de hauteur de la surface par intégration des champs de gradients au moyen d’une méthode de Frankot et Chellapa [FC88].

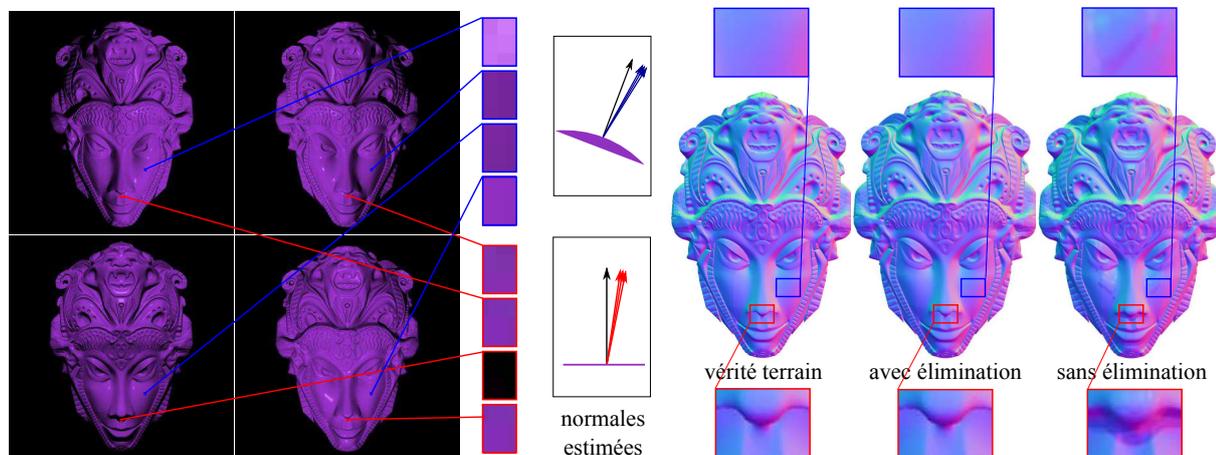


FIGURE 4.13 – Détection d’un point spéculaire (point entouré en bleu) et d’un point d’ombre (point entouré en rouge). Pour deux points de surface considérés, l’une des acquisitions présente une forte valeur \hat{E}_p , l’autre une faible valeur. Les combinaisons pour lesquelles ces deux valeurs interviennent présentent des erreurs de reconstruction des normales (représentées en bleues pour le point spéculaire, en rouge pour le point d’ombre). Le calcul de la variance entre les normales estimées permet de détecter si l’un des pixels est spéculaire. Si la variance est supérieure à $T_{\text{speculaire}} = 0.25$, la plus forte valeur d’éclairage est supprimée ainsi que les combinaisons où elle intervient. De même pour un point d’ombre, si l’angle entre la normale à la surface et la direction d’incidence de lumière est supérieur à $T_{\text{ombre}} = 1.5$, alors ce point est supprimé. Les reconstructions obtenues avec et sans élimination sont représentées ainsi que la vérité terrain.

La figure 4.14 illustre les résultats de détection des ombres et des points spéculaires grâce à notre méthode pour des valeurs de seuil : $T_{\text{ombre}} = 1.5$ et $T_{\text{speculaire}} = 0.25$. La gestion des ombres dans les méthodes de la littérature est un point difficile à traiter, en effet un simple

seuillage ne permet pas d'éliminer ces zones puisque selon la couleur du matériau (plus ou moins sombre) et la nature de l'ombre (ombre portée ou ombre propre) la valeur d'éclairage est différente. Au contraire, notre méthode de détection des ombres permet d'utiliser un seuil dont la valeur est simple à déterminer et identique pour toutes les acquisitions. Nous proposons également un système de détection automatique des points spéculaires grâce à un calcul de variance permettant d'utiliser un seuil identique pour toutes les acquisitions. Des simulations nous ont permis de déterminer la valeur optimale pour chaque seuil, ainsi lors d'une nouvelle acquisition aucune modification de ces paramètres n'est nécessaire. Notre algorithme permet donc d'éliminer à la fois des zones d'ombre mais également des zones spéculaires pouvant se recouper d'une image à l'autre grâce aux itérations sur l'élimination des points spéculaires. Ce phénomène est peu géré par les méthodes de la littérature. Or lors de l'augmentation du nombre de sources de lumière, les occurrences parmi les différentes images de ces mauvaises configurations augmentent également pour un même point de surface. Notre traitement des zones non Lambertiennes permet donc d'augmenter le nombre de sources pour ajouter de nouvelles configurations utiles à la reconstruction, tout en supprimant les recouvrements de zones problématiques qu'elles apportent. Une validation virtuelle de notre algorithme est proposée dans la section suivante et permet de valider le choix des positions des sources de lumière.

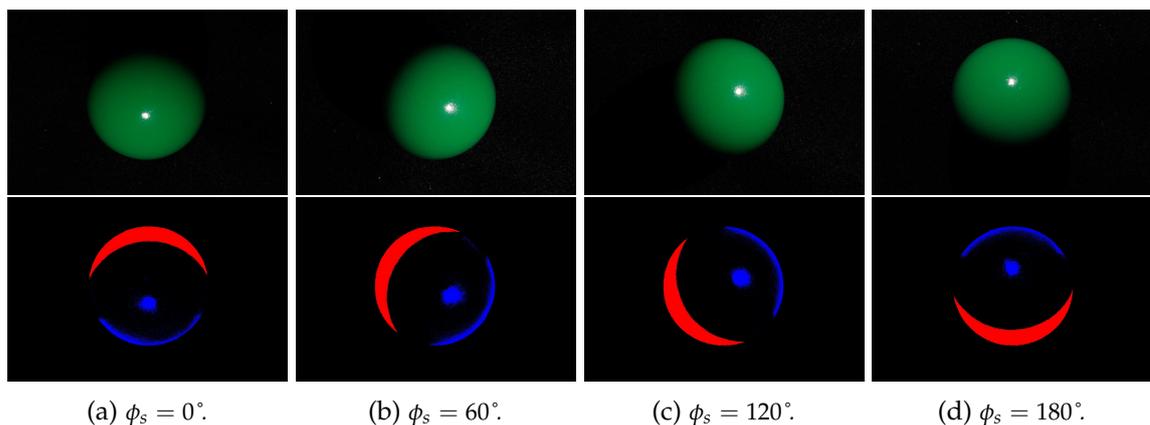
(a) $\phi_s = 0^\circ$.(b) $\phi_s = 60^\circ$.(c) $\phi_s = 120^\circ$.(d) $\phi_s = 180^\circ$.

FIGURE 4.14 – Exemple de détection des zones d'ombre (en rouge) et de spécularité (en bleu) sur une sphère pour les angles d'incidence $\phi_s = 0^\circ$, $\phi_s = 60^\circ$, $\phi_s = 120^\circ$ et $\phi_s = 180^\circ$, avec $\theta_s = 30^\circ$. Avec $T_{\text{ombre}} = 1.5$ et $T_{\text{spéculaire}} = 0.25$.

4.2.2 Estimation de la réflectance, filtrage et identification

Les images acquises pour la reconstruction de la géométrie des objets correspondent à un point de vue unique, de position connue et différentes positions de sources de lumière connues également. A partir des valeurs d'éclairage fournies par les images (pour chaque canal R, V et B), des normales estimées ainsi que des directions d'observation et d'incidence de la lumière, il est alors possible de remonter à l'information de réflectance de la surface pour chaque point et pour chaque image de l'objet d'étude. Les systèmes d'acquisition pouvant comporter du bruit dans les données estimées, nous proposons un filtrage. Cette étape est validée par des tests afin de s'assurer de la conservation de l'information importante (forme correcte de la fonction de réflectance).

Estimation de la réflectance et filtrage :

L'information lumineuse acquise par les APN est convertie en valeurs numériques par l'intermédiaire de l'objectif et du capteur. Ce dernier se compose d'une matrice de photosites

transformant les photons du flux lumineux reçu en électrons e^- , d'un circuit de lecture déterminant la tension associée et enfin du convertisseur analogique/numérique (CAN) convertissant la tension en valeurs numériques M et quantifiées sur Q Bits pour trois canaux R, V et B. Le signal est donc quantifié en 2^Q plages dont la taille dépend de l'étendue du signal. Un faible pas de quantification permet un bon niveau de détail mais réduit la dynamique acquise et inversement. Or nous cherchons à quantifier la réflectance de matériaux d'aspect divers (de diffus à spéculaire). Bien que la réflectance d'un matériau mat soit relativement constante quelles que soient les conditions d'éclairage ou d'observation, ce n'est pas le cas des surfaces brillantes. Selon les directions d'incidence de la lumière et la direction d'observation, ce type de matériau peut prendre une gamme très large de valeurs de réflectance. La figure 4.15 illustre la dynamique nécessaire pour acquérir les variations d'éclairage en fonction de l'angle entre la direction d'incidence de la lumière et la normale à la surface. Pour un matériau Lambertien uniforme, une dynamique de 8 bits est suffisante, en revanche pour d'autre type de matériaux pour lequel un lobe spéculaire apparaît, la dynamique peut facilement dépasser celles qu'un capteur 12 bits peut acquérir. De plus ces données acquises sont quantifiées, ce qui peut entraîner des pertes d'information, notamment sur le pic spéculaire si le pas de quantification est trop élevé. Des acquisitions pour de la métrologie nécessitent donc à la fois une grande dynamique et un pas de quantification assez fin pour permettre d'acquérir avec précision le lobe spéculaire. Nous utilisons pour notre étude la méthode proposée dans l'article [BBK15] permettant de calculer des images dont la dynamique est augmentée et pour lesquelles le pas de quantification est faible grâce à la fusion d'images LDR dont les temps d'exposition différent. Les méthodes de fusion classiques réalisent la fusion des images LDR par une moyenne pondérée. Or les images LDR sont bruitées, les valeurs d'éclairage estimées sont faussées. La méthode présentée dans l'article [BBK15] écarte les données bruitées grâce à une fenêtre de décision permettant d'obtenir des valeurs d'éclairage le plus juste possible tout en éliminant le bruit.

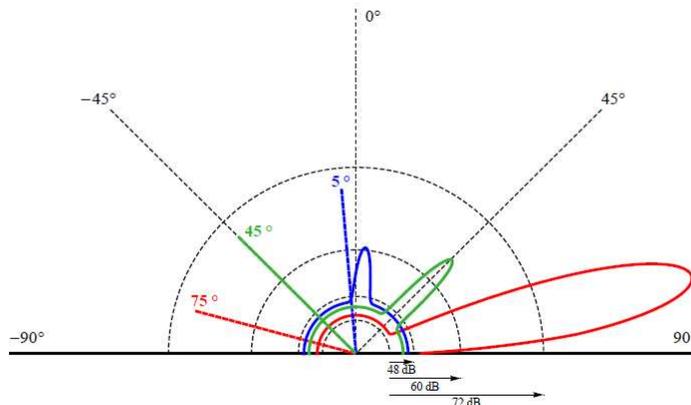


FIGURE 4.15 – Valeurs d'éclairage un matériau spéculaire lisse (modèle de Cook et Torrance [CT82]) pour trois incidences de la lumière $\theta_s = 5^\circ, 45^\circ$ et 75° et pour tout l'hémisphère supérieur de θ_o . La dynamique que permet de capturer des capteurs 8 bits (soit 48 dB), 10 bits (soit 60 dB) et 12 bits (soit 72 dB) est indiquée sous l'axe des abscisses.

L'éclairage, noté \hat{E}_p , estimé grâce aux images HDR est au plus proche des valeurs réelles. Nous avons présenté dans la section 2.2.2 du chapitre 2 la relation entre la luminance réfléchie par le matériau et les valeurs d'éclairage estimées par un APN. Pour rappel cette relation est la suivante :

$$\hat{E}_p = L_r \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{d_l}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha = L_r k. \quad (4.8)$$

avec d_l et f , l'ouverture du diaphragme et la distance focale, paramètres connus de l'APN et $\cos^4 \alpha = 1$ si le système de projection est considéré orthographique. Cette approximation peut être faite si la distance focale et la distance entre l'objectif et la scène sont grandes par rapport à la taille des objets d'étude. La configuration de notre système d'acquisition, pour lequel l'APN est loin de l'objet permet d'utiliser cette approximation.

Pour rappel, l'équation du rendu présentée dans la section 2.1.2 du chapitre 2, permet de calculer la luminance réfléchie par un élément de surface dans une direction d'observation :

$$L_r(\mathbf{o}) = \int_{\omega_s} L_i(\mathbf{s}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_s, \quad (4.9)$$

avec $L_r(\mathbf{o})$ la luminance réfléchie dans la direction d'observation \mathbf{o} pour l'élément de surface considéré, $L_i(\mathbf{s})$ la luminance qu'il reçoit et $f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ sa BRDF. L'inversion de cette équation permet de remonter à l'information de réflectance du matériau. Dans le cas de notre système, une seule source de lumière éclaire la surface pour chaque image acquise. En considérant qu'il n'y a pas de réflexions lumineuses multiples dans la scène (cette condition peut être remplie, ou en partie, grâce à la mise en place d'un système d'acquisition dans une chambre noire tel que présenté dans la partie 4.3.2), la luminance réfléchie est définie de la façon suivante :

$$L_r(\mathbf{o}) = L_i(\mathbf{o}) f(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) \cos \theta_s d\omega_s, \quad (4.10)$$

L'inversion de cette équation fournit une estimation de la BRDF en chaque élément de surface considérée et pour chaque canal R, V et B :

$$\hat{f}(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n}) = \frac{\hat{E}_p}{k.L_i(\mathbf{o}).(\hat{\mathbf{n}}.\mathbf{s})d\omega_s}, \quad (4.11)$$

où $\hat{\mathbf{n}}$ est la normale à la surface estimée grâce à notre méthode de reconstruction, \mathbf{s} la direction d'incidence de la lumière, connue pour chaque image et \mathbf{o} la direction d'observation connue également. Enfin $L_i(\mathbf{o})$ peut être estimée grâce à une calibration précise du système. Pour chacune des images HDR acquises, une estimation de l'éclairement de la surface en chaque point est ainsi associée à une estimation de normale $\hat{\mathbf{n}}$ et aux directions d'observation et d'incidence connues. L'estimation de la BRDF $\hat{f}(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ est alors directe (équation 4.11).

Ces données de réflectance estimées peuvent être bruitées à cause des estimations successives (acquisition, reconstruction et estimation de la réflectance). Afin de diminuer la variance correspondante, nous proposons d'utiliser la redondance des données et réaliser un filtrage. En effet les points de mesure sont concentrés dans la partie haute de la fonction de réflectance (les données en incidence et en observation rasantes sont peu représentées) et plusieurs points de mesure correspondant à des paramètres proches $\theta_s, \phi_s, \theta_o, \phi_o$ sont obtenus. Une moyenne des points de mesure correspondant aux mêmes paramètres permet alors de lisser le signal et diminuer la variance des données. Nous réalisons un filtrage, pour chacun des canaux R, V et B, de ces données grâce à l'utilisation d'un capteur virtuel hémisphérique divisé en cellules d'un capteur virtuel. Ainsi pour chaque direction d'incidence le capteur collecte dans chacune de ses cellules les points de mesure des directions d'observation associées à celle-ci et en fait la

moyenne.

De nombreuses méthodes de découpage d'un hémisphère en cellules ont été présentées dans la littérature [Tre87, WWL06, WWL07, Leo06]. Afin de réaliser une division en cellules de taille identique, facilement paramétrable, nous utilisons la méthode proposée dans l'article [BB12]. La taille des cellules du capteur définit le degré de filtrage des données de BRDF : plus les cellules sont grandes plus le nombre de points collectés et le filtrage sont importants.

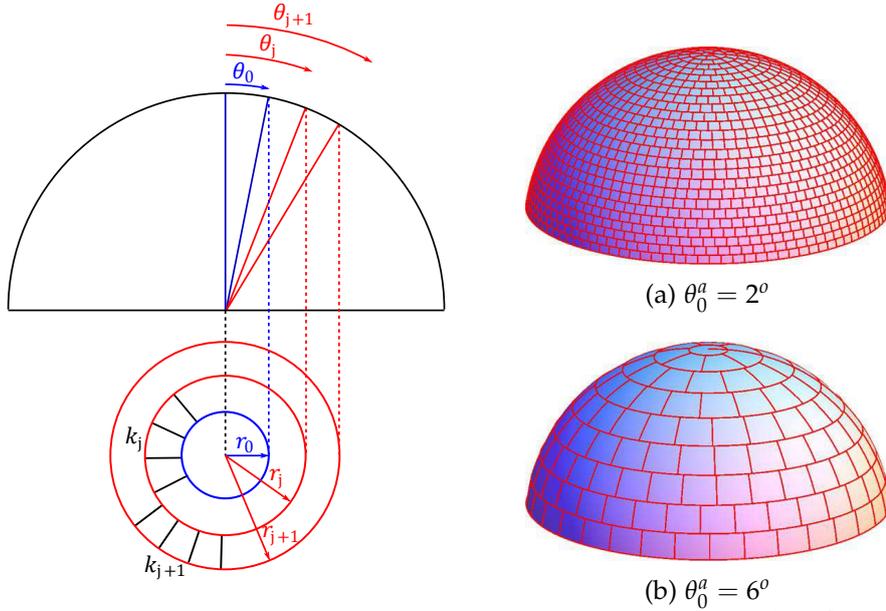


FIGURE 4.16 – Capteur virtuel et découpage de l'hémisphère en cellules. a) calcul itératif de θ_j^a , r_j et k_j pour chaque anneau j a) Découpage pour $\theta_0^a = 2^\circ$. b) Découpage pour $\theta_0^a = 6^\circ$

La subdivision de l'hémisphère en cellules au moyen de cette méthode dépend donc du choix de la taille des cellules contrôlée par le paramètre θ_0^a l'angle zénithal du premier anneau (anneau du haut). Plus cet angle est grand, plus la hauteur des cellules est grande. La subdivision est ensuite calculée anneau par anneau, en partant du pôle. Pour chaque anneau j le rayon r_j , le nombre de cellules k_j qui le constituent, ainsi que l'angle zénithal θ_j^a , sont calculés de façon itérative à partir de l'angle zénithal de l'anneau précédent (figure 4.16) :

$$r_{j+1} = 2 \sin \frac{\theta_j^a}{2} \quad (4.12)$$

$$k_{j+1} = k_j \left(\frac{r_{j+1}}{r_j} \right)^2 \quad (4.13)$$

$$\theta_{j+1}^a = \theta_j^a + 2 \sqrt{\frac{\pi}{k_j}} \sin \frac{\theta_j^a}{2} \quad (4.14)$$

Les mesures de BRDF obtenues à partir des images de notre système pour chaque canal R, V et B sont toutes définies pour la même direction d'observation. Afin de projeter les mesures de BRDF pour un canal sur le capteur hémisphérique, un repère local est créé en chaque point de surface de manière à avoir $\phi_s = 0^\circ$ pour chaque mesure (figure 4.17) : pour chaque point de surface, le repère local créé permet de calculer l'angle ϕ_s , une rotation est ensuite effectuée afin d'obtenir $\phi_s = 0^\circ$. Pour chaque direction d'incidence ainsi calculées et pour chaque canal, un capteur hémisphérique enregistre les valeurs de BRDF. Lorsque toutes les données de BRDF sont projetées sur le capteur, la moyenne de toutes les données de chaque cellule est

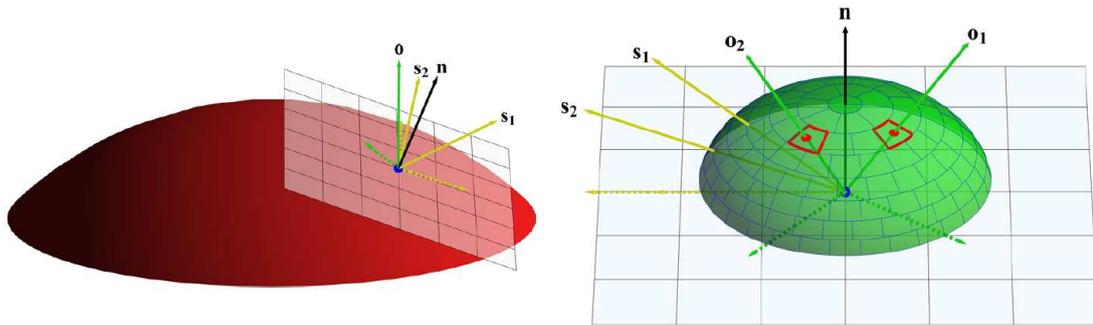


FIGURE 4.17 – Représentation d'un point de mesure sur une surface pour deux sources lumineuses. (a) Pour un point de la surface et pour chaque lampe, un repère local est créé pour estimer l'angle ϕ_s . (b) Après rotation du repère local pour obtenir les vecteurs s_1 et s_2 sur le plan d'incidence, les points de mesure o_1 et o_2 sont projetés sur le capteur virtuel hémisphérique

calculée et fournie la valeur de BRDF assignée à chacune d'elle. Cette valeur est affectée à la position centrale de la cellule, i.e. la direction d'observation passant par le centre de la cellule est associée à la valeur de BRDF estimée. Ainsi le filtrage des données de réflectance dépend de la taille des cellules, donc de la valeur de θ_0^a . Plus la valeur est faible, plus les cellules seront petites et moins le filtrage est important. C'est un filtre passe-bas dont la puissance dépend de la taille des cellules : pour une bande passante large, θ_0^a doit être choisi de valeur faible et inversement. La taille idéale des cellules pour le filtrage des données de réflectance de tout type de matériaux opaques est déterminée dans notre étape de validation virtuelle présentée dans la section suivante.

Identification des paramètres de BRDF :

L'estimation de la réflectance obtenue grâce à notre système puis filtrée par le capteur hémisphérique virtuel permet d'obtenir une mesure de réflectance partielle pour chaque canal R, V et B. En effet la seule direction d'observation et le nombre limité de positions des sources de lumière ne permettent pas d'estimer la BRDF complète d'un matériau. De plus les directions d'incidence rasantes sont particulièrement difficiles à obtenir au moyen des systèmes d'acquisition de réflectance, du fait de l'augmentation de la surface visible pour ces directions. L'identification des paramètres d'un modèle mathématique sur les données acquises permet de compléter ces données tout en donnant une information sur le comportement du matériau, au moyen des paramètres du modèle. Nous utilisons notre modèle Lambertien interfacé afin d'estimer pour un matériau : ρ sa rugosité et n_i son indice de réfraction. Le processus d'identification des paramètres consiste à trouver les meilleures valeurs de paramètres possibles pour une bonne adéquation entre les données estimées et le modèle de BRDF. Pour cela un grand nombre d'estimations des valeurs du modèle de BRDF pour différents paramètres est nécessaire. Les formulations approchées du modèle Lambertien Interfacé étant plus rapide à calculer qu'une estimation du modèle par méthode de Monte Carlo, nous choisissons donc d'utiliser les formulations approchées. Différentes méthodes d'identification existent, notamment par descente de gradient [Mar63, PEG78]. Pour orienter l'algorithme, les valeurs que peuvent prendre les paramètres doivent être indiquées. Par exemple pour notre modèle Lambertien interfacé le coefficient de diffusion est tel que $\rho = [0, 1]$, le paramètre de rugosité $\sigma = [0, 2]$ et l'indice de réfraction $n_i = [1, 2.5]$. La valeur maximum acceptable du paramètre de rugosité est cependant délicate à définir. En effet, plus σ augmente, plus les différentes orientations de microfacette possibles deviennent équiprobables (la fonction de distribution devient presque constante pour de fortes valeurs de σ). Une forte proportion de microfacettes est alors orientée presque parallèlement par rapport à la normale macroscopique, ce qui semble physiquement peu probable. De plus pour une convergence rapide des algorithmes

d'identification par descente de gradient, il est préférable de démarrer les recherches avec une valeur proche de la valeur réelle du matériau. Ceci implique d'étudier l'allure de la courbe de réflectance avant d'effectuer l'identification de paramètres afin de déduire des paramètres plausibles et les fournir à l'algorithme. Afin d'éviter cela et pour obtenir une convergence rapide, nous proposons une méthode d'identification inspirée de l'algorithme génétique de Brady *et al.* [BLPW14]. Ce type d'algorithme repose sur la création de populations aux paramètres variés et n'ont pas besoin de valeurs de départ bien ciblées pour obtenir une bonne convergence.

Le principe de l'algorithme génétique que nous avons développé peut être appliqué à l'identification des paramètres de notre modèle de BRDF. C'est une stratégie d'apprentissage utilisant une méthodologie évolutive afin de rechercher un ensemble d'instructions (dans notre cas les paramètres d'un modèle) optimisant un critère (dans notre cas la différence entre les valeurs du modèle et les valeurs mesurées) [Koz92]. A partir d'une population initiale de modèles candidats, une nouvelle génération de candidats est produite à partir de la première par une série d'opérations de mutation, de croisement et de sélection. Après chaque génération, la nouvelle population favorisant les candidats les plus intéressants est choisie, puis le processus se répète. Cette méthode, à l'image de l'évolution génétique, vise à favoriser les individus les plus aptes et converge rapidement vers une solution.

Cette méthode nous intéresse par sa rapidité de convergence. De plus, elle n'utilise pas d'initialisation particulière des paramètres des modèles de BRDF et se prête bien à la recherche des paramètres d'un modèle mathématique de BRDF. Nous utilisons donc ce principe avec notre modèle Lambertien interfacé. Le processus pour l'identification de paramètres commence par l'initialisation d'une première population, créée avec un nombre donné d'individus et un nombre maximum d'itérations autorisées. Chaque individu (les valeurs des paramètres du modèle) de la première population est créé de manière aléatoire. Puis à chaque itération, les individus sont triés par rapport à leur écart aux données de réflectance mesurées que l'on cherche à approcher. Tant que le meilleur individu a un taux d'erreur trop fort ou que le nombre maximum d'itérations n'est pas atteint, la population est modifiée : les meilleurs individus sont sélectionnés à l'aide d'un processus aléatoire, tandis que le reste de la population est modifiée par entrecroisement entre deux individus parents ou par mutation. En résumé les étapes successives, représentée sur l'algorigramme de la figure 4.18, sont :

1. initialisation d'une population de N individus (jeux de paramètres) dont les paramètres sont choisis aléatoirement,
2. l'erreur entre les données mesurées et le modèle mathématique pour chaque individu est évaluée afin de trier les individus de la plus petite à la plus grande erreur,
3. un processus de sélection stochastique permet de conserver inchangés les meilleurs individus tandis que les autres sont modifiés par croisement ou mutation,
4. les individus sélectionnés se voient assigner les paramètres obtenus par croisement de deux individus parents (moyenne des paramètres des deux parents par exemple) ou par mutation (réinitialisation de certains paramètres ou modifications d'un paramètre parent par ajout ou soustraction d'une valeur aléatoire à ce paramètre),
5. l'étape 2 est répétée et l'algorithme boucle sur 2, 3 et 4 temps que l'erreur du premier individu n'est pas inférieure à un seuil S_{err} fixé.

L'avantage de cette méthode réside dans l'étape de sélection, croisement et mutation. En effet la création d'individus lors de ces étapes tout au long de la recherche peut permettre de sortir d'une impasse et orienter les recherches vers une nouvelle piste plus cohérente tandis

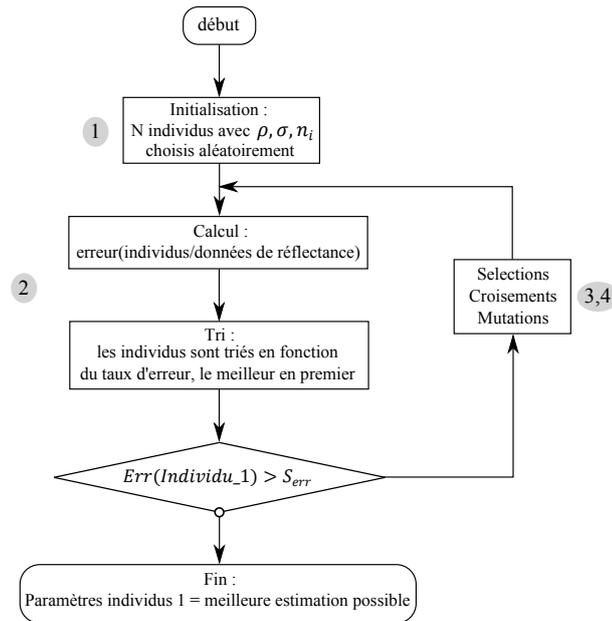


FIGURE 4.18 – Algorithme d’une méthode d’identification par un algorithme génétique. Les paramètres du modèle de BRDF Lambertien Interfacé sont ρ , σ et n_i . La fonction d’erreur permet de classer les individus du meilleur au moins bon individu (plus faible erreur entre le modèle avec les paramètres de l’individu courant et les données de réflectance estimées). L’algorithme est stoppé lorsque l’erreur du meilleur individu est inférieure à un seuil S_{err} fixé.

que les modifications (croisement ou mutation) sur le meilleur individu raffinent les valeurs des paramètres jusqu’à obtenir le meilleur trio possible. Nous observons en pratique une convergence très rapide de l’algorithme vers un individu particulier puis son raffinement successif. Le choix des paramètres N et S_{err} oriente la qualité des résultats. Une population nombreuse permet de faciliter la recherche par la multiplication des individus, tandis qu’une faible erreur contraint le système et augmente les temps de calculs.

Le choix de la fonction d’erreur est très important afin d’orienter la priorité : pour un matériau non purement Lambertien la gestion du poids de l’erreur sur la composante diffuse et sur la composante spéculaire influence l’erreur générale du modèle. L’identification de paramètres sur le modèle Lambertien interfacé pose ainsi des problèmes dus à l’interdépendance entre la composante spéculaire et la composante diffuse. Les paramètres du modèle de Cook-Torrance sont plus faciles à identifier puisque la modification de l’une ou l’autre des composantes n’influence pas la seconde. Le raffinement peut donc se faire sur chacune des parties. Il faut alors choisir la priorité de recherche, avec une pondération plus importante sur la composante diffuse ou sur la composante spéculaire. Par exemple lorsque le modèle est utilisé pour du rendu, le meilleur compromis en terme d’erreur entre le modèle Lambertien interfacé et les données ne correspond pas forcément à la plus proche représentation visuelle puisque la fonction de tone mapping vient influencer le rendu final de l’image. De plus notre œil semble plus sensible aux erreurs sur la composante spéculaire que sur la composante diffuse. Une étude plus poussée sur ce sujet, intégrant des tests visuels, serait intéressante.

La figure 4.19 présente l’identification de paramètres de notre modèle Lambertien interfacé sur des données réelles issus de la base de données Merl [MPBM03]. Notre modèle offre une bonne correspondance avec le comportement de ces matériaux puisqu’il gère la rétrodiffusion de la lumière comme le modèle d’Oren et Nayar mais tout en proposant la prise en compte de la composante spéculaire. Ce comportement ne peut pas être géré au moyen d’un modèle de

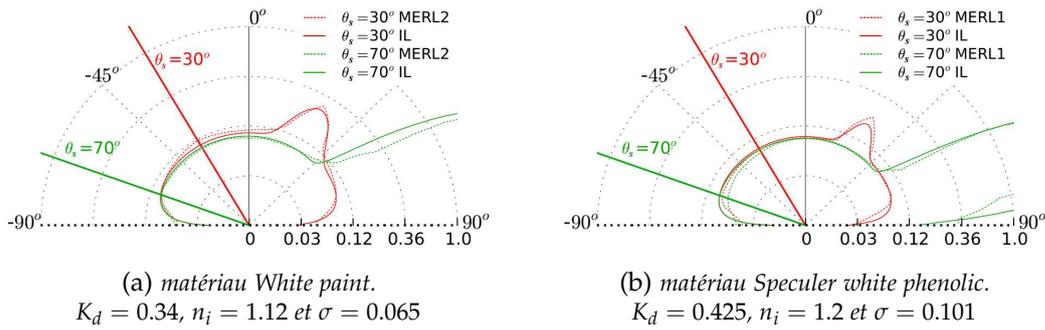


FIGURE 4.19 – Identification des paramètres de notre modèle Lambertien interfacé (distribution de Beckmann et GAF de Torrance et Sparrow) pour deux directions d'incidence ($\theta_s = 30^\circ$ et $\theta_s = 70^\circ$, échelle logarithmique) sur deux matériaux issus de la base de données Merl.

Cook Torrance pour lequel la composante diffuse purement Lambertienne ne tient pas compte de l'influence de la rugosité sur la composante diffuse.

La figure 4.20 illustre également les résultats d'identification de la composante volumique de notre modèle sur des données réelles de différents matériaux disponibles dans la base de données Merl. Cette figure met en évidence la décroissance de la composante volumique avec l'augmentation de l'angle d'incidence et pour des directions d'observation rasantes (plus de 50°) pour les données réelles et que permet de gérer notre modèle. La fonction d'erreur pour l'identification par l'algorithme génétique étant orienté sur la correspondance de la composante volumique avec les données Merl, l'adéquation de la composante spéculaire, notamment sur les directions d'incidence rasantes, est moins bonne. L'adéquation physique entre la rugosité de la surface et la rugosité du substrat permet une gestion physique rigoureuse des calculs des réflexions internes multiples, mais rend difficile le processus d'identification puisque le lobe spéculaire et la forme de la réflexion volumique ne peuvent pas être gérés séparément.

4.3 Validation et Résultats

L'ensemble de la chaîne d'acquisition, constituée des différentes étapes présentées dans la section précédente (acquisition HDR, estimation de la géométrie, calcul de la réflectance et filtrage et enfin identification de paramètres), est validée pas à pas avant la construction du système dans notre laboratoire. La première étape est une validation virtuelle à partir de données de réflectance et géométrie connues. Les données de réflectance sont issues d'un modèle mathématique dont les paramètres sont connus. Nous utilisons également des images de synthèse produites avec un modèle géométrique connu, afin de reproduire et valider la configuration du système à douze sources de lumière. Les différents paramètres du système sont déterminés grâce à ces tests : la position des sources de lumière, les paramètres de notre méthode de stéréophotométrie, la fréquence de coupure pour le filtrage des données de réflectance estimées et enfin les paramètres de l'algorithme d'identification. Une fois ces choix validés le système d'acquisition peut être mis en place en laboratoire et la chaîne complète est testée sur des objets réels, créés de manière à valider la méthode avec des matériaux variés.

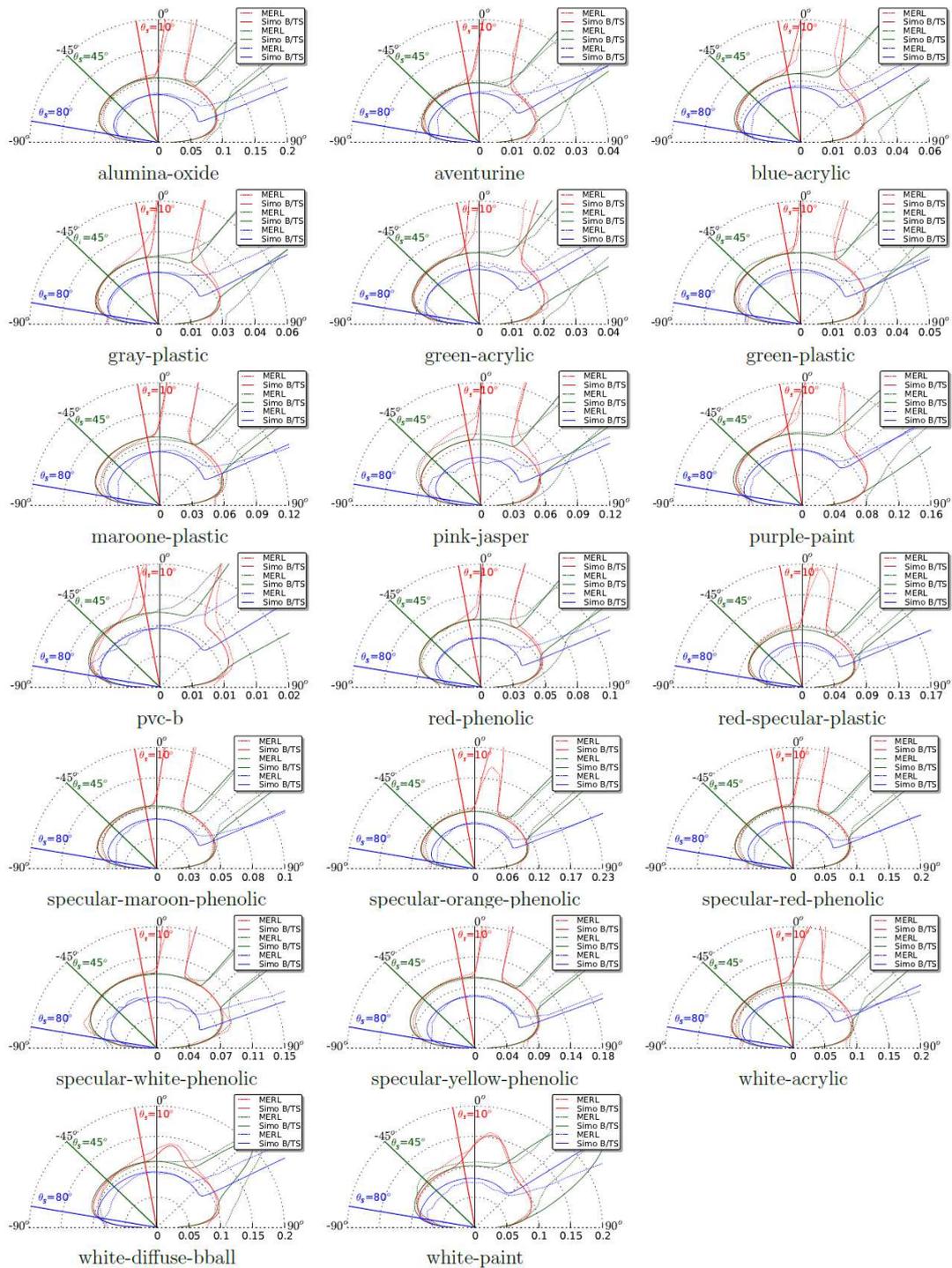


FIGURE 4.20 – Identification des paramètres de notre modèle Lambertien interfacé (distribution de Beckmann et GAF de Torrance et Sparrow) sur différents matériaux issus de la base de données Merl illustrant la décroissance de la composante volumique avec l’augmentation de l’angle d’incidence et pour des directions d’observation rasantes. Ces identifications sont réalisées uniquement sur la composante volumique.

4.3.1 Validation virtuelle du système de reconstruction

Avant de mettre en place le système d’acquisition complet nous avons réalisé une étape de validation virtuelle de notre système. Chaque étape est validée l’une après l’autre. Dans un premier temps, notre méthode de stéréophotométrie est validée pour un système à douze positions de sources de lumière, choisies de façon à améliorer les résultats de reconstruction.

Pour cela des images de synthèses sont produites et reproduisent ces conditions d'acquisition avec un modèle géométrique connu et un modèle de réflectance dont les paramètres sont connus également. Les résultats de la reconstruction peuvent être comparés avec le modèle géométrique utilisé pour la production des images de synthèse, permettant ainsi de vérifier l'efficacité de l'estimation par notre méthode pour cette configuration de position de source. Les valeurs de seuil pour l'élimination des ombres et des points spéculaires sont également validés. Dans un deuxième temps la taille de cellule idéale pour le filtrage est déterminée grâce à des données de tests correspondant à une fonction de réflectance dont les paramètres sont connus. Ainsi l'erreur entre les données en entrée et en sortie du capteur peut être calculée. Cette étape est ensuite reproduite avec les mêmes données auxquelles un bruit est ajouté afin de vérifier l'élimination du bruit par le capteur. L'étape suivante consiste à réaliser l'identification des paramètres de notre modèle de réflectance sur les données issues du test précédent (données de réflectance bruitées, filtrées grâce au capteur). Les paramètres identifiés peuvent ainsi être comparés aux paramètres du modèle en entrée du capteur et l'erreur d'estimation peut être calculée. Enfin la chaîne complète est testée à partir des images de synthèse produites.

Reconstruction géométrique :

Cette première étape de validation consiste à réaliser des images de synthèses reproduisant les conditions d'acquisition du système. Les images sont produites grâce à un processus de simulation d'éclairage basé sur des modèles 3D connus, pour un modèle de BRDF dont les paramètres sont choisis et dans des conditions d'éclairage telles que celles que nous souhaitons mettre en place pour notre système d'acquisition. Les modèles géométriques choisis représentent des formes avec de nombreuses aspérités afin de produire des zones d'ombre et ainsi vérifier l'efficacité d'élimination de ces comportements non Lambertiens par notre algorithme. Nous avons choisi d'appliquer aux objets virtuels des matériaux comportant une composante spéculaire grâce à l'utilisation d'un modèle de Cook et Torrance [CT82] afin de vérifier la robustesse de notre algorithme face aux zones spéculaires se recoupant éventuellement d'une image à l'autre. Enfin les conditions d'éclairage testées consistent en douze sources de lumière décrites dans la section 4.2.1.

La figure 4.21 présente les modèles tridimensionnels utilisés et les images de synthèse de test produites. Elles sont réalisées grâce à une méthode de lancer de rayon. Les conditions d'acquisitions du système sont très simples : une seule source de lumière ponctuelle par acquisition et une seule réflexion lumineuse. Dans ces conditions le lancer de rayon permet de réaliser des images de synthèse respectant les conditions d'acquisition du système que nous avons mis en place par la suite (chapitre 2, section 2.1.2).

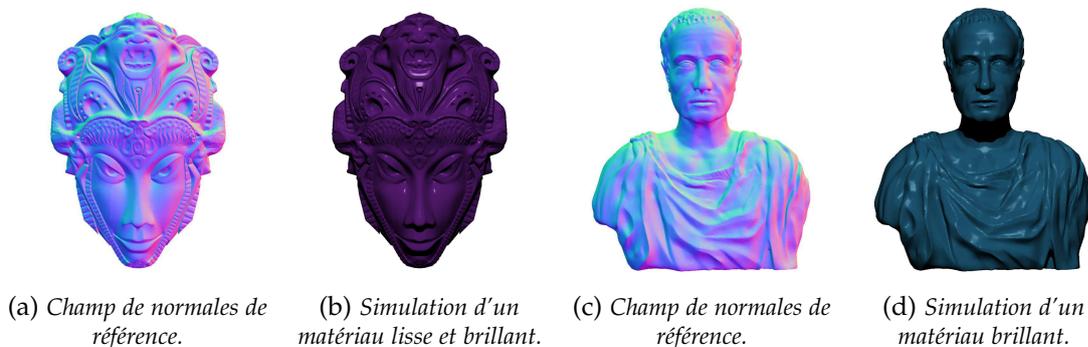


FIGURE 4.21 – Modèle 3D de référence et exemple d'images de référence produites avec un matériau suivant le modèle de Cook-Torrance. Pour le masque nous simulons un matériau spéculaire lisse $n_i = 1.2$ et $\sigma = 0.05$. Pour le buste nous simulons un matériau glossy $n_i = 1.3$ et $\sigma = 0.1$

Afin d'optimiser les résultats de notre algorithme de reconstruction, le choix des conditions d'éclairage est important. Le nombre de sources doit être choisi de manière à augmenter le nombre de valeurs d'éclairage suivant le modèle Lambertien. Cependant nous avons vu que pour des sources de lumière proches, la matrice inverse des sources présentent de fortes valeurs qui amplifient les bruits présents dans les matrices d'éclairage. Les sources doivent donc être positionnées de manière à augmenter le nombre de configurations de matrices de sources favorables à la reconstruction de gradient le plus fort possible tout en évitant des configurations problématiques. Pour cela nous testons une configuration de douze sources de lumières réparties tous les 30° sur ϕ et avec deux configurations différentes pour θ : 15° et 30° . Cette configuration permet de produire des matrices de sources proches en ϕ moins sensibles aux bruits ($\phi_{S_0} = 0^\circ, \theta_{S_0} = 30^\circ$; $\phi_{S_1} = 30^\circ, \theta_{S_1} = 15^\circ$; $\phi_{S_2} = 60^\circ, \phi_{S_2} = 30^\circ$ et ainsi de suite). Cette configuration est illustrée plus en détail dans la section ??.

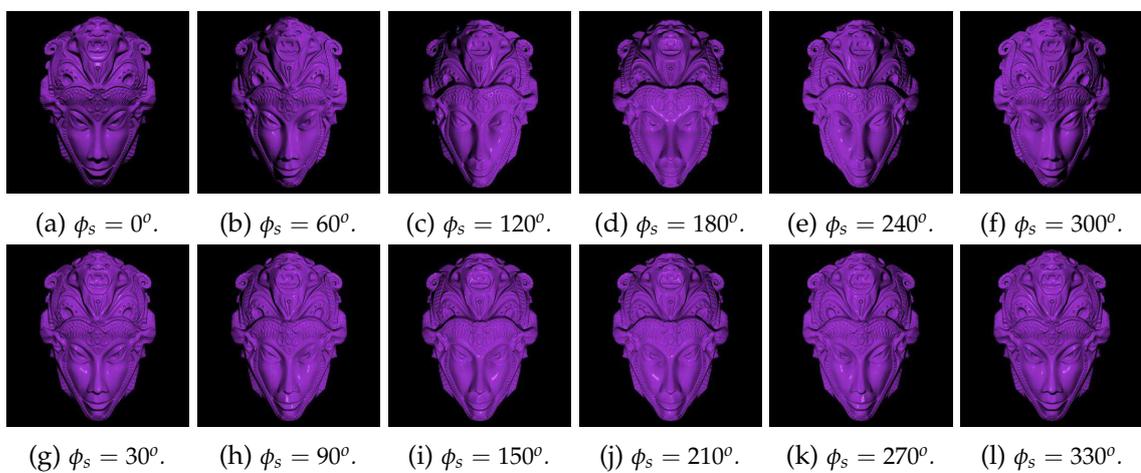


FIGURE 4.22 – Images de synthèse du masque issues de simulation par lancer de rayons visant à reproduire les conditions de notre système d'acquisition. Le modèle de BRDF est un modèle de Cook Torrance avec $n_i = 1.2$ et $\sigma = 0.05$. La première ligne correspond à $\theta_s = \pi/12$, la deuxième ligne à $\theta_s = \pi/6$.

Deux matériaux différents sont choisis pour chaque objet virtuel : le matériau appliqué sur le masque est lisse et spéculaire ($n_i = 1.2$ et $\sigma = 0.05$) tandis que le matériau appliqué sur le buste a un plus fort indice de réfraction mais sa rugosité, également plus forte, lui donne un aspect brillant moins prononcé ($n_i = 1.3$ et $\sigma = 0.1$). Les zones spéculaires pour le buste sont donc plus larges et susceptibles de se recouper. Ces modèles géométriques et les BRDF choisies permettent donc d'obtenir des images pour lesquelles on retrouve à la fois des ombres et des points spéculaires multiples. Les deux objets virtuels permettent ainsi de tester l'efficacité de notre méthode d'élimination hiérarchique dans le cas de surfaces lisses, pour lesquelles les zones de spécularité sont de petite taille, et rugueuses, pour lesquelles les zones de spécularité, plus larges, ont plus de chance de se recouper. La figure 4.22 présente la série d'images de synthèse reproduisant les conditions d'acquisitions de notre système.

Les paramètres de l'algorithme correspondent aux seuils T_{ombre} et $T_{speculaire}$. Pour la reconstruction nous choisissons T_{ombre} légèrement inférieur à $\pi/2$ et $T_{speculaire} \approx 0.25$. Les figures 4.23 et 4.24 présentent une comparaison entre notre méthode de reconstruction et une méthode ne prenant pas en compte les comportements non Lambertiens : les normales sont calculées par la méthode des moindres carrés permettant d'estimer les gradients de surface à partir de toutes les positions de sources de lumière mais sans élimination des ombres et des points spéculaires.

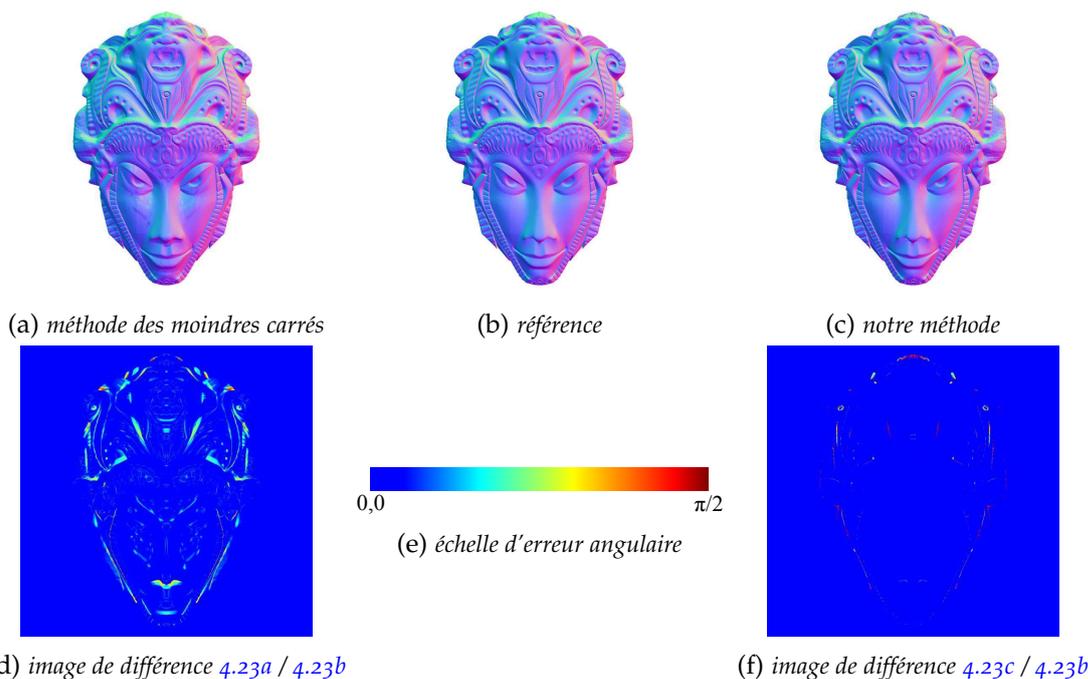


FIGURE 4.23 – Reconstruction à partir des images de synthèse suivant (a) la méthode des moindres carrés, (c) notre méthode. Les images de différences (d) et (f) sont calculées en fonction de l'échelle d'erreur angulaire (e) et représentent la différence entre la reconstruction concernée et la carte des normales de la surface utilisée pour générer les images (b).

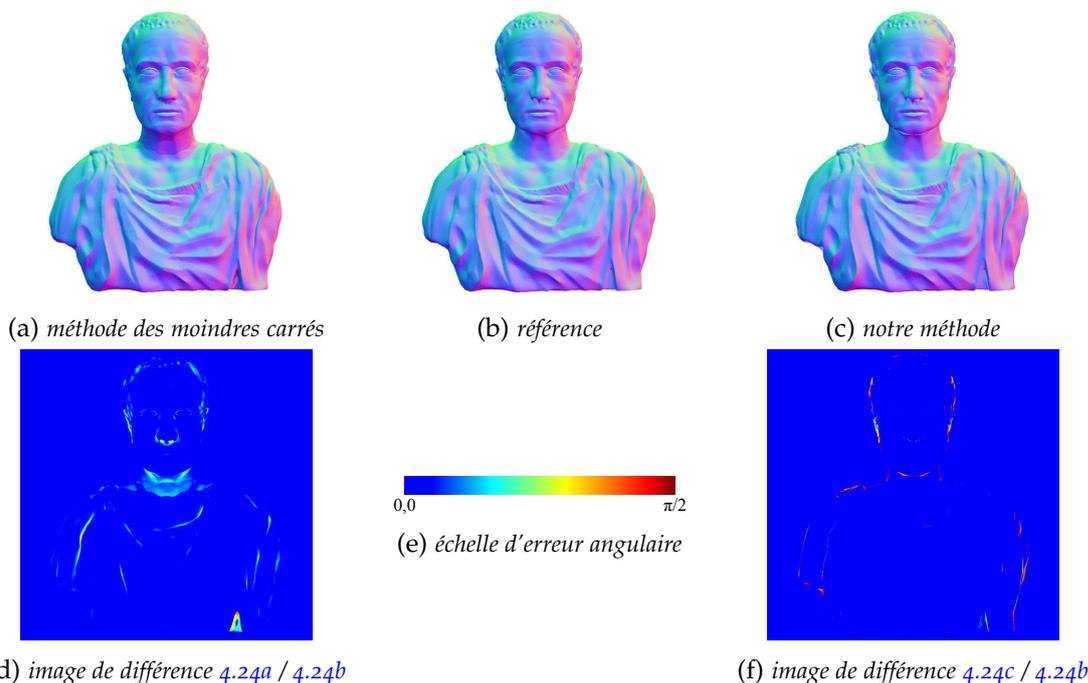


FIGURE 4.24 – Reconstruction à partir des images de synthèse suivant (a) la méthode des moindres carrés, (c) notre méthode. Les images de différences (d) et (f) sont calculées en fonction de l'échelle d'erreur angulaire (e) et représentent la différence entre la reconstruction concernée et la carte des normales de la surface utilisée pour générer les images (b).

Les résultats issus de la méthode des moindres carrés sont présentés en figure 4.23a et 4.24a. Une image de différence entre le modèle géométrique utilisé (figures 4.23b et 4.24b) pour les images de synthèse et ces résultats de reconstruction, présentés sur les figures 4.23d et 4.24d,

mettent en évidence les zones difficiles à estimer. Elles correspondent à des zones de gradients forts (par exemple les bords des objets) ou des zones spéculaires ou encore des ombres. La comparaison de ces résultats avec les résultats de reconstruction de notre méthode, présentés en figure 4.23c et 4.24c, permet de vérifier l'élimination des comportements non Lambertiens par notre algorithme ainsi que le choix des conditions d'éclairage que nous testons. Les différences entre le modèle géométrique et les reconstructions issues de notre méthode sont présentées sur les figures 4.23f et 4.24f. Seules les zones de forts gradients présentent une erreur d'estimation par rapport à la vérité terrain, problème propre aux méthodes de reconstruction par stéréophotométrie.

Filtrage des données de réflectance :

Les données de réflectance estimées à partir d'acquisition et d'un modèle géométrique reconstruit présentent du bruit. Pour cette raison nous proposons d'utiliser la redondance des données pour effectuer un filtrage afin de le supprimer. Cependant cette étape doit permettre le filtrage du bruit haute fréquence dû aux estimations successives de la géométrie puis de la réflectance, tout en conservant la forme de la BRDF estimée. Pour un matériau spéculaire, le problème est alors de filtrer ce bruit sans pour autant supprimer le signal haute fréquence du lobe spéculaire. Le capteur que nous utilisons correspond à un filtre passe-bas dont la puissance dépend de la taille des cellules. Les tests que nous effectuons consistent à rechercher la taille idéale de ces cellules pour supprimer le bruit en conservant la forme de la fonction de réflectance. Les différents résultats présentés par la suite sont ceux obtenus pour le canal bleu, pour lequel les valeurs sont les plus fortes pour les images de test.

L'utilisation du capteur hémisphérique sous-échantillonne les données de réflectance par rapport aux données estimées puisque l'ensemble des points de mesure pour une cellule sont moyennés en une seule valeur. Pour évaluer la taille idéale des cellules du capteur, nous avons comparé les valeurs réelles d'une BRDF (non bruitée), données en entrée du capteur, avec celles obtenues en sortie. La figure 4.25 présente les résultats de cette étude. Nous pouvons observer que lorsqu'il n'y a pas de fortes variations dans la BRDF, par exemple pour un matériau peu spéculaire (rugosité importante ou faible valeur de l'indice de réfraction), une valeur importante de θ_0^a n'augmente pas de manière significative l'erreur moyenne (de 0.06% pour $\theta_0^a = 2^\circ$ et 0.254% pour $\theta_0^a = 6^\circ$). En revanche, pour un matériau plus brillant l'erreur augmente significativement avec la valeur de θ_0^a puisque plus cette valeur est élevée, plus les hautes fréquences sont supprimées. Un lobe spéculaire fin correspondant à une haute fréquence, les valeurs filtrées produisent une sous-estimation du lobe spéculaire et entraînent une erreur plus importante sur cette partie de la fonction de réflectance. De manière générale le niveau de compression des données augmente de façon exponentielle avec l'augmentation de la taille des cellules. Selon la forme de la BRDF filtrée, une trop forte valeur de θ_0^a peut entraîner une erreur importante par rapport au modèle d'origine (figure 4.25e). Afin d'éviter une perte de données sur le lobe spéculaire pour un matériau brillant, une limite de $\theta_0^a = 3^\circ$ est fixée.

Nous testons ensuite l'efficacité du filtrage sur des données bruitées. Ces données sont obtenues par application d'un bruit Gaussien sur un modèle de BRDF de Cook et Torrance. Afin d'avoir un bruit réaliste même sur le lobe spéculaire, la variance de la Gaussienne est choisie dépendante de la valeur de la BRDF (selon un pourcentage de la valeur de réflectance associée). Ces données permettent de vérifier l'élimination d'un bruit haute fréquence par le capteur. Les figures 4.26, 4.27 et 4.28 présentent les résultats de cette étude. L'erreur représentée sur les figures est une erreur moyenne entre les données bruitées puis filtrées par un capteur et les données du modèle de BRDF avec les mêmes paramètres, mais non bruitées.

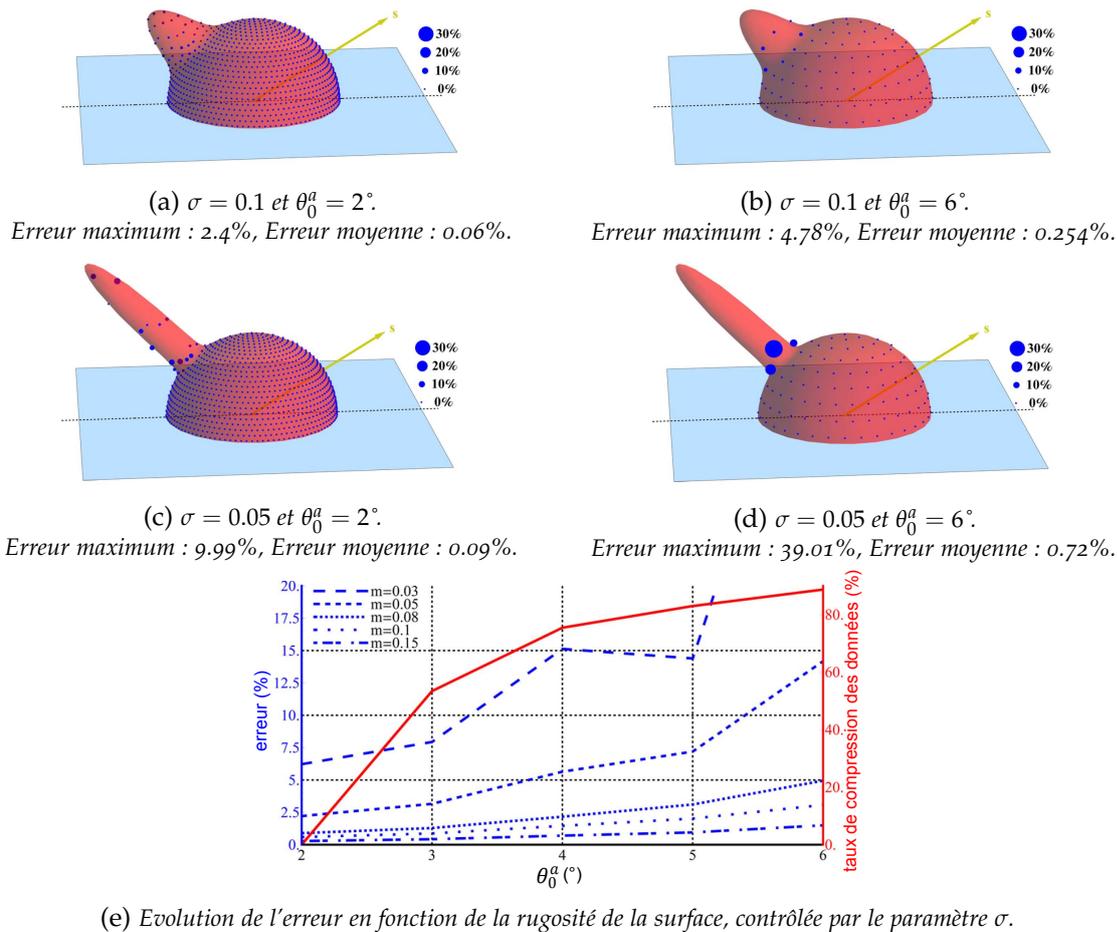


FIGURE 4.25 – Etude du filtrage de BRDF de différentes rugosités en fonction de la taille des cellules du capteur hémisphérique virtuel pour des données d'entrée non bruitées. Le modèle en entrée du capteur est un modèle de Cook-Torrance avec $K_d = 0.5$ et $n_i = 1.3$. a-d) représentation spatiale des échantillons en sortie du filtrage et de l'erreur d'estimation produite pour $\theta_s = 45^\circ$. La taille des points est liée à l'erreur entre l'estimation et la BRDF en entrée du capteur. e) évolution de l'erreur d'estimation pour deux valeurs du paramètre de rugosité σ en fonction de θ_0^a .

La figure 4.26 présente l'exemple d'un matériau spéculaire représenté par le modèle de Cook Torrance avec $K_d = 0.5$ et $n_i = 1.3$ et $\sigma = 0.05$ auquel un bruit de $x\%$ est ajouté (la variance du bruit gaussien est égale à $x\%$ de la valeur de BRDF, ceci pour chaque point). Par exemple pour un bruit de 30% l'erreur issue du filtrage par un capteur à $\theta_0^a = 2^\circ$ est de 1.86% et à $\theta_0^a = 3^\circ$ de 1.48%. Les mêmes études, faites sur un matériau à $\sigma = 0.1$, sont présentées sur la figure 4.27. De manière générale, l'erreur moyenne est plus faible lorsque la taille des cellules du capteur augmente, quelle que soit la nature du matériau étudié. Cependant nous pouvons voir que plus le matériau est brillant, plus le lobe spéculaire est fin et plus le nombre de données disponibles sur le pic spéculaire diminuent lorsque la taille des cellules augmentent.

Enfin les courbes de la figure 4.28 représentent l'évolution de l'erreur sur la composante spéculaire et sur le modèle complet du filtrage par la capteur sur des données bruitées. Les résultats montrent que pour un matériau peu spéculaire, l'erreur sur le lobe spéculaire seul et sur la BRDF total est très proche, contrairement à un matériau très spéculaire où l'erreur sur le lobe spéculaire est plus important et augmente d'autant plus que la taille des cellules est grande. Le capteur permet donc de filtrer les données reçues, éliminant ainsi une partie du bruit et limitant l'erreur moyenne par rapport aux données non filtrées

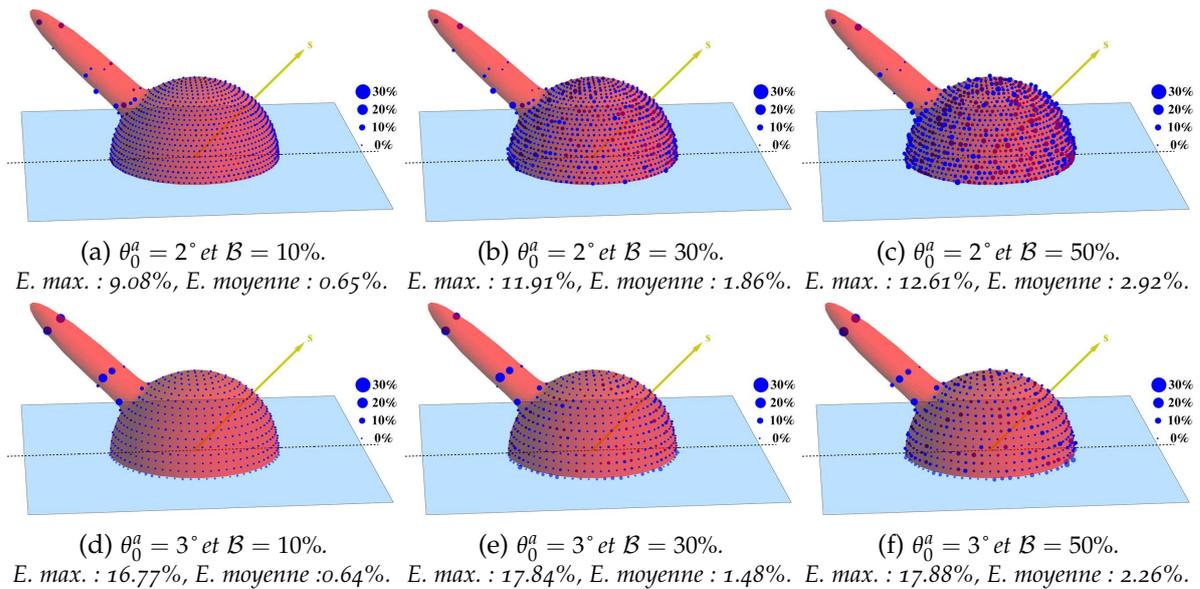


FIGURE 4.26 – Etude du filtrage de BRDFs bruitées en fonction du taux de bruit dans les données d’entrée du capteur et influence de la taille des cellules du capteur hémisphérique virtuel. Le modèle en entrée du capteur est un modèle de Cook-Torrance avec $K_d = 0,5$, $n_i = 1,3$ et $\sigma = 0,05$. Représentation spatiale de l’erreur d’estimation pour une direction d’incidence $\theta_s = 45^\circ$ avec $\sigma = 0,05$ et pour a-c) $\theta_0^a = 2^\circ$, d-f) $\theta_0^a = 3^\circ$.

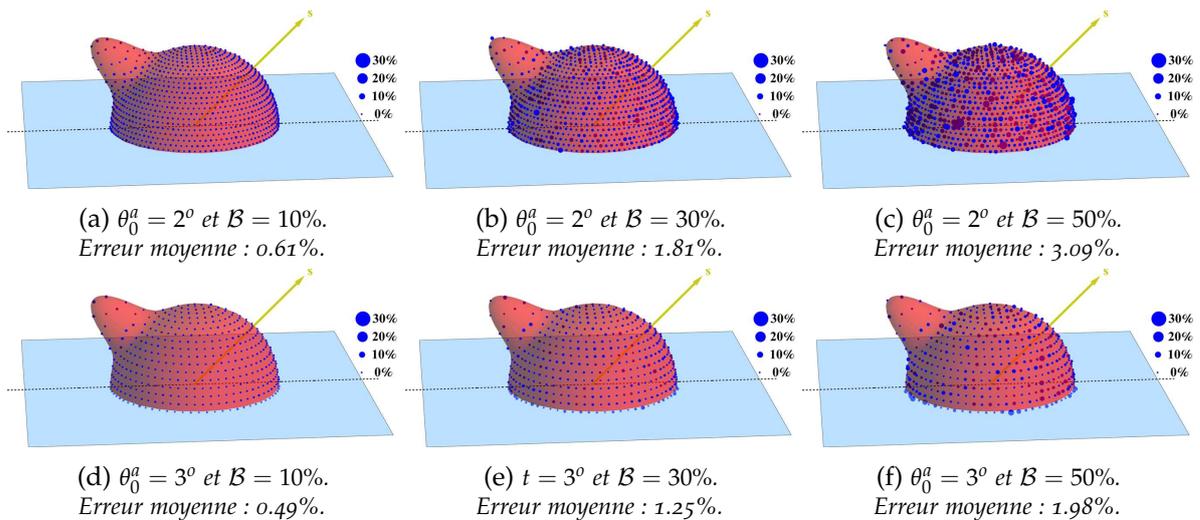


FIGURE 4.27 – Etude du filtrage de BRDFs bruitées en fonction du taux de bruit dans les données d’entrée du capteur et influence de la taille des cellules du capteur hémisphérique virtuel. Le modèle en entrée du capteur est un modèle de Cook-Torrance avec $K_d = 0,5$, $n_i = 1,3$ et $\sigma = 0,1$. Représentation spatiale de l’erreur d’estimation pour une direction d’incidence $\theta_s = 45^\circ$ avec $\sigma = 0,05$ et pour a-c) $\theta_0^a = 2^\circ$, d-f) $\theta_0^a = 3^\circ$.

et non bruitées. Plus la taille des cellules du capteur est grande, plus l’erreur moyenne diminue. A défaut de connaissances sur le matériau et afin de supprimer le bruit dû à la mesure tout en conservant les informations importantes des données de réflectance estimées, notamment l’information au niveau du lobe spéculaire, un capteur à $\theta_0^a = 3^\circ$ est préconisé.

Identification des paramètres d’un modèle mathématique de réflectance :

Les données de réflectance estimées par notre système puis filtrées ne permettent pas de retrouver la fonction de réflectance complète d’un matériau. Nous proposons donc d’identifier les paramètres d’un modèle mathématique pour compléter ces données manquantes. Afin d’évaluer l’efficacité de notre méthodologie d’identification des paramètres sur les données

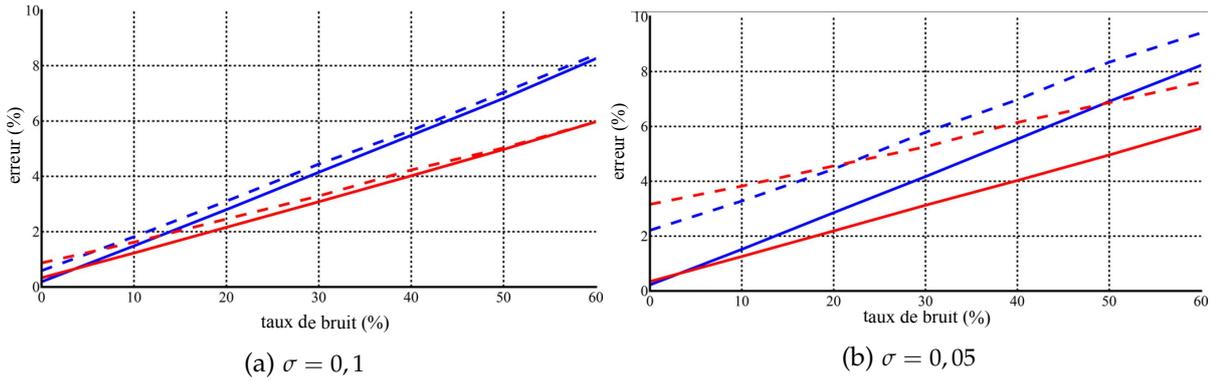


FIGURE 4.28 – Evolution de l'erreur moyenne entre les données bruitées puis filtrées par un capteur et les données du modèle de BRDF avec les mêmes paramètres (modèle de Cook-Torrance avec $K_d = 0,5$, $n_i = 1,3$ et $\sigma = 0,1$ à gauche, $\sigma = 0,05$ à droite). L'erreur est représentée en fonction du niveau du bruit (trait pointillé : erreur pour le lobe spéculaire seul, trait plein : erreur pour toute la BRDF) et pour deux tailles de cellules ($\theta_0^a = 2^\circ$ en bleu et $\theta_0^a = 3^\circ$ en rouge).

de réflectance filtrées par le capteur, nous avons réalisé une étape d'identification à partir des données issues des tests précédents pour la validation de l'étape de filtrage par le capteur (figure 4.25 : données non bruitées filtrées et figures 4.26 et 4.27 : données bruitées puis filtrées). L'identification est réalisée sur chaque canal R, V et B afin de vérifier que les paramètres σ et n_i soient identiques pour chacun d'eux. Les paramètres du modèle de réflectance en entrée du capteur sont connus et peuvent donc être comparés aux résultats que nous obtenons.

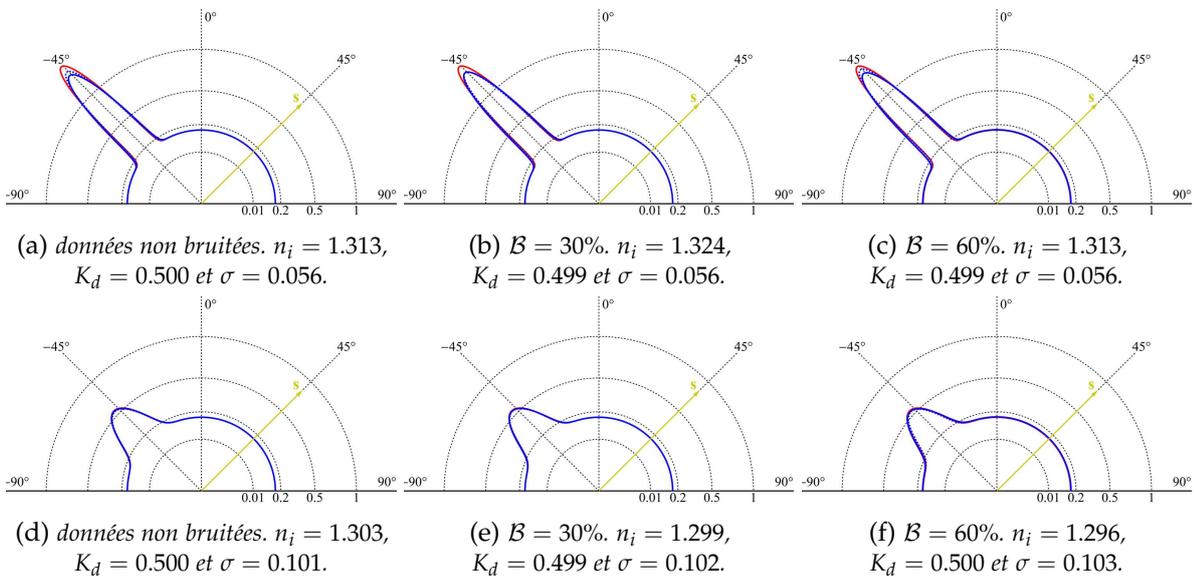


FIGURE 4.29 – Filtrage puis identification des paramètres du modèle de Cook-Torrance sur des données non bruitées et bruitées sur le canal bleu. Le modèle utilisé pour générer les données est un modèle de Cook-Torrance (trait rouge) dont les paramètres sont : $K_d = 0,5$, $n_i = 1,3$ et a-c) $\sigma = 0,05$, d-f) $\sigma = 0,1$. Le résultat de l'identification sur les données filtrées (en bleu) pour $\theta_0^a = 2^\circ$ sont présentée en trait plein et pour $\theta_0^a = 3^\circ$ en trait pointillé. Les valeurs des paramètres du modèle présenté sont celles issues d'un filtrage pour $\theta_0^a = 3^\circ$.

Les différents tests réalisés afin de déterminer les paramètres idéaux pour le filtrage des données de BRDF ont permis de choisir une fréquence de coupure idéale définie par $\theta_0^a = 3^\circ$. Celle-ci permet d'éliminer les hautes fréquences dues au bruit tout en conservant de façon acceptable les hautes fréquences du lobe spéculaire présentes lorsqu'un matériau est brillant. Le filtrage sur les données de BRDF générées grâce au modèle de Cook-Torrance présentées

dans la figure 4.29 est réalisé pour $\theta_0^a = 2^\circ$ (courbe bleue en trait plein) et $\theta_0^a = 3^\circ$ (courbe bleue en trait pointillé). Lorsque le bruit (bruit blanc Gaussien) dans les données augmente, une fréquence de coupure pour $\theta_0^a = 3^\circ$ permet de conserver une forme de la BRDF. Les différences au niveau du lobe spéculaire pour $\sigma = 0.05$ s'explique par le filtrage des données mais les paramètres identifiés correspondent à une erreur généralement inférieure à 5%, même pour un bruit de 60%. Quel que soit le canal utilisé, les paramètres σ et n_i identifiés sont les mêmes, seule la valeur de K_d change.

Validation du système de reconstruction complet :

Les tests réalisés sur chacune des étapes de la chaîne de traitement nous ont permis de définir les paramètres idéaux pour une reconstruction efficace. La chaîne complète est donc maintenant utilisée sur des images de synthèse reproduisant les conditions d'acquisition du système. Ces images correspondent à celles produites pour la validation de notre méthode de stéréophotométrie (figure 4.21).

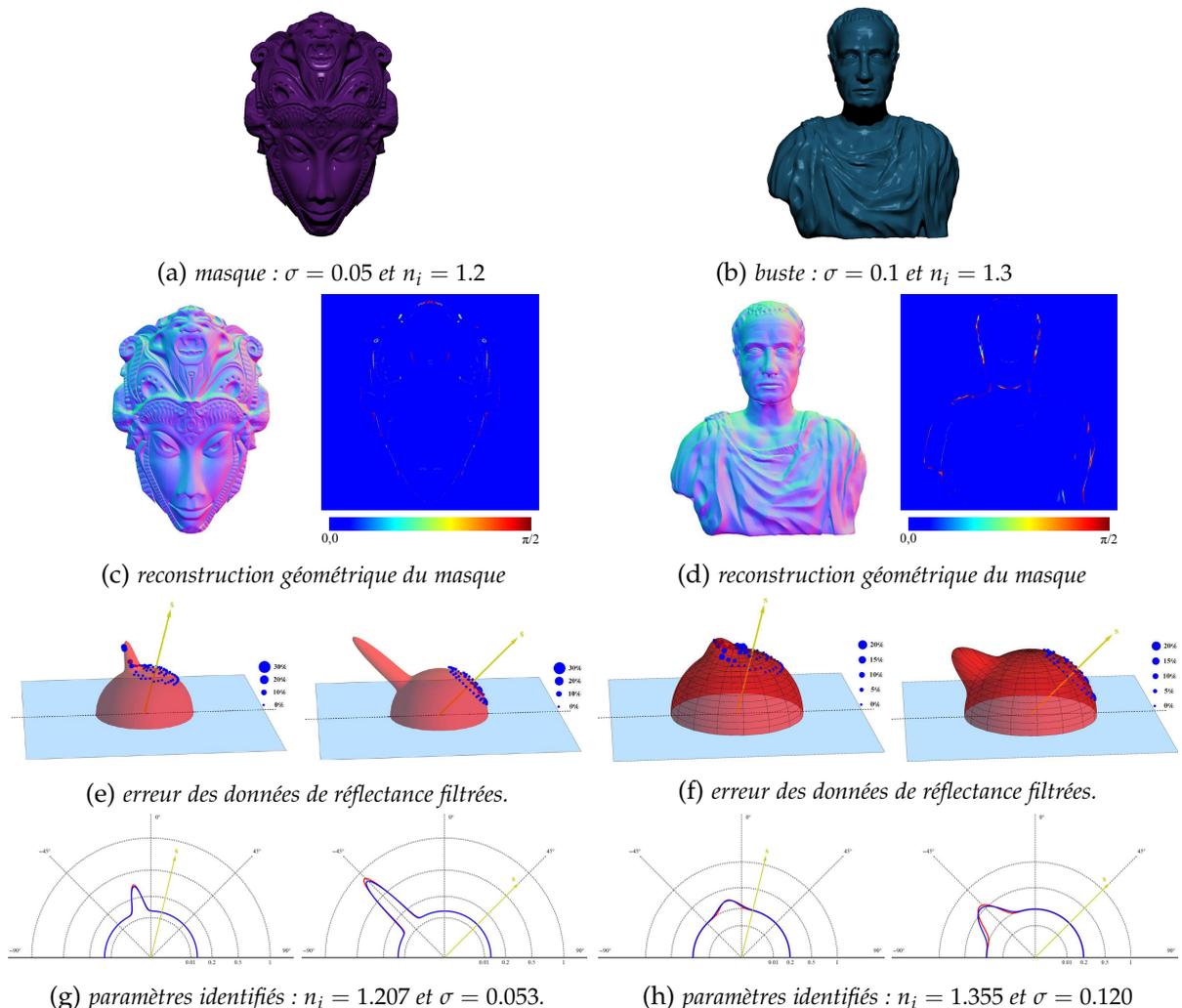


FIGURE 4.30 – Résultats obtenus pour la reconstruction, l'estimation et le filtrage des données de réflectance, et l'identification de paramètres pour les objets virtuels buste et masque. a-b) L'une des images issues de simulation. c-d) Estimation de la géométrie et carte d'erreur par rapport à la vérité terrain. e-f) Différence entre le modèle de référence et la réflectance calculée et filtrée par le capteur, représentation pour $\theta_s = 15^\circ$ à gauche et $\theta_s = 45^\circ$ à droite. g-h) Courbes du modèle issu de l'identification de paramètres sur les données de réflectance calculées (en bleu) comparées à la vérité terrain (en rouge) pour $\theta_s = 15^\circ$ à gauche et $\theta_s = 45^\circ$ à droite.

La figure 4.30 rappelle les modèles géométriques ainsi que les paramètres du modèle de réflectance utilisés pour la génération des images de synthèses de référence. Les données de réflectance sont estimées à partir des images de synthèse ainsi que des données tridimensionnelles estimées. Elles sont filtrées grâce à un capteur à $\theta_0^a = 3^\circ$. Les paramètres du modèle de réflectance utilisés pour la génération des images étant connus, nous pouvons ainsi estimer l'erreur des résultats filtrés. Sur les figures 4.30e et 4.30f, nous observons différents cercles sur lesquels sont concentrés les données de réflectance. Ceux-ci proviennent chacun des deux configurations en θ_s des sources de lumière. En effet, l'estimation de la réflectance à partir d'une image fournit des données $\hat{f}(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ pour lesquelles \mathbf{s} et \mathbf{o} sont les mêmes en tout point de la surface et \mathbf{n} est la normale de surface estimée. Lors de la projection des données sur le capteur, chaque triplet $(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ subit une rotation de manière avoir $\phi_s = 0$ pour chaque mesure. Les estimations $\hat{f}(\mathbf{s}, \mathbf{o}, \mathbf{n})$ pour une image dépendent alors d'une direction d'incidence de lumière (telle que $\phi_s = 0$), une normale orientée en $[0, 0, Z]$ et plusieurs directions d'observation. L'angle θ entre \mathbf{s} et \mathbf{o} est identique pour toutes les données issues d'une image puisqu'elles résultent de la rotation des systèmes pour lesquels \mathbf{s} et \mathbf{o} sont identiques. Enfin les figures 4.30g et 4.30h présentent les résultats d'identification obtenus sur les deux objets virtuels. L'identification des paramètres sur les données filtrées permet de retrouver les valeurs d'origine utilisées pour la création des objets virtuels avec une erreur variant de 0.6% à 20% (principalement due aux manques de données aux angles rasants). L'erreur dans l'estimation des données du lobe spéculaire pour le matériau lisse et brillant du masque ne gêne pas l'identification de paramètre car la forme du lobe spéculaire est conservée. Cependant pour un matériau dont la BRDF présente un lobe spéculaire plus large, l'identification est plus difficile. Ce problème provient des données manquantes sur les angles rasants, difficiles à obtenir au moyen d'un système d'acquisition de la réflectance.

4.3.2 Application à des objets réels

Mise en place du système d'acquisition :

La validation virtuelle de notre chaîne d'acquisition a permis de confirmer l'efficacité de notre algorithme de stéréophotométrie ainsi que de l'estimation des données de réflectance, leur filtrage et l'identification des paramètres d'un modèle mathématique sur les données acquises. Les différents paramètres étant fixés, nous avons mis en place ce système expérimental au laboratoire pour la configuration de sources de lumière testée lors de cette validation virtuelle (figure 4.31). Afin de pouvoir fixer l'APN et les sources de lumière, une structure métallique a été installée. Afin de simplifier les calculs, ce système doit permettre de répondre aux conditions suivantes :

1. chaque acquisition doit être réalisée avec une seule source de lumière ponctuelle ;
2. les directions d'incidence de lumière doivent être parallèles pour chaque point de la surface d'étude ;
3. le système de projection doit pouvoir être considéré orthographique ;
4. les intensités des sources doivent être identiques.

Pour répondre à la première condition, un rideau totalement opaque est placé de manière à bloquer tout éclairage extérieur et éviter les réflexions multiples à l'intérieur de cette enceinte. Pour cette même raison, chaque élément installé à l'intérieur de l'enceinte ne doit pas réfléchir la lumière des sources lors des acquisitions. Les sources sont placées suffisamment loin de l'objet d'étude (plus d'un mètre) afin de pouvoir considérer une direction d'incidence identiques pour chaque point de surface (condition 2) : les sources sont placées à environ

1.5 mètres des objets dont la taille est d'environ 10cm. Enfin l'APN est un Nikon D300 fixé sur un bras métallique, pour permettre de modifier sa position en hauteur. Nous utilisons un objectif Nikkor macro 200mm f 4/D (focale longue) afin de pouvoir considérer que le système de projection est orthographique (condition 3). Enfin l'étape de calibration du système a également été réalisée afin de répondre à la condition 4 : une mire spectralon est utilisée pour évaluer le rapport d'intensité des sources et ainsi corriger les variations éventuelles.

Afin d'offrir un compromis intéressant en terme de temps d'acquisition tout en limitant les bruits dans les images, nous fixons la sensibilité de l'APN à ISO = 400. Le bruit est également diminué grâce à l'utilisation d'acquisitions à haute gamme de dynamique (HDR) dont le processus d'acquisition est détaillé dans cette section. Enfin nous utilisons les données brutes au format RAW et la compression des données ou tout autre traitement sur les images est désactivé afin de conserver des données d'éclairement arrivant sur le capteur sans modification. La surface d'acquisition pour la configuration adoptée est de 14.27cm par 9.47cm, de résolution 4288 par 2848 pixels (la correspondance pixel/surface réelle est donc de $33.37\mu\text{m}$ par $33.37\mu\text{m}$).

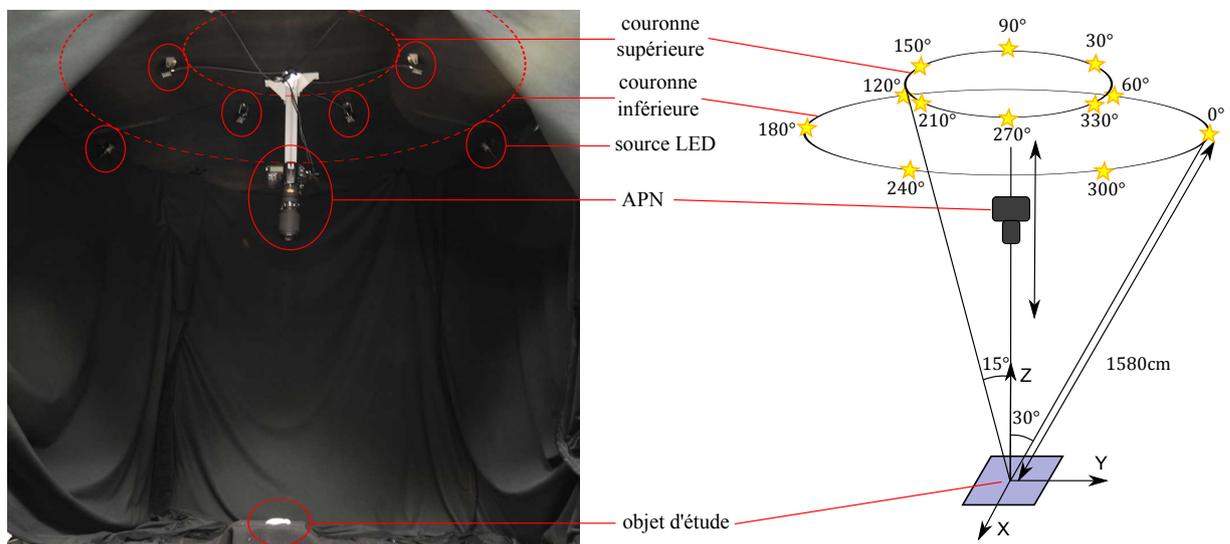


FIGURE 4.31 – Système d'acquisition mis en place dans notre laboratoire. Les sources utilisées sont des LED disposées tel qu'indiqué sur le schéma de droite. L'échantillon est placé au centre de la chambre noire permettant d'éviter toute source de lumière extérieure.

La figure 4.31 présente une photographie ainsi que le schéma correspondant du système installé dans la chambre noire. Les positions des sources ont été choisies afin d'offrir un maximum de valeur suivant le modèle Lambertien pour chaque point de l'objet et ont été validées dans la section précédente. L'angle ϕ est échantillonné tous les 30° mais les sources sont disposées sur deux valeurs de θ différentes : pour $\theta_s = 15^\circ$ on retrouve les sources dont $\phi_s = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ$ et 330° et pour $\theta_s = 30^\circ$ les sources dont $\phi_s = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$ et 300° . Cette disposition permet de minimiser les matrices inverses de trois sources de lumière présentant de fortes valeurs. C'est le cas des configurations telles que $\phi_{s_1} = 0^\circ, \phi_{s_2} = 30^\circ$ et $\phi_{s_3} = 60^\circ$ pour un même angle θ_s , le choix de deux angles θ_s différents permet de rendre ces configurations plus robustes aux bruits. Enfin dans l'optique de réduire le bruit des acquisitions et d'augmenter la dynamique des images utilisées pour la reconstruction, nous réalisons des acquisitions à haute gamme dynamique (HDR). L'utilité de ces images en reconstruction a été démontré précédemment [Bon13] et prend tout son sens dans l'élaboration d'un système d'estimation de la réflectance. En effet les données de réflectance sont estimées à partir des valeurs d'éclairement acquises pour la reconstruction. L'élaboration d'une méthode de fusion

des images LDR en image HDR n'étant pas le sujet de cette thèse, nous utilisons pour cette étude la méthode proposée dans l'article [BBK15]. Elle permet l'augmentation de la dynamique des images tout en réduisant le bruit des acquisitions. Les acquisitions LDR sont réalisées pour chaque position de source pour différents temps d'exposition : $t = [15, 10, 2, 1, \frac{1}{5}, \frac{1}{15}, \frac{1}{30}]$ (temps exprimé en secondes).

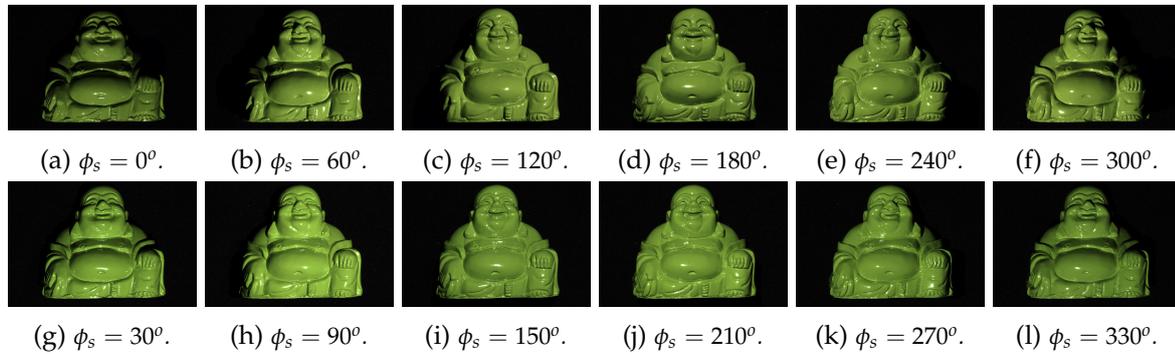


FIGURE 4.32 – Acquisition d'une statuette de Bouddha par notre système d'acquisition. La première ligne correspond à la première couronne pour laquelle $\theta_s = 15^\circ$, la deuxième ligne à la deuxième couronne pour laquelle $\theta_s = 30^\circ$.

Un exemple des images HDR issues de la fusion des images LDR pour chaque source est présenté sur la figure 4.32. La durée nécessaire à l'acquisition de l'ensemble des images LDR pour une position de source de lumière est de 27.3 secondes, soit 327.6 secondes pour l'ensemble des 12 images.

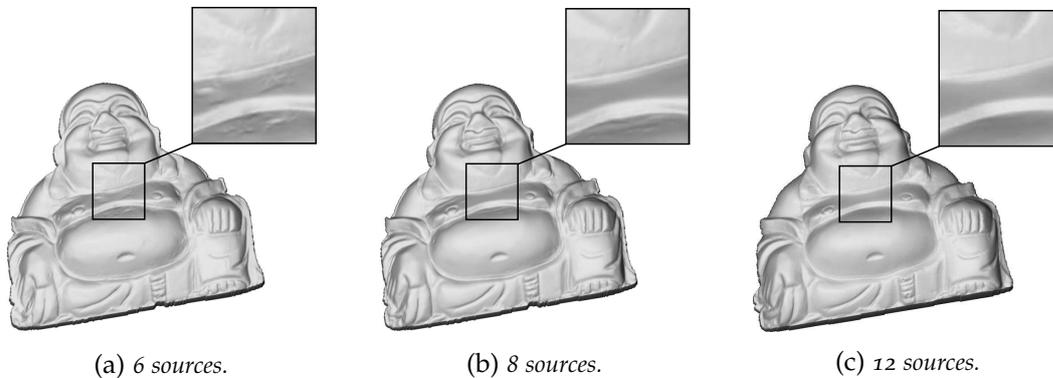


FIGURE 4.33 – Résultats des reconstructions estimées par notre méthode pour une configuration de 6, 8 ou 12 sources de lumière.

A la suite des acquisitions, la recherche des normales à la surface est effectuée au moyen de notre méthode de reconstruction par stéréophotométrie. La figure 4.33 présente les résultats de cette reconstruction pour six et huit et douze sources de lumière. Pour seulement six sources, le résultat est fortement dégradé par rapport au résultat pour douze sources. En effet pour cette configuration le nombre de matrices d'éclairage non influencées par un comportement non Lambertien devient trop faible pour les zones d'ombre ou les zones spéculaires dont l'estimation de normale devient alors incorrecte. Le résultat pour huit sources s'approche d'avantage mais échoue encore, notamment aux bords et là où les zones de spéculaires se recoupent. A partir de douze sources de lumière et avec la configuration choisie sur deux angles θ différents, les directions d'incidence sont suffisamment variées pour permettre d'éclairer chaque pixel plusieurs fois et ainsi obtenir au moins une matrice d'éclairage non

influencée par un comportement non Lambertien et dont le résultat est donc correct. Nous avons observé que pour plus de douze sources, pour lequel le temps d'acquisition est bien sûr plus important, l'apport en termes de qualité de reconstruction est négligeable. Le rapport entre qualité de l'estimation et temps d'acquisition est alors moins intéressant.

Tests sur des objets réels :

Afin d'effectuer des tests complets sur différents types de matériaux, nous avons créé des objets de forme et de taille variées. Pour cela, nous avons produit des moules de silicone à partir de trois objets réels : une balle de golf, une statuette de bouddha et une figurine de petite taille. Ceux-ci ont été choisis afin de disposer d'objets de tailles différentes et dont la géométrie est riche. Les différents moules ainsi produits nous ont permis de réaliser des reproductions de ces objets en plâtre de moulage au grain très fin. Quatre exemplaires de chaque objet ont ainsi été produits et pour chacune des trois formes, l'un des exemplaires est conservé en plâtre et les trois autres se voient appliquer des peintures produisant un aspect différent : mat, satiné et brillant (figure 4.34).

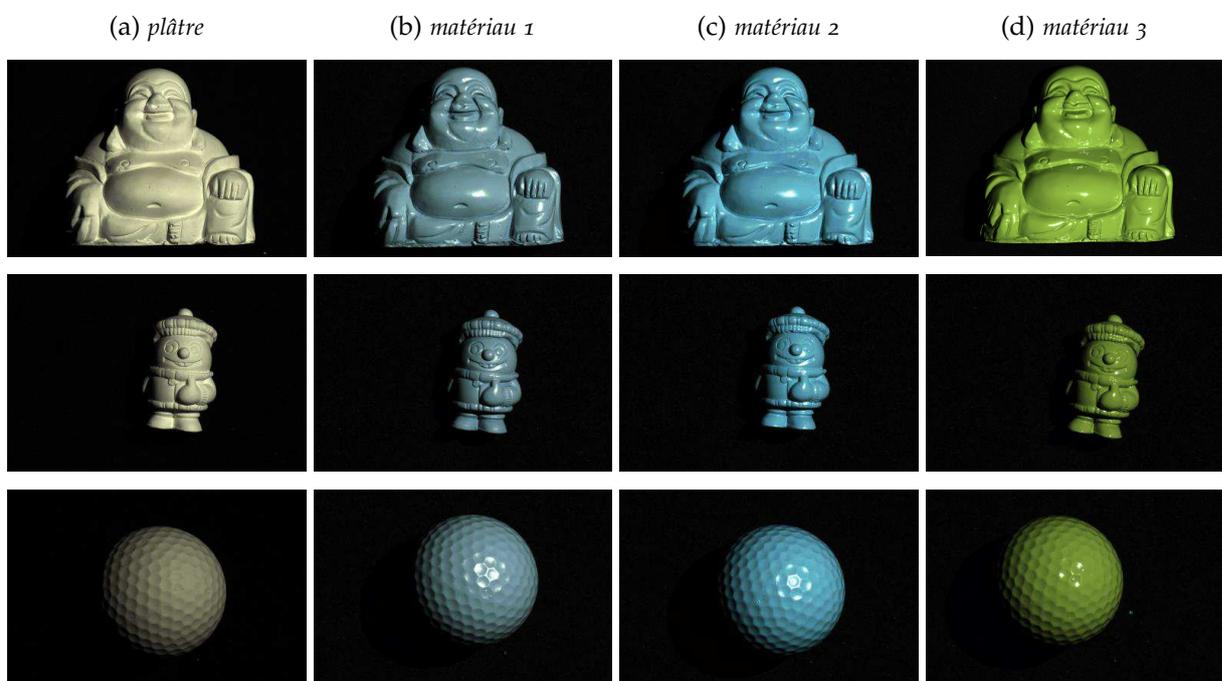


FIGURE 4.34 – Objets d'étude obtenus par moulage sur des objets réels. La colonne a) correspond aux exemplaires en plâtre, les colonnes b), c) et d) sont respectivement des matériaux mat, satiné et brillant. Chaque image représente une surface réelle de 142.7mm par 94.7mm.

Les acquisitions HDR sont réalisées grâce à des acquisitions LDR pour lesquelles le temps d'exposition est différent et fusionnées au moyen de la méthode présentée dans l'article [BBK15]. La géométrie et la réflectance sont estimées à partir de ces acquisitions HDR. Dans l'idéal la même reconstruction tridimensionnelle doit être obtenue pour chaque objet de même forme, quel que soit le matériau dont il est constitué. La figure 4.35 représente ces résultats de reconstruction pour chacun des objets. La géométrie estimée pour chaque forme est effectivement identique. Seules quelques normales ne peuvent pas être estimées pour les objets dont le matériau est brillant. Ceci est dû aux zones spéculaires et d'ombre qui se recoupent et pour lesquelles toutes les valeurs d'éclairement sont supprimées. Ces points restent cependant peu nombreux puisque les positions des sources de lumière sont choisies de

manière à diminuer ces cas de figure.

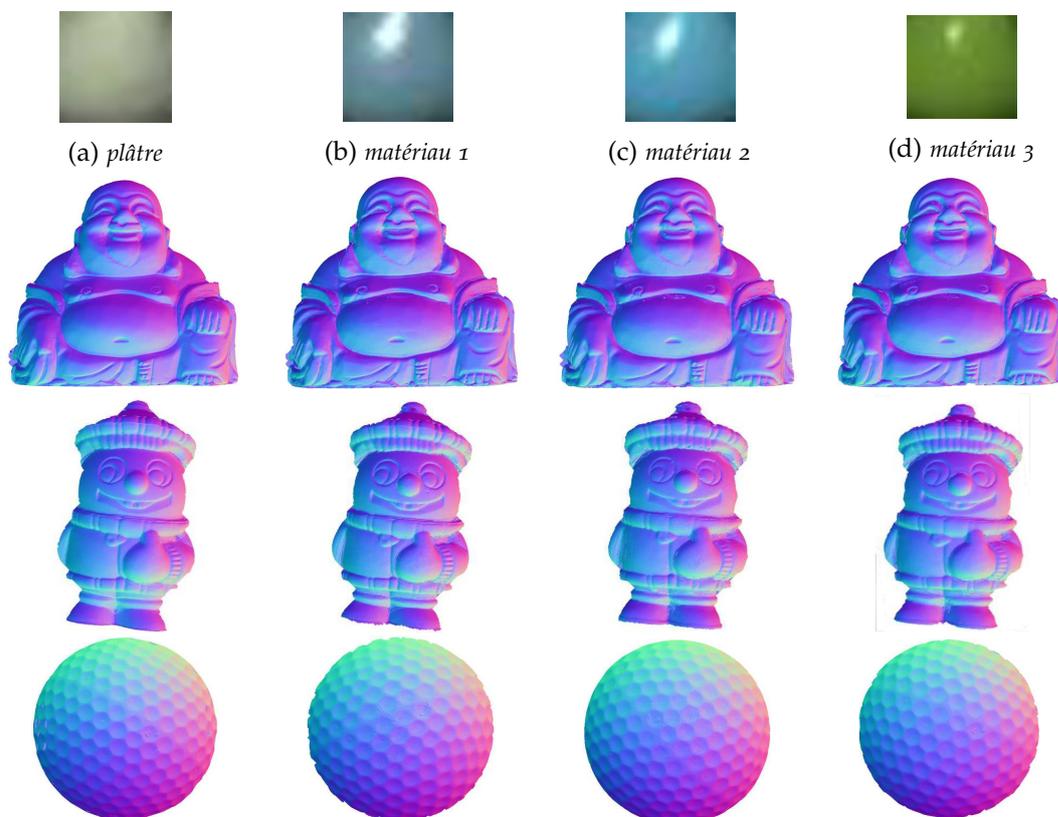


FIGURE 4.35 – Calcul de la géométrie des trois objets de 4 matériaux différents étudiés grâce à notre système d’acquisition.

La seconde étape de notre algorithme utilise les données des images HDR et les données géométriques estimées afin de retrouver les données de réflectance. Elles sont ensuite filtrées afin de supprimer les bruits dus aux estimations tout en conservant la forme générale de la BRDF. Ces données sont représentées sur la figure 4.36 pour une direction d’incidence de lumière telle que $\theta_s = 15^\circ$ et $\phi_s = 0^\circ$, afin de pouvoir observer le lobe spéculaire pour les matériaux brillants. Les acquisitions HDR permettent de reconstruire toute la dynamique du lobe spéculaire pour les matériaux 1, 2 et 3. Le matériau 3 est cependant moins échantillonné sur le lobe spéculaire puisque celui-ci est très fin. Le temps nécessaire pour calculer les gradients de la surface puis l’intégration numérique pour obtenir une information 3D et enfin le calcul des données de la BRDF nécessite en moyenne 48 secondes de temps de calcul.

La figure 4.37 présente les données de réflectance (canal vert uniquement) de la balle de golf pour $\theta_s = 45^\circ$ et $\phi_s = 0^\circ$. Ces courbes permettent d’observer la composante diffuse des différents matériaux. L’amplitude des courbes est différente pour chaque matériau puisqu’elle dépend de son coefficient de diffusion. Pour une direction d’incidence de lumière d’angle zénithal $\theta_s = 45^\circ$, nous observons pour les matériaux 1, 2 et 3 une baisse de la réflectance lorsque la direction d’observation devient rasante par rapport à un matériau purement Lambertien.

La dernière étape de l’algorithme consiste à réaliser l’identification des paramètres de notre modèle de BRDF sur les données de réflectance mesurées. Lors de l’exécution de l’algorithme,

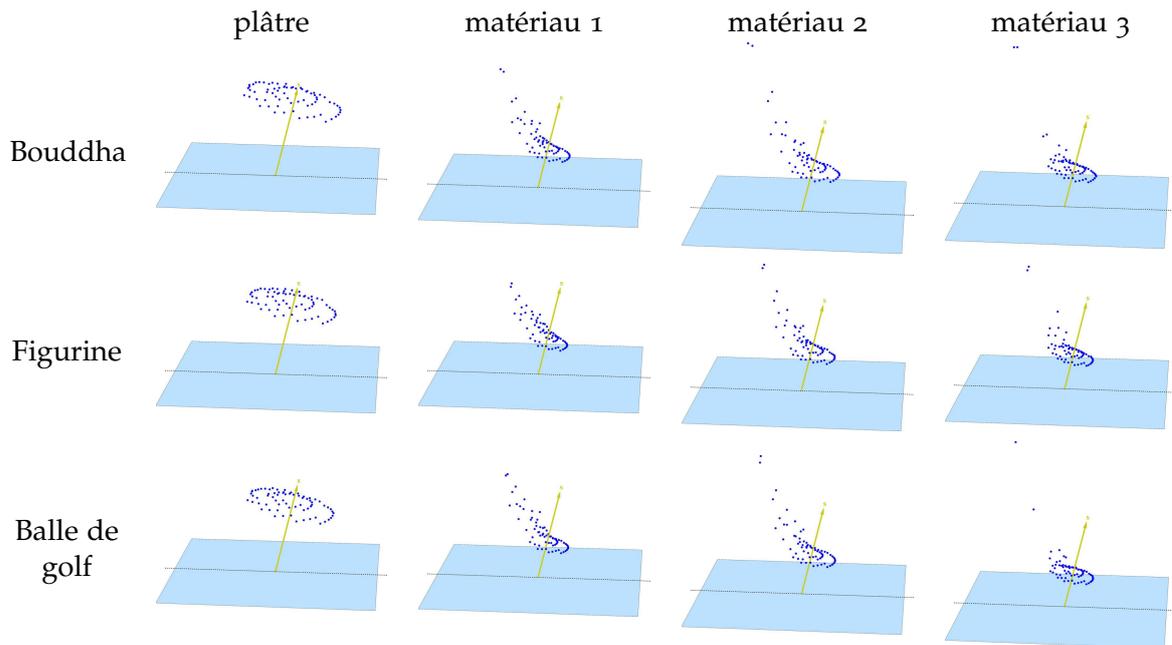


FIGURE 4.36 – Calcul et filtrage de la réflectance des trois objets de 4 matériaux différents étudiés grâce à notre système d’acquisition. Les données de réflectance affichées correspondent aux directions d’observation disponibles pour $\theta_s = 15^\circ$ et $\phi_s = 0^\circ$ et au canal vert du système RGB. L’échelle est adaptée pour chaque matériau afin d’observer au mieux les variations sur les courbes.

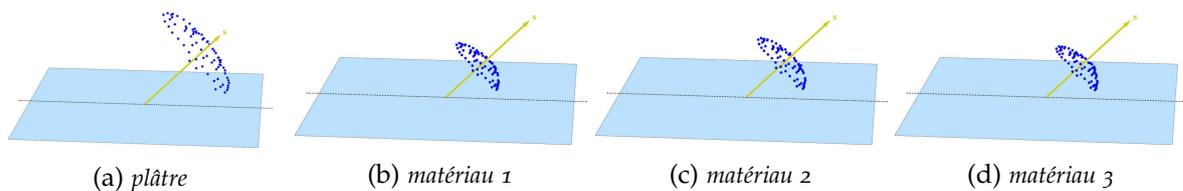


FIGURE 4.37 – Données de réflectance filtrées pour la balle de golf et pour $\theta_s = 45^\circ$ et $\phi_s = 0^\circ$ et au canal vert du système RGB. L’échelle est adaptée pour chaque matériau afin d’observer au mieux les variations sur les courbes.

nous avons pu voir que les résultats convergent en quelques secondes vers une solution. Pour un matériau donné, quel que soit l’objet sur lequel il est présent, les résultats d’identification sont identiques, nous ne présentons donc que les résultats de ces identifications sur les données de réflectance acquises pour la balle de golf (figure 4.38). Le modèle LI permet de suivre la décroissance de la composante diffuse lorsque les directions d’observation deviennent rasantes (phénomène observé sur les courbes des matériau 1, 2 et 3 de la figure 4.37) et les lobes spéculaires des différents matériaux sont très proches des données estimées. Les paramètres identifiés permettent de déduire des informations sur les différents matériaux.

- Le plâtre (cas particulier pour lequel nous connaissons la composition) qui semble à l’observation être diffus, présente un indice de réfraction $n_i = 1$ ce qui correspond à un matériau Lambertien et confirme l’observation à l’œil nu. Sa rugosité est très faible et influence peu la diffusion de la lumière.
- Le matériau 1, d’aspect relativement mat, présente un indice de réfraction assez fort ($n_i = 1.3$) mais également une forte rugosité ($\sigma = 0.1$). Le lobe spéculaire est donc très étalé et peu important.
- Le matériau 2, plus satiné présente un indice de réfraction sensiblement identique ($n_i = 1.28$) mais la rugosité est plus faible ($\sigma = 0.08$). Le lobe spéculaire est alors plus fin et plus important.
- Le matériau 3, très brillant présente un indice de réfraction également proche des

matériaux 1 et 2 ($n_i = 1.26$) et une surface presque lisse ($\sigma = 0.05$). Le lobe spéculaire est alors très important et assez fin.

Les différentes peintures appliquées aux objets leur donne une rugosité différente mais n'influence pas l'indice de réfraction qui est quasiment identique pour les matériaux 1, 2 et 3.

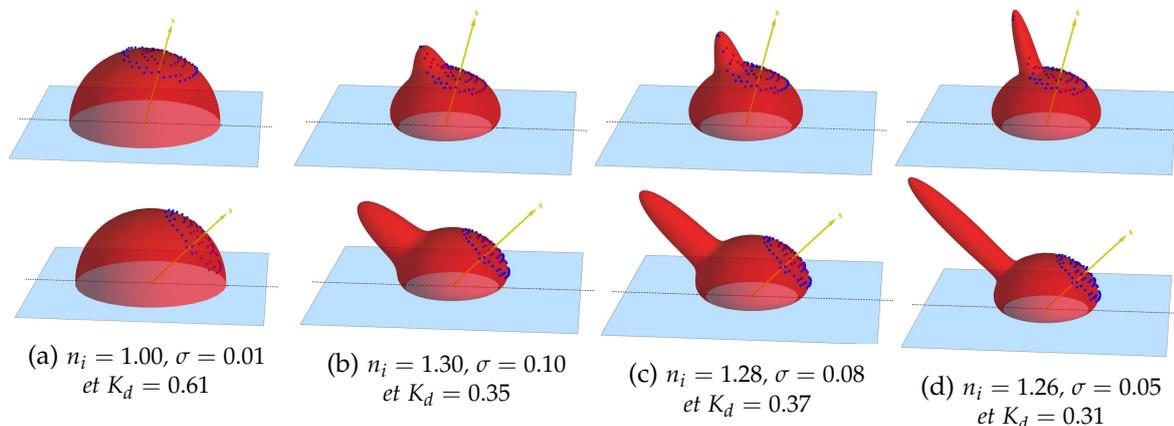


FIGURE 4.38 – Représentation 3D du modèle LI en rouge avec les paramètres identifiés pour chaque matériau avec $\theta_s = 15^\circ$ en haut et $\theta_s = 45^\circ$ en bas. Les données de réflectance correspondantes (points bleus) sont superposées aux courbes.

Les acquisitions à l'aide de notre système permettent d'estimer la réflectance des surfaces grâce à une reconstruction préalable de la géométrie de la surface au moyen d'un seul et même système. Les paramètres à fixer pour les acquisitions (les valeurs seuils pour les détections des zones d'ombre et de spécularité et la taille des cellules du capteur hémisphérique pour le filtrage) ayant été validés grâce aux tests, la seule action à réaliser de la part de l'utilisateur est le placement correct de l'objet au centre du système. L'étape finale d'identification des paramètres de notre modèle LI sur les données de réflectance estimées permet de compléter les données acquises et de déterminer les paramètres du matériau : sa rugosité, son indice de réfraction et sa couleur. Le temps total pour analyser une surface (acquisition HDR, reconstruction de la surface, estimation de la réflectance et identification des paramètres du modèle) est actuellement de 408.6 secondes sans aucune parallélisation des calculs. Nous sommes alors en mesure de déduire de façon automatique et dans des temps raisonnables des informations sur les paramètres de la surface des objets étudiés au moyen d'un système simple et peu coûteux.

Conclusion du chapitre

La mise en place d'un système complet d'estimation de la forme et de la réflectance d'objets de façon rapide tout en restant précise n'est pas un problème trivial. En effet les systèmes d'estimation précis sont souvent dédiés à un aspect particulier (la forme ou la réflectance) et proposent des temps d'acquisition relativement élevés (jusqu'à plusieurs jours pour des fonctions de réflectance complètes par exemple). Certains systèmes permettent de produire des données de réflectance à partir de photographies, mais au prix de temps de calcul importants. Nous nous sommes orientés sur la proposition d'un système d'étude d'objets opaques permettant l'estimation de la fonction de BRDF avec des temps de calcul acceptables pour des acquisitions à répétition (par exemple sur un grand nombre d'objets les temps

d'acquisition doivent être de l'ordre de quelques minutes).

Afin de permettre la mise en place d'un outil de faible coût et pour lequel les manipulations sont réduites, ainsi que pour réduire les étapes de mise en correspondance nécessaires lors de l'utilisation de plusieurs systèmes, nous proposons un seul et même système d'acquisition à la fois de la forme et de la réflectance. Cette dernière contrainte impose une méthode de reconstruction par image pouvant s'intégrer à un système d'acquisition de BRDF. Nous avons choisi pour cela d'utiliser une méthode de stéréophotométrie, qui a l'avantage de retrouver directement des informations d'orientation de la surface et qui ne nécessite pas de recalage des données géométrique et de réflectance contrairement à la plupart des méthodes d'estimation de forme. Le processus consiste à inverser le modèle Lambertien pour retrouver l'orientation de la surface en chaque point. Quel que soit le type de surface opaque, qu'elle soit diffuse ou brillante, une partie de la réflexion appelée composante diffuse est proche du modèle Lambertien. Cette hypothèse de surface Lambertienne demande cependant la gestion des ombres, phénomène non pris en compte par le modèle de BRDF, ainsi que la gestion des comportements spéculaires pour les matériaux brillants. Différentes solutions ont été proposées dans la littérature pour améliorer la méthode originale. Cependant elles sont souvent délaissées pour leur manque de précisions et/ou leur temps de calcul important. Nous avons donc proposé une solution logicielle et matérielle permettant à la fois une bonne précision et des temps de calcul intéressants (environ 6 minutes pour une reconstruction complète incluant géométrie et réflectance). En effet la calibration précise de notre système, composé de douze sources de lumière et un appareil photographique, permet une grande répétitivité des estimations et notre méthode de stéréophotométrie effectue une élimination hiérarchique des comportements non Lambertiens, offrant une précision de reconstruction très proche de la réalité terrain.

A partir de cette estimation, des acquisitions HDR préalablement réalisées et des informations du système calibré très précisément, nous retrouvons des échantillons de BRDF pour les objets étudiés. La configuration du système est telle que la BRDF estimée est incomplète, notamment aux angles rasants, et les estimations successives de la forme et de la réflectance entraînent inévitablement la présence de bruit dans ces échantillons. Ainsi nous utilisons la redondance des données afin de filtrer le signal et nous proposons également d'identifier les paramètres d'un modèle de réflectance afin de compléter les données manquantes. Nous avons choisi d'utiliser des modèles basés physique pour leur adéquation avec les données mesurées. Ainsi nous avons choisi d'utiliser pour cette étape le modèle de Cook et Torrance, très répandu dans la littérature, ainsi que notre modèle Lambertien interfacé qui permet de gérer différents comportements non pris en compte par le modèle de Cook et Torrance tel que la rétrodiffusion de la lumière. La méthode d'identification que nous utilisons est inspirée des algorithmes génétiques et permet une convergence rapide et sans valeur de départ grâce à la création de population de test, ce qui évite l'observation des courbes obtenus pour déduire des valeurs plausibles, alors que c'est un point souvent important pour les méthodes de descente de gradient. Ainsi le modèle de Cook Torrance utilisé pour l'identification avec cette méthode permet une bonne adéquation avec les données issues de matériaux pour lesquels la composante diffuse suit le modèle Lambertien. Elle est également pratique pour l'identification du fait de l'indépendance entre la composante diffuse et la composante spéculaire. Notre modèle Lambertien interfacé permet quant à lui une meilleure adéquation à différents types de profil de réflectance, incluant notamment des comportements observés sur des données réelles : rétrodiffusion de la lumière, décroissance de la luminance aux incidences rasantes et dépendance des composantes diffuses et spéculaires. Ce dernier aspect pose cependant des problèmes pour l'identification de paramètres car il rend difficile la

convergence de l'algorithme. Une réflexion sur le processus d'identification afin de contourner le problème posé par la dépendance de la composante diffuse et spéculaire serait donc intéressante dans le cadre de l'utilisation de notre modèle Lambertien interfacé pour cette étape.

Une méthodologie de validation du système a été mise en place afin de s'assurer de la qualité des résultats. Ces tests ont consisté en la création d'images de synthèse à partir d'un modèle géométrique et de réflectance connus et leur utilisation pour la validation des différentes étapes clés de la suite logicielle : estimation de la forme à partir des images et comparaison avec le modèle connu afin de valider notre méthode de stéréophotométrie ; estimation et filtrage des données de réflectance des objets afin de vérifier la conservation des informations importantes tout en réduisant le bruit présent ; identification des paramètres du modèle de réflectance et comparaison avec les paramètres initialement utilisés pour la création des images de synthèse. Ces différents tests étant concluants, le système d'acquisition a été mis en place et la chaîne complète a finalement été testée pour différents objets de tests créés pour cette étude. Le système que nous proposons est donc relativement simple et de coût réduit (douze sources de lumière et un appareil photographique) mais permet une bonne précision d'estimation grâce à une calibration préalable et précise du système. Une acquisition complète (forme et réflectance des objets) est réalisée en 6 minutes et offre ainsi une reconstruction de l'ensemble de la surface des objets pour un point de vue donné ainsi qu'une représentation de l'apparence de ceux-ci. Ces informations de forme et de réflectance peuvent permettre de recréer des images, pour différentes vues, des objets, tout en étant limité à la représentation d'une face de l'objet.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail de thèse concerne l'étude de l'apparence d'objets de surfaces opaques à partir de photographies. Les objets visés par l'étude à moyen terme sont essentiellement des fossiles (dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire IC2MP), dont la manipulation doit être réduite. Pour cela, nous proposons un système d'acquisition avec l'objectif de simplifier les configurations matérielles, les coûts financiers et les temps de traitement. L'objectif est de reconstruire des informations de surface aussi précises que possible, de manière à estimer dans un second temps des échantillons de réflectance. Nous nous sommes également intéressés aux modèles mathématiques permettant de représenter des surfaces opaques de manière physiquement plausible. Nous souhaitons déduire des caractéristiques de surface (telle que la couleur, rugosité) et de produire des images de synthèse réalistes.

Le premier chapitre de cette thèse rappelle les travaux existants dans le domaine de la reconstruction géométrique et l'estimation de la réflectance. Il met également en place les grandeurs physiques et les fonctions permettant de décrire l'interaction de la lumière avec une surface. Cette interaction peut être décrite pour une direction d'incidence de lumière, dans une direction d'observation donnée, grâce à la fonction de BRDF. De nombreux modèles mathématiques ont été présentés dans la littérature pour simuler la réflexion des surfaces afin de permettre la réalisation d'images de synthèse. Le souci croissant de représentation réaliste et physiquement plausible conduit les recherches vers des modèles de plus en plus précis ; l'émergence des modèles à base de microfacettes découle de ces préoccupations : ils décrivent une surface comme une distribution statistique de microfacettes. Malheureusement, la prise en compte des réflexions multiples de la lumière à l'intérieur du matériau et à la surface (entre les microfacettes) reste un problème difficile. La complexité de ce phénomène explique la simplification, pour la majorité des modèles de la littérature, à une composante diffuse purement Lambertienne. Seuls les modèles multicouches décrivent de façon physique ce comportement. L. Simonot propose une formulation analytique grâce à la description d'une surface composée d'une interface surmontant un substrat Lambertien. Nous proposons de compléter ce modèle pour en proposer une mise en œuvre pratique dans le chapitre 3.

Les données de réflectance acquises, permettant de vérifier l'adéquation des modèles mathématique aux matériaux réels, peuvent être obtenues grâce à des systèmes d'acquisition à partir d'images. Une étude bibliographique de ces systèmes est présentée en chapitre 2. Trois grandes familles de systèmes sont distinguées : les gonio-réfectomètres et gonio-photomètres, les systèmes d'acquisition de réflectance à base de miroirs et enfin les systèmes d'acquisition de réflectance utilisant un ensemble de capteurs et/ou de sources. Parmi ces systèmes, la première famille permet une estimation très précise d'échantillons de réflectance pour des surfaces planes, mais les déplacements des sources, des capteurs ou des échantillons entraînent des temps important pour l'acquisition de chaque échantillon. Les deux autres familles permettent de réduire ces temps d'acquisition en collectant un nombre plus important de points de mesure grâce à l'utilisation de miroirs ou d'un ensemble de sources ou de capteurs de position différentes. Les erreurs produites par les défauts inévitablement présents sur les miroirs font des systèmes utilisant plusieurs sources ou plusieurs capteurs le meilleur compromis temps

d'acquisition/qualité d'estimation.

Lorsque les objets ont une forme arbitraire, une étape de reconstruction tridimensionnelle préalable doit également être réalisée afin de permettre l'estimation des angles zénithaux et azimutaux des directions d'indice et d'observation, paramètres de la fonction de réflectance. Nous présentons les méthodes de reconstruction à partir d'images dans le dernier chapitre. Le choix de ce type de système permet l'élaboration d'un seul et même système pour la reconstruction tridimensionnelle et l'estimation de réflectance. C'est le cas des méthodes de reconstruction par triangulation active les méthodes dites multi-vues et des méthodes de stéréophotométrie. Parmi ces trois familles de méthodes, seule la stéréophotométrie ne demande pas de recalage entre la géométrie et des données de réflectance puisque le point de vue est fixe. Les distorsions entre différents points de vue produisent des erreurs dans cette étape de recalage et donc dans l'estimation de la réflectance. Il est donc préférable de l'éviter. Une étude des méthodes de stéréophotométrie est proposée dans le dernier chapitre et résume leur principe : l'équation de formation des images peut être réduite à une équation simple lorsqu'une seule source de lumière éclaire un objet et grâce à des conditions d'acquisitions contrôlées (positions d'observation de la source de lumière connues) et le choix d'un modèle de réflectance, le système peut être inversé afin de retrouver les informations de normale à la surface. Deux principales familles de méthodes ont été présentées dans la littérature : (i) les méthodes basées sur l'inversion du modèle de réflectance afin d'estimer la normale à la surface et (ii) les méthodes utilisant l'identification des paramètres d'un modèle de réflectance plus complexe (tel que le modèle de Torrance et Sparrow) ainsi que de la normale grâce à une méthode itérative. L'inversion du modèle Lambertien est réalisable grâce à l'utilisation de trois images issues d'un point de vue fixe et dans des conditions d'éclairage différentes mais connues. Malheureusement, l'inversion d'un modèle de réflectance plus complexe nécessite l'utilisation d'un plus grand nombre d'images et un processus itératif pour l'estimation de la normale à la surface. Les calculs sont alors plus longs et limités à un type de matériau particulier. Nous mettons également en évidence les problèmes des méthodes utilisant l'inversion du modèle Lambertien, notamment sur les zones de spécularité ou d'ombre dans les images. Plusieurs auteurs montrent comment améliorer les résultats grâce à l'utilisation de plus de trois images ainsi qu'une méthode efficace d'élimination de ces points problématiques. Nos travaux portent sur ce type d'approche.

Contributions

Les conclusions résultant de l'étude des modèles de réflectance nous ont tout d'abord conduit à proposer un nouveau modèle à base de microfacettes Lambertiennes interfacées. L'objectif est de décrire le comportement de la lumière en interaction avec une surface opaque rugueuse surmontée d'une interface brillante. Contrairement aux autres modèles à base de microfacettes de la littérature, il permet la description de l'interaction entre la lumière et l'interface, puis la réflexion hors du matériau après plusieurs réflexions internes. La description mathématique de cette composante volumique est possible grâce à la description d'un fond Lambertien surmonté d'une interface fine. L'interaction de la lumière avec l'interface dépend de son indice de réfraction. La composante spéculaire est alors décrite par la portion de lumière réfléchi directement par l'interface et la composante volumique est décrite par la portion de lumière transmise par l'interface, interagissant avec le fond Lambertien puis retransmise par l'interface. Ces deux composantes sont alors naturellement liées par l'indice de réfraction de la surface. Le modèle utilise trois paramètres physiques : la couleur de la surface, sa rugosité ainsi que l'indice de réfraction de l'interface. Il généralise et étend les principaux modèles de la littérature : une surface parfaitement diffuse, parfaitement spéculaire,

rugueuse diffuse et rugueuse spéculaire ; elle représente également des phénomènes lumineux tels que la rétrodiffusion de la lumière, l'anisotropie et l'inter-réflexion entre microfacettes. Nous avons proposé une méthode d'implémentation pour ce type de modèle, complexe à calculer du fait d'intégrales multiples dans les calculs, ainsi qu'une formulation approchée permettant l'identification de paramètres sur des données de réflectance estimées. L'utilisation de ce modèle physiquement plausible pour l'identification de paramètres sur des données acquises, montre que certains aspects de la réflectance sont mieux représentés par notre modèle.

De notre étude bibliographique découle la proposition d'un système d'acquisition à base d'images combinant une reconstruction par stéréophotométrie et une estimation de la réflectance à partir des images initialement acquises. Ce système utilise un unique point de vue fixe et différentes position de sources de lumière pour l'acquisition d'images HDR permettant les estimations successives de la géométrie et de la réflectance d'objets. Cette solution permet de répondre à différentes contraintes :

- la configuration du système permet une reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie puis une estimation de la réflectance sans recalage des données géométriques avec les images initiales grâce au point de vue unique,
- aucun mouvement des éléments du système ni de l'objet ne sont nécessaires d'où une acquisition plus rapide que les systèmes pour lesquels des déplacements de matériel sont utilisés,
- la réduction des manipulations des objets d'étude,
- la limitation des coûts de mise en place.

Par rapport aux méthodes de la littérature, notre solution de reconstruction par méthode de stéréophotométrie permet de reconstruire de nombreuses surfaces opaques grâce à une sélection du nombre et des positions de sources permettant une élimination efficace des zones d'ombre et de spécularité. Contrairement aux méthodes utilisant un modèle de réflectance quelconque, l'estimation de la normale ne se fait pas par itérations successives, et permet par conséquent d'offrir des temps de calcul réduits. L'exécution de cet algorithme dépend uniquement de deux paramètres dont les valeurs idéales ont été déterminées grâce à des simulations. Enfin une dernière étape d'identification des paramètres du modèle Lambertien interfacé sur les données acquises par notre système, permet de compléter ces données mais également de déduire des caractéristiques des surfaces étudiées.

Les différentes étapes du système que nous proposons, muni de douze sources de lumière positionnées sur deux cercles concentriques, ont été validées pas à pas grâce à des simulations reproduisant les conditions d'acquisition. Ces simulations ont préalablement servi à la recherche et la validation des positions des sources de lumière ainsi que des paramètres pour l'élimination des zones d'ombre et de spécularité. Enfin l'élaboration d'objets constitués de différents matériaux ont permis de tester le système d'acquisition complet sur des objets réels.

Perspectives

Notre modèle de réflectance permet de représenter une large gamme de matériaux opaques et gère des phénomènes lumineux non pris en compte par la plupart des modèles de réflectance de la littérature. Cependant son utilisation pour l'identification des paramètres est plus complexe que les modèles considérant une composante diffuse Lambertienne et une distribution de microfacettes spéculaires à cause de la dépendance entre la composante volumique et la composante spéculaire de notre modèle. Cette dépendance est due au fait que

la rugosité de l'interface est la même que celle du substrat Lambertien.

Par ailleurs, notre formulation approchée et notre méthode de simulation des inter-réflexion sont aujourd'hui élaborées pour une représentation de surface constituée de cavités en V. Certains travaux de la littérature mettent l'accent sur l'aspect non physiquement correct de ce type de représentation et lui préfèrent une description de microfacettes indépendantes. Nous aimerions généraliser notre formulation approchée pour prendre cela en compte.

Les perspectives directes de ce travail concernent également l'amélioration du système afin de permettre l'étude de surfaces composées de plusieurs réflectances. Pour cela un plus grand nombre de points de mesure sont nécessaires, par exemple en augmentant le nombre de sources lumineuses, notamment avec des directions d'incidence plus rasantes. La surface doit alors également être subdivisée suivant plusieurs régions correspondant à des zones de réflectance distincte.

L'objectif étant de proposer une classification automatique des fossiles en fonction de leur réflectance, un grand nombre d'acquisitions avec différents spécimens de chacune des familles connues permettrait une étude statistique sur les paramètres identifiés par notre système. Une représentation virtuelle et numérique pouvant être archivée serait également disponible pour ces spécimens, dont la valeur historique est très importante.

BIBLIOGRAPHIE

- [ABC⁺10] Abderrazak El Albani, Stefan Bengtson, Donald E. Canfield, Andrey Bekker, Roberto Macchiarelli, Arnaud Mazurier, Emma U. Hammarlund, Philippe Boulvais, Jean-Jacques Dupuy, Claude Fontaine, Franz T. Fürsich, François Gauthier-Lafaye, Philippe Janvier, Emmanuelle Javaux, Frantz Ossa Ossa, Anne-Catherine Pierson-Wickmann, Armelle Riboulleau, Paul Sardini, Daniel Vachard, Martin Whitehouse, and Alain Meunier. Large colonial organisms with coordinated growth in oxygenated environments 2.1Gyr ago. *Nature*, 466 :100–104, July 2010. (Cité page 1.)
- [ABP08] Vasileios Argyriou, Svetlana Barsky, and Maria Petrou. Generalisation of photometric stereo technique to q-illuminants. In *In Proceedings of 19 th British Machine Vision Conference*, 2008. (Cité pages 75 et 77.)
- [AG15] Jens Ackermann and Michael Goesele. A survey of photometric stereo techniques. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 9(3-4) :149–254, November 2015. (Cité page 76.)
- [APSo0] Michael Ashikmin, Simon Premože, and Peter Shirley. A microfacet-based brdf generator. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '00*, pages 65–74, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (Cité pages 34, 36, 39, 40, 41 et 42.)
- [AZK08] Neil Alldrin, Todd Zickler, and David Kriegman. Photometric stereo with non-parametric and spatially-varying reflectance. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–8, June 2008. (Cité page 77.)
- [BB12] Benoit Beckers and Pierre Beckers. A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells. *Computational Geometry*, 45(7) :275 – 283, 2012. (Cité page 88.)
- [BBK12] Benjamin Bringier, Alexandre Bony, and Majdi Khoudeir. Specularity and shadow detection for the multisource photometric reconstruction of a textured surface. *Journal of the Optical Society of America A*, 29(1) :11–21, January 2012. (Cité pages 4 et 75.)
- [BBK13] Alexandre Bony, Benjamin Bringier, and Majdi Khoudeir. Accurate image quantization adapted to multisource photometric reconstruction for rough textured surface analysis. *Journal of the Optical Society of America A*, 30(3) :518–526, February 2013. (Cité pages 4 et 22.)
- [BBK15] Benjamin Bringier, Alexandre Bony, and Majdi Khoudeir. Evidence theory for high dynamic range reconstruction with linear digital cameras. *Computer Vision and Image Understanding*, 133 :90 – 101, 2015. (Cité pages 22, 86, 104 et 105.)
- [BCJ⁺13] Bastien Billiot, Frédéric Cointault, Ludovic Journaux, Jean-Claude Simon, and Pierre Gouton. 3d image acquisition system based on shape from focus technique. *Sensors*, 4(13) :5040–5053, 12 2013. (Cité page 72.)
- [BHK08] Benjamin Bringier, David Helbert, and Majdi Khoudeir. Photometric reconstruction of a dynamic textured surface from just one color image acquisition. *Journal of the Optical Society of America A*, 25(3) :566–574, March 2008. (Cité page 4.)

- [Bla04] Francois Blais. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1) :231–243, 2004. (Cité pages 69, 70 et 72.)
- [Bli77] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *ACM SIGGRAPH*, pages 192–198, New York, NY, USA, 1977. ACM. (Cité pages 25, 26, 35 et 39.)
- [BLPW14] Adam Brady, Jason Lawrence, Pieter Peers, and Westley Weimer. genbrdf : Discovering new analytic brdbs with genetic programming. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4) :114 :1–114 :11, July 2014. (Cité page 90.)
- [Bon13] Alexandre Bony. *Modélisation de l'interaction lumière/matière pour l'analyse de surfaces rugueuses texturés par stéréo photométrie*. PhD thesis, 2013. Thèse de doctorat Traitement du signal et des images Poitiers 2013. (Cité page 103.)
- [BP03] Svetlana Barsky and Maria Petrou. The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(10) :1239–1252, oct 2003. (Cité pages 75 et 77.)
- [BS63] P. Beckmann and A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *Journal of Graphics Tools*, pages 1–33, 70–98, 1963. (Cité pages 33, 39, 46 et 62.)
- [BSH02] Philippe Bekaert, Mateu Sbert, and John Halton. Accelerating path tracing by re-using paths. In *Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering*, EGRW '02, pages 125–134, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2002. Eurographics Association. (Cité page 11.)
- [BSH12] M. Bagher, Mahdi, Cyril Soler, and Nicolas Holzschuch. Accurate fitting of measured reflectances using a shifted gamma micro-facet distribution. *Computer Graphics Forum*, 31(4) :1509–1518, 2012. (Cité pages 46 et 49.)
- [Bur12] Brent Burley. Physically-based shading at disney. In *ACM SIGGRAPH*, 2012. (Cité page 47.)
- [BVD⁺07] Dimitrios Biliouris, Willem W. Verstraeten, Phillip Dutré, Jan A.N. Van Aardt, Bart Muys, and Pol Coppin. A compact laboratory spectro-goniometer (clabspg) to assess the brdf of materials. presentation, calibration and implementation on fagus sylvatica l. leaves. *Sensors*, 7(9) :1846–1870, 2007. (Cité pages 1 et 14.)
- [Ccc86] Chiun-Hong Chien and Jake K. .c. Volume/surface octrees for the representation of three-dimensional objects. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 36(1) :100 – 113, 1986. (Cité page 72.)
- [Cha14] Manmohan Chandraker. What camera motion reveals about shape with unknown brdf. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 2179–2186. IEEE, 2014. (Cité page 70.)
- [CPP⁺05] Eva Cerezo, Frederic Pérez, Xavier Pueyo, J. Francisco Seron, and X. François Sillion. A survey on participating media rendering techniques. *The Visual Computer*, 21(5) :303–328, 2005. (Cité page 9.)
- [CT82] Robert L. Cook and Kenneth E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1(1) :7–24, January 1982. (Cité pages 26, 33, 35, 39, 40, 61, 86 et 94.)
- [DC01] James Davis and Xing Chen. A laser range scanner designed for minimum calibration complexity. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on*, pages 91–98, 2001. (Cité pages 2 et 69.)

- [DC07] Jean-Denis Durou and Frédéric Courteille. Integration of a Normal Field without Boundary Condition. In Peter Belhumeur, Katsushi Ikeuchi, Emmanuel Prados, Stefano Soatto, and Peter Sturm, editors, *Proceedings of the First International Workshop on Photometric Analysis For Computer Vision - PACV 2007*, page 8 p., Rio de Janeiro, Brazil, October 2007. INRIA. (Cité page 78.)
- [DHT⁺00] Paul Debevec, Tim Hawkins, Chris Tchou, Haarm-Pieter Duiker, Westley Sarokin, and Mark Sagar. Acquiring the reflectance field of a human face. In *ACM SIGGRAPH, SIGGRAPH '00*, pages 145–156, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (Cité page 17.)
- [DJNC05] Scott Davis, Xiaoqian Jiang, Greg Nichols, and James Cremer. Exploring volume rendering with path tracing. In *ACM SIGGRAPH, SIGGRAPH '05*, New York, NY, USA, 2005. ACM. (Cité page 11.)
- [DM97] Paul E. Debevec and Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *ACM SIGGRAPH, SIGGRAPH '97*, pages 369–378, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (Cité page 22.)
- [DvGNK99] Kristin J. Dana, Bram van Ginneken, Shree K. Nayar, and Jan J. Koenderink. Reflectance and texture of real-world surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 18(1) :1–34, January 1999. (Cité page 15.)
- [DW04] Kristin J. Dana and Jing Wang. Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance. *Journal of the Optical Society of America*, 21 :pp. 1–12, January 2004. (Cité pages 2, 16 et 17.)
- [DWT⁺02] Paul Debevec, Andreas Wenger, Chris Tchou, Andrew Gardner, Jamie Waese, and Tim Hawkins. A lighting reproduction approach to live-action compositing. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3) :547–556, July 2002. (Cité page 17.)
- [EABC⁺14] Abderrazak El Albani, Stefan Bengtson, Donald E. Canfield, Armelle Riboulleau, Claire Rollion Bard, Roberto Macchiarelli, Lauriss Ngombi Pemba, Emma Hammarlund, Alain Meunier, Idalina Moubiya Mouele, Karim Benzerara, Sylvain Bernard, Philippe Boulvais, Marc Chaussidon, Christian Cesari, Claude Fontaine, Ernest Chi-Fru, Juan Manuel Garcia Ruiz, Francois Gauthier-Lafaye, Arnaud Mazurier, Anne Catherine Pierson-Wickmann, Olivier Rouxel, Alain Trentesaux, Marco Vecoli, Gerard J. M. Versteegh, Lee White, Martin Whitehouse, and Andrey Bekker. The 2.1 ga old francevillian biota : Biogenicity, taphonomy and biodiversity. *PLoS ONE*, 9(6) :e99438, 06 2014. (Cité page 1.)
- [FC88] Robert T. Frankot and Rama Chellappa. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10 :439–451, 1988. (Cité pages 78 et 84.)
- [FC04] J. Forest Collado. *New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners*. PhD thesis, May 2004. (Cité pages 2, 69 et 72.)
- [FKIS02] Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Katsushi Ikeuchi, and Masao Sakauchi. Appearance based object modeling using texture database : Acquisition, compression and rendering. In *Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, EGRW '02*, pages 257–266, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2002. Eurographics Association. (Cité pages 17 et 69.)
- [Fo097] Sing Choong Foo. A gonireflectometer for measuring the bidirectional reflectance of material for use in illumination computation, 1997. (Cité pages 1 et 14.)

- [FS05] Paolo Favaro and Stefano Soatto. A geometric approach to shape from defocus. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(3) :406–417, March 2005. (Cité page 72.)
- [FTKE08] Alessandro Foi, Mejdî Trimeche, Vladimir Katkovnik, and Karen Egiazarian. Practical poissonian-gaussian noise modeling and fitting for single-image raw-data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(10) :1737–1754, Oct 2008. (Cité page 21.)
- [Fua93] Pascal Fua. A parallel stereo algorithm that produces dense depth maps and preserves image features. *Machine Vision and Applications*, 6(1) :35–49, 1993. (Cité page 72.)
- [GAHO07] Abhijeet Ghosh, Shruthi Achutha, Wolfgang Heidrich, and Matthew O’Toole. Brdf acquisition with basis illumination. In *Computer Vision, 2007. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference on*, pages 1–8, Oct 2007. (Cité pages 2, 16 et 17.)
- [GAW⁺10] Miguel Granados, Boris Ajdin, Michael Wand, Christian Theobalt, Hans-Peter Seidel, and Hendrik P. A. Lensch. Optimal hdr reconstruction with linear digital cameras. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, pages 215–222, June 2010. (Cité page 22.)
- [GCHS10] Dan B Goldman, Brian Curless, Aaron Hertzmann, and Steven M. Seitz. Shape and spatially-varying brdfs from photometric stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(6) :1060–1071, June 2010. (Cité pages 2, 71 et 75.)
- [Geo03] Athinodoros S. Georghiadès. Incorporating the torrance and sparrow model of reflectance in uncalibrated photometric stereo. In *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision - Volume 2, ICCV ’03*, pages 816–, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society. (Cité pages 2, 71 et 75.)
- [GN03] Michael D. Grossberg and Shree K. Nayar. High Dynamic Range from Multiple Images : Which Exposures to Combine ? In *ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (CPMCV)*, Oct 2003. (Cité page 22.)
- [GTGB84] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg, and Bennett Battaile. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *ACM SIGGRAPH*, 18(3) :213–222, January 1984. (Cité pages 9 et 10.)
- [GTLLo6] Gaurav Garg, Eino-Ville Talvala, Marc Levoy, and Hendrik P. Lensch. Symmetric photography : Exploiting data-sparseness in reflectance fields. In *Proceedings of the 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques, EGSR ’06*, pages 251–262, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2006. Eurographics Association. (Cité page 17.)
- [Guio0] Erwan Guillou. *Simulation d’environnements complexes non lambertiens à partir d’images : application à la réalité augmentée*. PhD thesis, 2000. (Cité page 72.)
- [HB86] Berthold K. P. Horn and Michael J. Brooks. The variational approach to shape from shading. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 33(2) :174–208, February 1986. (Cité page 78.)
- [HCD01] Tim Hawkins, Jonathan Cohen, and Paul Debevec. A photometric approach to digitizing cultural artifacts. In *Proceedings of the 2001 Conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage, VAST ’01*, pages 333–342, New York, NY, USA, 2001. ACM. (Cité page 17.)
- [HDF10] Samuel W. Hasinoff, Frédo Durand, and William T. Freeman. Noise-optimal capture for high dynamic range photography. In *Computer Vision and Pattern*

- Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, pages 553–560, June 2010. (Cité page 20.)
- [Hei14] Eric Heitz. Understanding the masking-shadowing function in microfacet-based brdfs. *Journal of Computer Graphics Techniques*, 3(2) :32–91, 2014. (Cité pages 39, 40 et 41.)
- [Hel67] Hermann von Helmholtz. *Handbuch der physiologischen Optik [microform] / bearbeitet von H. von Helmholtz*. L. Voss Leipzig, 1867. (Cité page 9.)
- [HH10] Jared Hoberock and John C. Hart. Arbitrary importance functions for metropolis light transport. *Computer Graphics Forum*, 29(6) :1993–2003, 2010. (Cité page 11.)
- [HK93] Pat Hanrahan and Wolfgang Krueger. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '93*, pages 165–174, New York, NY, USA, 1993. ACM. (Cité page 33.)
- [HK94] Glenn E. Healey and Raghava Kondepudy. Radiometric ccd camera calibration and noise estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(3) :267–276, Mar 1994. (Cité page 21.)
- [HKo4] Itzik Horovitz and Nahum Kiryati. Depth from gradient fields and control points : Bias correction in photometric stereo. *Image and Vision Computing*, 22 :681–694, 2004. (Cité page 78.)
- [HMI10] Tomoaki Higo, Yasuyuki Matsushita, and Katsushi Ikeuchi. Consensus photometric stereo. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, pages 1157–1164. IEEE, 2010. (Cité pages 2, 71 et 77.)
- [HOJ08] Toshiya Hachisuka, Shinji Ogaki, and Henrik Wann Jensen. Progressive photon mapping. *ACM Transactions on Graphics*, 27(5) :130 :1–130 :8, December 2008. (Cité page 9.)
- [Hor70] Berthold K.P Horn. Shape from shading : A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. Technical report, Cambridge, MA, USA, 1970. (Cité pages 71 et 72.)
- [HP03] Jefferson Y. Han and Ken Perlin. Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope. In *ACM SIGGRAPH 2003 Papers, SIGGRAPH '03*, pages 741–748, New York, NY, USA, 2003. ACM. (Cité page 16.)
- [HQS10] Yong Hu, Yue Qi, and Fangyang Shen. Modeling spatially-varying reflectance based on kernel nyström. In *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '10*, pages 91–92, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Cité page 17.)
- [HS79] Berthold K. P. Horn and Robert W. Sjöberg. Calculating the reflectance map. *Applied optics*, 18(11), 10 1979. (Cité pages 19 et 20.)
- [HS03] Aaron Hertzmann and Steve Seitz. Shape and materials by example : a photometric stereo approach. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–533–I–540 vol.1, June 2003. (Cité page 75.)
- [HS05] Aaron Hertzmann and Steve Seitz. Example-based photometric stereo : shape reconstruction with general, varying brdfs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(8) :1254–1264, Aug 2005. (Cité page 75.)
- [HTcXSG91] Xiao Dong He, Kenneth E. Torrance, François X. Sillion, and Donald P. Greenberg. A comprehensive physical model for light reflection. *ACM SIGGRAPH*, 25(4) :175–186, July 1991. (Cité pages 36 et 39.)

- [HW11] Steffen Herbot and Christian Wohler. An introduction to image-based 3d surface reconstruction and a survey of photometric stereo methods. *3D Research*, 2(3), 2011. (Cité pages 2 et 71.)
- [HWQ13] Yong Hu, Shan Wang, and Yue Qi. Efficient reconstruction, decomposition and editing for spatially-varying reflectance data. In *Proceedings of Graphics Interface 2013, GI '13*, pages 55–62, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2013. Canadian Information Processing Society. (Cité page 17.)
- [Ike14] Osamu Ikeda. Shape from stereo images for small objects. In *Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), 2014 International Conference on*, volume 2, pages 754–758, April 2014. (Cité pages 2 et 69.)
- [IRM⁺12] Ivo Ihrke, Ilya Reshetouski, Alkhazur Manakov, Art Tevs, Michael Wand, and Hans-Peter Seidel. A kaleidoscopic approach to surround geometry and reflectance acquisition. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2012 IEEE Computer Society Conference on*, pages 29–36, June 2012. (Cité page 16.)
- [Jak10] Wenzel Jakob. Mitsuba renderer, 2010. <http://www.mitsuba-renderer.org>. (Cité pages 13 et 24.)
- [JAP99] Tony Jebara, Ali Azarbayejani, and Alex Pentland. 3d structure from 2d motion. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 16(3) :66–84, May 1999. (Cité page 70.)
- [JdJM14] Wenzel Jakob, Eugene d'Eon, Otto Jakob, and Steve Marschner. A comprehensive framework for rendering layered materials. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4) :118 :1–118 :14, July 2014. (Cité page 33.)
- [Jen96] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, pages 21–30, London, UK, UK, 1996. Springer-Verlag. (Cité pages 9 et 11.)
- [Jeno1] Henrik Wann Jensen. *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2001. (Cité page 11.)
- [JJ82] E. North Coleman Jr. and Ramesh Jain. Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surfaces using four-source photometry. *Computer Graphics and Image Processing*, 18(4) :309 – 328, 1982. (Cité pages 75, 76, 77 et 78.)
- [KA06] Kristian Kirk and Hans Jorgen Andersen. Noise characterization of weighting schemes for combination of multiple exposures. In Mike J. Chantler, Robert B. Fisher, and Emanuele Trucco, editors, *BMVC*, pages 1129–1138. British Machine Vision Association, 2006. (Cité page 22.)
- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. *ACM SIGGRAPH*, 20(4) :143–150, August 1986. (Cité pages 9, 10 et 11.)
- [KB13] Majdi KHOUDEIR and Benjamin Bringier. Localization of free 3D surfaces by the mean of photometric stereovision. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERING & TECHNOLOGY (IJECET)*, 4(7) :210–215, 2013. (Cité page 4.)
- [KF11] Alwin Kienle and Florian Foschum. 250 years lambert surface : does it really exist? *Optics Express*, 19(5) :3881–3889, Feb 2011. (Cité page 36.)
- [KMBK03] Melissa L. Koudelka, Sebastian Magda, Peter N. Belhumeur, and David J. Kriegman. Acquisition, compression, and synthesis of bidirectional texture functions. In *In ICCV 03 Workshop on Texture Analysis and Synthesis*, 2003. (Cité page 15.)
- [Koz92] John R. Koza. *Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992. (Cité page 90.)

- [KSKo1] Csaba Kelemen and Laszlo Szirmay-Kalos. A microfacet based coupled specular-matte BRDF model with importance sampling. In *EUROGRAPHICS*, 2001. (Cité pages 31, 34, 36, 39, 45 et 61.)
- [KSKK10] Murat Kurt, László Szirmay-Kalos, and Jaroslav Krivánek. An anisotropic brdf model for fitting and monte carlo rendering. *ACM SIGGRAPH*, 44(1) :3 :1–3 :15, February 2010. (Cité page 39.)
- [KZ11] Claude Knaus and Matthias Zwicker. Progressive photon mapping : A probabilistic approach. *ACM Transactions on Graphics*, 30(3) :25 :1–25 :13, May 2011. (Cité page 11.)
- [Laf96] Eric Lafortune. Mathematical models and monte carlo algorithms for physically based rendering. Technical report, 1996. (Cité pages 42 et 45.)
- [LAM60] Johann Heinrich LAMBERT. *Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Leipzig : W. Engelmann, 1760. (Cité page 24.)
- [LCV⁺04] Marc Levoy, Billy Chen, Vaibhav Vaish, Mark Horowitz, Ian McDowall, and Mark Bolas. Synthetic aperture confocal imaging. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3) :825–834, August 2004. (Cité page 17.)
- [Leo06] Paul Leopardi. A partition of the unit sphere into regions of equal area and small diameter. *ETNA. Electronic Transactions on Numerical Analysis*, 25 :309–327, 2006. (Cité page 88.)
- [Lew93] Robert R. Lewis. Making shaders more physically plausible. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 47–62, Paris, France, 1993. (Cité page 25.)
- [LFTW06] Hongsong Li, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance, and Stephen H. Westin. Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications. *Optical Engineering*, 45(4) :043605–043605–11, 2006. (Cité page 15.)
- [LKK98] Rong Lu, Jan J. Koenderink, and Astrid M. L. Kappers. Optical properties (bidirectional reflection distribution functions)of velvet. *Applied Optics*, 37(25) :5974–5984, Sep 1998. (Cité pages 2 et 15.)
- [LKL⁺13] Jaakko Lehtinen, Tero Karras, Samuli Laine, Miika Aittala, Frédo Durand, and Timo Aila. Gradient-domain metropolis light transport. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4), 2013. (Cité page 11.)
- [LSK⁺08] Ce Liu, Richard Szeliski, Sing Bing Kang, C. Lawrence Zitnick, and William T. Freeman. Automatic estimation and removal of noise from a single image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2) :299–314, Feb 2008. (Cité page 21.)
- [LW93] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Bi-directional path tracing. In *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction*, pages 145–153, 1993. (Cité pages 9 et 11.)
- [MA83] Worthy N. Martin and Jake K. Aggarwal. Volumetric descriptions of objects from multiple views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-5(2) :150–158, March 1983. (Cité pages 70 et 72.)
- [Mar63] Donald W. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2) :431–441, 1963. (Cité page 89.)
- [Mar98] Stephen Robert Marschner. *Inverse Rendering for Computer Graphics*. PhD thesis, Ithaca, NY, USA, 1998. AAI9839924. (Cité page 15.)

- [MBK05] Gero Müller, Gerhard H. Bendels, and Reinhard Klein. Rapid synchronous acquisition of geometry and btf for cultural heritage artefacts. In *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, pages 13–20. Eurographics Association, Eurographics Association, November 2005. (Cité page 71.)
- [MDEA⁺14] Idalina Moubiya Mouélé, Patrick Dudoignon, Abderrazak El Albani, Alain Meunier, Philippe Boulvais, François Gauthier-Lafaye, Jean-Louis Paquette, Hervé Martin, and Michel Cuney. 2.9 - 1.9ga paleoalterations of archean granitic basement of the franceville basin (gabon). *Journal of African Earth Sciences*, 97(Complete) :244–260, 2014. (Cité page 1.)
- [MLH02] David K. McAllister, Anselmo Lastra, and Wolfgang Heidrich. Efficient rendering of spatial bi-directional reflectance distribution functions. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware, HWWS '02*, pages 79–88, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2002. Eurographics Association. (Cité page 15.)
- [MM04] Bruno Mercier and Daniel Meneveaux. Shape from Silhouette : Image Pixels for Marching Cubes. *Journal of WSCG*, 13 :112–118, February 2004. (Cité page 70.)
- [MM06] Jonathan T. Moon and Stephen R. Marschner. Simulating multiple scattering in hair using a photon mapping approach. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers, SIGGRAPH '06*, pages 1067–1074, New York, NY, USA, 2006. ACM. (Cité page 11.)
- [MMF07] Bruno Mercier, Daniel Meneveaux, and Alain Fournier. A framework for automatically recovering object shape, reflectance and light sources from calibrated images. *International Journal of Computer Vision*, 73(1) :77–93, June 2007. (Cité page 71.)
- [MN99] Tomoo Mitsunaga and Shree K. Nayar. Radiometric self calibration. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.*, volume 1, page 380 Vol. 1, 1999. (Cité page 22.)
- [MP95] Steve Mann and Rosalind W. Picard. Being ‘undigital’ with digital cameras : Extending dynamic range by combining differently exposed pictures. In *Proceedings of IST's 48th Annual Conference*, pages 422–428, 1995. (Cité page 22.)
- [MPBM03] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3) :759–769, July 2003. (Cité pages 63 et 91.)
- [MPN⁺02a] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Addy Ngan, Paul Beardsley, Remo Ziegler, and Leonard McMillan. Image-based 3d photography using opacity hulls. volume 21, pages 427–437, 07/2002 2002. (Cité pages 17 et 71.)
- [MPN⁺02b] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Addy Ngan, Remo Ziegler, and Leonard McMillan. Acquisition and rendering of transparent and refractive objects. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 277–288, 06/2002 2002. (Cité pages 17 et 71.)
- [MSY07] Yasuhiro Mukaigawa, Kohei Sumino, and Yasushi Yagi. High-speed measurement of brdf using an ellipsoidal mirror and a projector. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on*, pages 1–8, June 2007. (Cité pages 2, 16 et 17.)
- [MtBZ99] Robert Molenaar, Jaap J. ten Bosch, and Jaap R. Zijp. Determination of kubelka-munk scattering and absorption coefficients by diffuse illumination. *Applied Optics*, 38(10) :2068–2077, Apr 1999. (Cité page 37.)

- [MTK⁺11] Yasuhiro Mukaigawa, Seiichi Tagawa, Jaewon Kim, Ramesh Raskar, Yasuyuki Matsushita, and Yasushi Yagi. Hemispherical confocal imaging using turtleback reflector. In Ron Kimmel, Reinhard Klette, and Akihiro Sugimoto, editors, *Computer Vision - ACCV 2010*, volume 6492 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 336–349. Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Cité page 17.)
- [MWL⁺99] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Image-based brdf measurement including human skin. In *Proceedings of the 10th Eurographics Conference on Rendering, EG-WR'99*, pages 131–144, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 1999. Eurographics Association. (Cité page 15.)
- [MWLT00] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune, and Kenneth E. Torrance. Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement. *Applied Optics*, 39(16) :2592–2600, Jun 2000. (Cité pages 2 et 15.)
- [MYA03] Adem Yasar Mulayim, Ulas Yilmaz, and Volkan Atalay. Silhouette-based 3-d model reconstruction from multiple images. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 33(4) :582–591, Aug 2003. (Cité page 70.)
- [Nay91] Shree K. Nayar. Shape and Reflectance from Image Intensities. In *Third Annual Conference on Intelligent Robotic Systems for Space Exploration*, pages 81–98, Nov 1991. (Cité pages 2, 71 et 75.)
- [Nic65] Fred E. Nicodemus. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Applied Optics*, 4(7) :767–775, Jul 1965. (Cité page 7.)
- [NIK91] Shree K. Nayar, Katsushi Ikeuchi, and Takeo Kanade. Surface reflection : physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(7) :611–634, Jul 1991. (Cité page 35.)
- [NRH⁺77] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsber, and T. Limperis. *Geometrical consideration and nomenclature for reflectance*. Final Report National Bureau of Standards, Washington, DC. Inst. for Basic Standards., 1977. (Cité pages 1, 7 et 14.)
- [NRS13] Johannes Köhler and Tobias Nöll, Gerd Reis, and Didier Stricker. A full-spherical device for simultaneous geometry and reflectance acquisition. In *Applications of Computer Vision (WACV), 2013 IEEE Workshop on*, pages 355–362, Jan 2013. (Cité page 69.)
- [ON94] M. Oren and S. K. Nayar. Generalization of Lambert's reflectance model. In *ACM SIGGRAPH*, 1994. (Cité pages 3, 27, 32, 34, 36, 39, 40, 51, 57, 58 et 61.)
- [PEG78] Walter Murray Philip E. Gill. Algorithms for the solution of the nonlinear least-squares problem. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 15(5) :977–992, 1978. (Cité page 89.)
- [Pen84] Alex P. Pentland. Local shading analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-6(2) :170–187, March 1984. (Cité page 71.)
- [PH00] Matt Pharr and Pat Hanrahan. Monte carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '00*, pages 75–84, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (Cité page 33.)
- [Pho75] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18(6) :311–317, 1975. (Cité page 24.)

- [PPG13] Said Pertuz, Domenec Puig, and Miguel Angel Garcia. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*, 46(5) :1415 – 1432, 2013. (Cité page 72.)
- [RSK10] Martin Rump, Ralf Sarlette, and Reinhard Klein. Groundtruth data for multispectral bidirectional texture functions. In *CGIV 2010*, pages 326–330. Society for Imaging Science and Technology, June 2010. (Cité page 15.)
- [SCD⁺06] Steve Seitz, Brian Curless, James Diebel, Daniel Scharstein, and Richard Szeliski. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 1, pages 519–528, June 2006. (Cité pages 2 et 69.)
- [Sch94] Christophe Schlick. A survey of shading and reflectance models. *Computer Graphics Forum*, 13(2) :121–131, 1994. (Cité page 59.)
- [Shi91] Peter S. Shirley. *Physically Based Lighting Calculations for Computer Graphics*. PhD thesis, Champaign, IL, USA, 1991. UMI Order NO. GAX91-24487. (Cité page 36.)
- [SHSL97] Peter Shirley, Helen Hu, Brian Smits, and Eric Lafortune. A practitioners' assessment of light reflection models. In *In Pacific Graphics*, pages 40–49, 1997. (Cité pages 34, 36, 40 et 61.)
- [SI96] Fredric Solomon and Katshushi Ikeuchi. Extracting the shape and roughness of specular lobe objects using four light photometric stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(4) :449–454, April 1996. (Cité pages 2, 71 et 75.)
- [Sim09] Lionel Simonot. A photometric model of diffuse surfaces described as a distribution of interfaced Lambertian facets. *Applied Optics-OT*, 48 :5793–5801, 2009. (Cité pages 32, 37, 39, 51, 61 et 65.)
- [Smi67] Bruge G. Smith. Geometrical shadowing of a random rough surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pages 668–671, 1967. (Cité pages 41 et 62.)
- [SPBo4] Joaquim Salvi, Jordi Pagès, and Joan Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, 37(4) :827 – 849, 2004. Agent Based Computer Vision. (Cité page 70.)
- [SSI99] Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(1) :1–12, Jan 1999. (Cité page 72.)
- [SSS⁺07] Jiuaui Sun, Melvyn Smith, Lyndon Smith, Sagar Midha, and Jeff Bamber. Object surface recovery using a multi-light photometric stereo technique for non-lambertian surfaces subject to shadows and specularities. *Image Vision Computer*, 25(7) :1050–1057, July 2007. (Cité pages 75 et 77.)
- [SSW⁺14] Christopher Schwartz, Ralf Sarlette, Michael Weinmann, Martin Rump, and Reinhard Klein. Design and implementation of practical bidirectional texture function measurement devices focusing on the developments at the university of bonn. *Sensors*, 14(5) :7753–7819, 2014. (Cité page 18.)
- [SSWK13] Christopher Schwartz, Ralf Sarlette, Michael Weinmann, and Reinhard Klein. Dome ii : A parallelized btf acquisition system. In Holly Rushmeier and Reinhard Klein, editors, *Eurographics Workshop on Material Appearance Modeling : Issues and Acquisition*, pages 25–31. Eurographics Association, June 2013. (Cité page 69.)

- [Stao1] Jos Stam. An illumination model for a skin layer bounded by rough surfaces. In StevenJ. Gortler and Karol Myszkowski, editors, *Rendering Techniques 2001*, Eurographics, pages 39–52. Springer Vienna, 2001. (Cité page 35.)
- [SWI97] Yoichi Sato, Mark D. Wheeler, and Katsushi Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97*, pages 379–387, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (Cité pages 2 et 69.)
- [SWRK11] Christopher Schwartz, Michael Weinmann, Roland Ruiters, and Reinhard Klein. Integrated high-quality acquisition of geometry and appearance for cultural heritage. In *The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage VAST 2011*, pages 25–32. Eurographics Association, Eurographics Association, October 2011. (Cité page 69.)
- [Sze93] Richard Szeliski. Rapid octree construction from image sequences. *CVGIP : Image Understanding*, 58(1) :23–32, July 1993. (Cité pages 70 et 71.)
- [TR75] T. S. Trowbridge and Karl P. Reitz. Average irregularity representation of a rough surface for ray reflection. *Journal of the Optical Society of America*, 65(5) :531–536, May 1975. (Cité pages 39 et 46.)
- [Tre87] Peter Roy Tregenza. Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Lighting Research & Technology*, 19 :13–14, 1987. (Cité page 88.)
- [TS67] Kenneth E. Torrance and Ephraim M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of Optical Society of America*, 57(9) :1105–1114, 1967. (Cité pages 26, 33, 35, 40, 61 et 71.)
- [Tsa87] Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4) :323–344, August 1987. (Cité page 72.)
- [TSB⁺14] Emmanuelle Tauzia, Lionel Simonot, Benjamin Bringier, Mickaël Ribardièrre, and Daniel Meneveau. BRDF à base de micro-facettes diffusantes : de la physique à la synthèse d'images. *REFIG*, 8(2) :1–14, July 2014. (Cité pages 4 et 59.)
- [TWL⁺05] Xin Tong, Jiaping Wang, Stephen Lin, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Modeling and rendering of quasi-homogeneous materials. Association for Computing Machinery, Inc., August 2005. (Cité page 17.)
- [Veag8] Eric Veach. *Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 1998. AAI9837162. (Cité pages 42 et 45.)
- [VG94] Eric Veach and Leonidas Guibas. Bidirectional estimators for light transport. 1994. (Cité pages 9 et 11.)
- [VG97] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97*, pages 65–76, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (Cité page 11.)
- [vGSK98] B. van Ginneken, M. Stavridi, and J.J. Koenderink. Diffuse and specular reflectance from rough surfaces. *Applied Optics*, 37(1) :130–139, 1998. (Cité pages 34, 36, 41 et 61.)
- [War92] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. In *ACM SIGGRAPH*, 1992. (Cité pages 2, 16, 17, 26, 33 et 39.)
- [WGT⁺05] Andreas Wenger, Andrew Gardner, Chris Tchou, Jonas Unger, Tim Hawkins, and Paul Debevec. Performance relighting and reflectance transformation with

- time-multiplexed illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3) :756–764, July 2005. (Cité page 17.)
- [WL88] Zhongquan Wu and L. Li. A line integration based method for depth recovery from surface normals. In *Pattern Recognition, 1988., 9th International Conference on*, pages 591–595 vol.1, Nov 1988. (Cité page 78.)
- [WLL⁺09] Tim Weyrich, Jason Lawrence, Hendrik P.A. Lensch, Szymon Rusinkiewicz, and Todd Zickler. Principles of appearance acquisition and representation. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 4(2) :75–191, October 2009. (Cité pages 16 et 17.)
- [WMLT07] Bruce Walter, Stephen R. Marschner, Hongsong Li, and Kenneth E. Torrance. Microfacet models for refraction through rough surfaces. In *Eurographics Symposium on Rendering*, 2007. (Cité pages 26, 31, 33, 35, 39, 40, 41, 42, 45, 46, 47, 48 et 49.)
- [WMP⁺05] Tim Weyrich, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Addy Ngan, and Markus Gross. Measuring skin reflectance and subsurface scattering. *MERL Technical Report*, 07/2005 2005. (Cité pages 17 et 69.)
- [WMP⁺06] Tim Weyrich, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Bernd Bickel, Craig Donner, Chien Tu, Janet McAndless, Jinho Lee, Addy Ngan, Henrik Wann Jensen, and Markus Gross. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3) :1013–1024, July 2006. (Cité page 69.)
- [Woo80] Robert J. Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19(1) :191139–191139–, 1980. (Cité pages 2, 71, 72 et 73.)
- [WRC88] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear. A ray tracing solution for diffuse interreflection. In *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '88*, pages 85–92, New York, NY, USA, 1988. ACM. (Cité pages 9 et 11.)
- [WSB⁺98] D. Rod White, Peter Saunders, Stuart J. Bonsey, John van de Ven, and Hamish Edgar. Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces. *Applied Optics*, 37(16) :3450–3454, Jun 1998. (Cité pages 1 et 14.)
- [WWL07] Liang Wan, Tien-Tsin Wong, and Chi-Sing Leung. Isocube : Exploiting the cube-map hardware. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(4) :720–731, July 2007. (Cité page 88.)
- [WWLL06] Tien-Tsin Wong, Liang Wan, Chi-Sing Leung, and Ping-Man Lam. Real-time environment mapping with equal solid-angle spherical quad-map. *Shader X4 : Lighting & Rendering*, W. Engel, ed., Charles River Media, 2006. (Cité page 88.)

Titre : Etude de l'apparence physique de surfaces opaques, analyse photométrique et reconstruction 3D

Résumé : L'étude de l'apparence de surfaces par analyse photométrique est un domaine de recherche actif, avec de nombreuses applications pour étudier la qualité des surfaces, la rugosité des objets, leur apparence, etc. Le sujet de cette thèse concerne plus particulièrement les surfaces opaques, et nous souhaitons estimer des informations géométriques et photométriques à partir de photographies. La première partie de ce manuscrit traite de l'analyse des modèles mathématique de réflectance, permettant de représenter les matériaux. Afin d'offrir une description physiquement plausible des matériaux opaques, notre première contribution concerne la mise en œuvre d'un modèle à base de microfacettes Lambertiennes interfacées. Il généralise différents modèles de la littérature incluant des surfaces purement diffuses ou spéculaires ainsi que des surfaces diffuses ou spéculaires rugueuses et se manipule grâce à trois paramètres physiques : couleur, rugosité et indice de réfraction. Il permet de prendre en compte la transmission des flux lumineux pénétrant sous la surface ainsi que les réflexions multiples entre microfacettes et de restituer les effets de rétrodiffusion lumineuse et d'anisotropie. Notre seconde contribution concerne la réalisation d'un système complet d'acquisition de la géométrie et de la réflectance d'objets à partir d'images HDR. Notre méthodologie correspond à une chaîne de reconstruction complète et automatique, uniquement à partir d'images, pour un faible coût de mise en place et un temps de traitement rapide comparé aux méthodes existantes. Notre méthode permet d'extraire des échantillons de réflectance suffisamment nombreux pour identifier les paramètres de modèles de réflectance avec les données acquises.

Mots-clés : *acquisition d'image, BRDF, 3D reconstruction, identification, synthèse et analyse d'image.*

Title : Study of opaque surface physical appearance, photometric analysis and 3D reconstruction

Abstract : The study of surface appearance by photometric analysis is an active research field, with various applications dedicated to the analysis of surface roughness or appearance. The subject of this PhD dissertation relates to the study of opaque surfaces, through the acquisition of their geometry. Our study leads us to an analysis of mathematical reflectance models, for representing materials appearance. To provide a physically plausible description of opaque surfaces, our first contribution concerns the implementation of a model based on Lambertian interfaced microfacets. This model generalizes several approaches often referenced in the literature, and includes flat diffuse or specular surfaces as well as diffuse or specular microfacets with three physically-based parameters : color, roughness and refractive index. It makes it possible to account for the transmission of the light flux entering below the surface as well as multiple reflections between microfacets, while handling backscattering and anisotropy. The second main contribution of this work concerns the implementation of a complete acquisition system for estimating geometry and reflectance from HDR images. Our methodology is based on a complete and automatic reconstruction framework, achieving a higher level of precision, a lower cost of implementation and a shorter processing time compared to photometry-based existing methods.

Keywords : *image acquisition, BRDF, 3D reconstruction, fitting, image synthesis and analysis*

