

Université de Montréal

**Simulation des fonctions de texture bidirectionnelles**

par  
Mohamed Yessine Yengui

Département d'informatique et de recherche opérationnelle  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)  
en informatique

Janvier, 2014

© Mohamed Yessine Yengui, 2014.

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

**Simulation des fonctions de texture bidirectionnelles**

présenté par:

Mohamed Yessine Yengui

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

Max Mignotte,	président-rapporteur
Pierre Poulin,	directeur de recherche
Neil Stewart,	membre du jury

Mémoire accepté le: .....

## RÉSUMÉ

Le réalisme des objets en infographie exige de simuler adéquatement leur apparence sous divers éclairages et à différentes échelles. Une solution communément adoptée par les chercheurs consiste à mesurer avec l'aide d'appareils calibrés la réflectance d'un échantillon de surface réelle, pour ensuite l'encoder sous forme d'un modèle de réflectance (BRDF) ou d'une texture de réflectances (BTF).

Malgré des avancées importantes, les données ainsi mises à la portée des artistes restent encore très peu utilisées. Cette réticence pourrait s'expliquer par deux raisons principales : (1) la quantité et la qualité de mesures disponibles et (2) la taille des données.

Ce travail propose de s'attaquer à ces deux problèmes sous l'angle de la simulation. Nous conjecturons que le niveau de réalisme du rendu en infographie produit déjà des résultats satisfaisants avec les techniques actuelles. Ainsi, nous proposons de précalculer et encoder dans une BTF augmentée les effets d'éclairage sur une géométrie, qui sera par la suite appliquée sur les surfaces. Ce précalcul de rendu et textures étant déjà bien adopté par les artistes, il pourra mieux s'insérer dans leurs réalisations.

Pour nous assurer que ce modèle répond aussi aux exigences des représentations multi-échelles, nous proposons aussi une adaptation des BTFs à un encodage de type *MIP map*.

**Mots clés:** BTF, BRDF, simulation, apparence de surface, compression, silhouette, microgéométrie, *MIP map*.

## ABSTRACT

The realism of objects in computer graphics requires adequate simulation of their appearance under different light/view directions and at various scales. A solution commonly adopted by researchers consists in measuring the reflectance of a real surface by means of calibrated devices. The measured data is encoded in the form of a reflectance model (BRDF) or a texture of reflectance (BTF). Despite significant progress in this area, the measured appearance data remain very infrequently used. This reluctance could be explained by two main reasons: (1) the limited number of high-quality measured materials and (2) the huge storage space required by the data. In this work, we suggest resolving these two problems from the angle of simulation. We consider that the level of realism in rendered images already produces satisfactory results with current techniques. Therefore, we propose to precompute and encode the effects of lighting on a completely synthetic micro-geometry, which will be applied on surfaces. This production pipeline being already well adopted by artists, it should better fit into their realizations. To ensure that this model also respects the requirements of multi-scale representations, we also propose an adaptation of the BTF to a MIP map encoding.

**Keywords:** BTF, BRDF, simulation, surface appearance, compression, mesoscopic geometry, silhouette, MIP map.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 2 : SYSTÈMES D'ACQUISITION</b> . . . . .	<b>6</b>
2.1 Introduction . . . . .	6
2.2 Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) . . . . .	6
2.2.1 Grandeurs radiométriques . . . . .	6
2.2.2 Définition de la BRDF . . . . .	7
2.3 Propriétés . . . . .	8
2.3.1 Symétrie . . . . .	8
2.3.2 Conservation d'énergie . . . . .	9
2.3.3 Isotropie . . . . .	9
2.4 Acquisition de la BRDF . . . . .	9
2.4.1 Systèmes de mesure de la BRDF . . . . .	10
2.4.2 Simulation de la BRDF . . . . .	20
2.5 Fonction de texture bidirectionnelle . . . . .	26
2.5.1 Définition . . . . .	26
2.5.2 Systèmes de mesure de la BTF . . . . .	27
2.6 Système de simulation . . . . .	30

2.6.1	Caméra virtuelle . . . . .	31
2.6.2	Microstructures . . . . .	33
2.6.3	Caméra et source de lumière . . . . .	33
2.6.4	Résultats préliminaires . . . . .	34
2.7	Conclusion . . . . .	35
<b>CHAPITRE 3 : COMPRESSION DE BTFS . . . . .</b>		<b>36</b>
3.1	Introduction . . . . .	36
3.2	Description du problème . . . . .	37
3.3	Méthodes de compression . . . . .	37
3.3.1	Compression de la BRDF . . . . .	37
3.3.2	Compression de la BTF . . . . .	45
3.4	Approche de compression . . . . .	51
3.5	Conclusion . . . . .	53
<b>CHAPITRE 4 : APPROCHE DE SIMULATION . . . . .</b>		<b>59</b>
4.1	Introduction . . . . .	59
4.2	Illumination globale . . . . .	60
4.2.1	Critères de l'algorithme d'illumination . . . . .	61
4.2.2	Classification des méthodes d'illumination globale . . . . .	62
4.2.3	Description de notre approche d'illumination globale . . . . .	78
4.3	Ajout de silhouettes . . . . .	85
4.3.1	État de l'art . . . . .	85
4.3.2	Approche proposée . . . . .	86
4.4	Rendu en multi-résolution de la BTF . . . . .	91
4.4.1	État de l'art . . . . .	91
4.4.2	Approche proposée . . . . .	93
4.5	Conclusion . . . . .	95
<b>Conclusion générale . . . . .</b>		<b>99</b>

**BIBLIOGRAPHIE . . . . . 101**

## LISTE DES TABLEAUX

2.I	Différents types de matériaux mesurés. . . . .	28
3.I	Taille mémoire d'une BTF pour différentes résolutions. . . . .	37
3.II	Taux de compression obtenus pour nos BTFs simulées. . . . .	53
4.I	Statistiques de simulation des BTFs. . . . .	88

## LISTE DES FIGURES

1.1	Représentation de la BTF. . . . .	3
2.1	Repère local en un point $P$ sur un élément de surface. . . . .	8
2.2	Configuration du système de mesure de BRDFs par goniomètre de l'université <i>Cornell</i> [31]. . . . .	12
2.3	Principe du système de mesure de Ward [65]. . . . .	14
2.4	Système de mesure des matériaux anisotropes de Ngan et al. [44].	15
2.5	La valeur de la BRDF d'un matériau, pour une combinaison de directions lumière/observation particulières, correspond à la moyenne d'une image de la BTF associée [10]. . . . .	16
2.6	Les sommets du maillage de l'hémisphère correspondent aux orientations de la normale de l'échantillon. La source de lumière reste fixe. La caméra est déplacée en différentes positions [10]. . . . .	17
2.7	Quelques types de matériaux mesurés par Dana et al. [10]. . . . .	18
2.8	Système de mesure de la BRDF de Matusik et al. [36]. . . . .	19
2.9	Quelques exemples de photos réelles de BRDFs mesurées par Matusik et al. [36]. . . . .	20
2.10	Sphère réfléchissante de la carte d'environnement de Cabral et al. [6].	23
2.11	Échantillon de micro-géométrie dans Westin et al. [67] avec le plan moyen indiqué en rouge semi-transparent. . . . .	25
2.12	Micro-géométrie et BRDF associée (nylon) [67]. . . . .	25
2.13	Micro-géométrie et BRDF associée (aluminium brossé) [67]. . . . .	26
2.14	Deux approches de représentation de la BTF [12]. . . . .	27
2.15	Système de mesure de type Dôme [41]. . . . .	29
2.16	Une vue prise avec un kaléidoscope avec les sources de lumière apparaissant comme des régions brillantes sur le fond noir [15]. . . . .	30
2.17	Caméra parallèle. . . . .	32
2.18	Visibilité du texel pour deux directions différentes. . . . .	32

2.19	Points d'intersection avec le plan $XY$ pour deux directions différentes $\theta = \{10^\circ, 85^\circ\}$ sont ici identiques. . . . .	33
2.20	(a) BRDF originale, BRDF simulée sur une microstructure plane d'un modèle de Torrance-Sparrow [59] : (b) résolution 60/120. 34	
2.21	BRDF anisotrope simulée sur une microstructure sinusoïdale : (a) résolution 40/80, (b) résolution 60/120, (c) résolution 80/160. . . . .	35
3.1	Exemple d'un t-shirt rendu par une BTF [40]. . . . .	36
3.2	Reparamétrisation de la BRDF dans le repère de Rusinkiewicz [50]. Au lieu de définir la BRDF comme (gauche) une fonction de $(\theta_i, \phi_i)$ et $(\theta_o, \phi_o)$ , on la considère comme (droite) une fonction de $(\theta_h, \phi_h)$ et $(\theta_d, \phi_d)$ . . . . .	40
3.3	Principe de factorisation de la méthode de Lawrence et al. [28]. . . . .	54
3.4	Reconstruction d'une texture de la BTF pour une direction d'observation et une direction de lumière fixes : de gauche à droite, en haut : texture originale, 16, 10, 5 composantes. En bas : erreur de reconstruction des textures [51]. . . . .	55
3.5	Pourcentage d'erreur de la reconstruction de la BTF en fonction du nombre de vecteurs de base [23]. . . . .	55
3.6	L'erreur moyenne de reconstruction de la BTF en fonction du nombre d'agrégats [41]. . . . .	56
3.7	Nouveau système de paramétrisation de Havran et al. [16]. . . . .	56
3.8	Principe de la méthode de compression à base de la quantification vectorielle hiérarchique [16]. . . . .	57
3.9	Procédure de calcul des coefficients $a_{r_3,v,i,j}$ [11]. . . . .	57
3.10	BTF de bosses colorées : (gauche) compressée, (droite) non compressée. . . . .	58
4.1	Méthode de MCPT [5]. . . . .	64
4.2	Chemins générés à partir de la source de lumière et du point d'observation [25]. . . . .	65

4.3	<i>Photon mapping</i> : (a) voisinage de 50 photons, (b) voisinage de 500 photons, (c) <i>final gathering</i> [5]. . . . .	69
4.4	L'échange radiatif entre les points $x$ et $y$ dépend de leurs orientations relatives, distance et visibilité. . . . .	71
4.5	Calcul du facteur de forme : (a) hémisphère, (b) héli-cube. . . . .	72
4.6	(a) Le terme de visibilité combiné avec (b) le facteur de géométrie, donnent (c) le facteur de transfert. Ce dernier est combiné avec (d) la radiance reçue pour déterminer (e) l'illumination finale [57]. . . . .	75
4.7	Emplacement des échantillons sur des exemples de micro-géométries : (a) sinusoïdale, (b) aléatoire. . . . .	81
4.8	Réseau d'interconnexions (en rose) entre les échantillons des exemples de micro-géométries : (a) sinusoïdale, (b) aléatoire. . . . .	82
4.9	Test de visibilité. . . . .	83
4.10	Les données précalculées sont constituées par les points d'intersection directs, un réseau de points avec des liens vers les points d'intersection directs, et une carte ombre. . . . .	84
4.11	Une surface avec une BTF faite de briques. Gauche : sous l'effet d'un éclairage local. Droite : sous l'effet de l'illumination globale. . . . .	85
4.12	Haut : intersection du rayon avec la surface (en 2D) extrudée dans l'espace objet. En bas : les segments de rayons correspondants dans l'espace de texture volumétrique. Notez que la surface en bleu clair est donnée à titre indicatif, car aucune méso-géométrie est présente à ce stade de la représentation de la BTF. . . . .	88
4.13	Un vase avec une BTF de plafond, avec un <i>shading</i> adéquat, ombres, silhouettes et inter-réflexions. . . . .	89
4.14	Une chaise avec une BTF de cuir. . . . .	90
4.15	Un coussin avec une BTF de cuir. . . . .	91
4.16	Coussin avec une BTF de tissus tressés. . . . .	92

4.17	Notre méthode approche la solution exacte calculée avec le <i>Monte Carlo Path Tracing</i> . Gauche : Solution exacte. Centre : BTF. Droite : BTF sans traverser les texels déformés. . . . .	96
4.18	Une surface légèrement courbe avec une BTF faite d'un ensemble de sphères. Gauche : BTFs simulées. Droite : solution exacte. Certaines petites différences sont essentiellement liées à la discrétisation et la compression de la VMF/BTF. Certaines différences d'intensités globales sont liées à notre <i>tone mapping</i> trop approximatif.	97
4.19	Décomposition d'un tenseur d'ordre 3. . . . .	97
4.20	Une surface vallonnée avec une BTF multi-échelle faite d'un ensemble de cônes. Haut : solution exacte. Bas : BTFs multi-échelles.	98

## **REMERCIEMENTS**

Je ne peux pas laisser passer l'occasion de la présentation de ce rapport sans exprimer mes remerciements et ma gratitude à tous ceux qui ont bien voulu apporter l'assistance nécessaire au bon déroulement de ce projet.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon encadrant, Pierre Poulin, pour l'attention et l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour ses multiples conseils et orientations tout au long de l'élaboration de ce projet.

Je tiens aussi à témoigner ma reconnaissance envers tous mes collègues de travail du LIGUM pour toutes les discussions autour d'un café et d'une beigne.

Je remercie aussi le gouvernement de la Tunisie, CRSNG et GRAND pour leur support financier.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

La synthèse d'images réalistes intervient dans un grand nombre d'applications et fait l'objet de nombreux travaux de recherche depuis plus de trente ans dans les communautés de l'informatique graphique. Son objectif principal est de représenter le monde réel, sur un ordinateur, d'une manière aussi fidèle que possible tout en offrant un bon compromis en coûts de calcul ou de pré-calcul, et de consommation mémoire. Ainsi, cette tâche nécessite une bonne compréhension des structures sous-jacentes des objets réels, de l'interaction entre la lumière et les différents types de matériaux, et du système visuel humain.

À cet effet, les progrès des techniques d'infographie et de vision tridimensionnelle ont favorisé un essor remarquable de la modélisation géométrique des objets réels. Leurs données géométriques sont utilisées dans de multiples domaines d'applications, en particulier dans le domaine de la synthèse d'images. La modélisation de l'interaction entre la matière et la lumière, incluant les phénomènes d'inter-réflexions entre les objets dans une scène et de diffusion de la lumière sous la surface des objets, a elle aussi connu beaucoup d'avancements allant de méthodes empiriques très primitives jusqu'aux techniques rigoureuses du point de vue physique. Néanmoins, la modélisation de l'apparence des objets souffre encore de plusieurs limitations et soulève de nombreuses interrogations malgré les progrès réalisés au cours des vingt dernières années. C'est dans ce contexte que s'inscrit la recherche présentée dans ce document.

D'une manière générale, la réflectance de la surface d'un objet peut être décrite par une fonction 8D appelée BSSRDF "*Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function*". Pour une lumière incidente à un point  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  provenant d'une direction  $\omega_i(\theta_i, \phi_i)$ , elle modélise la sortie de cette lumière en un point  $P_o(x_o, y_o, z_o)$  suivant la direction  $\omega_o(\theta_o, \phi_o)$ . En chaque point  $P_o(x_o, y_o, z_o)$ , elle mesure la quantité de lumière transmise dans la direction  $\omega_o$ .

Une simplification de la BSSRDF consiste à contraindre la lumière à entrer et sortir

au même point  $P_o = P_i$ , ce qui nous ramène au modèle de la BRDF [45] “*Bidirectional Reflectance Distribution Function*”. Les premiers travaux de modélisation de la réflectance d’un objet ont été basés sur la BRDF. Sous quelques simplifications considérées standard, la BRDF est une fonction 4D dépendante des valeurs exprimées en angles polaires des directions de vue <sup>1</sup> et de lumière. Elle sert à caractériser la réflexion lumineuse d’une surface homogène d’un objet.

Néanmoins, les BRDFs présentent des difficultés à modéliser des surfaces non homogènes. En effet, sur un objet réel, les propriétés de réflectance des matériaux sous-jacents varient d’un point à un autre. Ainsi, cette variation entraîne une variation de la BRDF sur la surface de l’objet, ce qui donne naissance à un modèle de description de la réflectance des objets réels nommé SVBRDF “*Spatially Varying BRDF*”. Sous les mêmes simplifications, la SVBRDF est une fonction 6D qui encode en chaque point  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  la BRDF correspondante. Cependant, la SVBRDF reste un modèle très simpliste. En effet, la SVBRDF suppose que la surface est localement homogène, ce qui permet de préserver les propriétés (symétrie, conservation d’énergie, etc.) des BRDFs encodées. De ce fait, les phénomènes optiques qui se manifestent sur la surface de tout objet, tels que l’occultation, les inter-réflexions, etc., sont simulés dans des zones locales de la surface.

Pour tenir compte des effets optiques globaux, Dana et al. [10] ont proposé la BTF “*Bidirectional Texture Function*”. Une BTF est une texture 6D dont chaque texel encode une BRDF. Ainsi, pour une direction de vue  $\omega_o(\theta_o, \phi_o)$  et une direction de lumière  $\omega_i(\theta_i, \phi_i)$ , nous stockons la valeur de réflectance (BRDF) associée à chaque texel  $(u, v)$  de la texture. D’une manière formelle, une BTF peut donc être décrite par une fonction à six paramètres  $BTF(u, v, \theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$ . Une BRDF extraite à partir d’un texel de la BTF peut violer certaines propriétés, puisque les transferts de la lumière peuvent provenir de différents points de la surface. Elle est désignée comme un *apparent* BRDF (aBRDF). Dans ce mémoire, nous faisons référence à aBRDF comme BRDF.

Malgré la capacité de la BTF à mieux reproduire les surfaces hétérogènes que la

---

<sup>1</sup>La direction de vue coïncide avec la direction de réflexion dans un modèle où le chemin de lumière passe par plusieurs points.

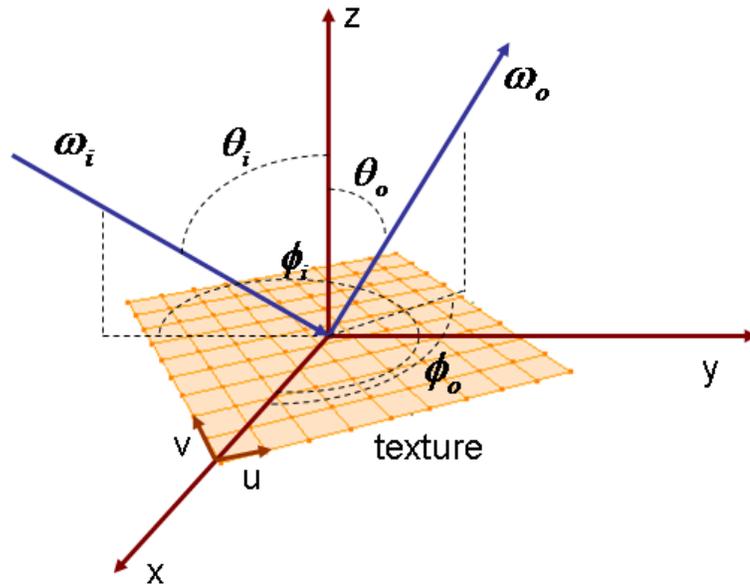


Figure 1.1 – Représentation de la BTF.

BRDF, il reste deux difficultés majeures à son adoption par la communauté graphique, soient au niveau du temps d'acquisition et surtout de l'espace mémoire requis pour la stocker. De ce fait, il s'avère primordial de procéder à une étape de compression des données de la BTF. Quelques techniques de compression ont été proposées dans la littérature et nous reviendrons plus en détail sur ces méthodes en mettant l'accent sur leurs avantages et leurs limites dans le contexte des BTFs.

L'acquisition de BTFs constitue une opération assez délicate et nécessite le respect de plusieurs contraintes de mesure. Quelques systèmes physiques de capture de BTFs ont été conçus par certains laboratoires de recherche dans le monde. Dans le prochain chapitre, nous donnerons une description et une classification de ces différents systèmes. D'une manière générale, tous ces dispositifs sont constitués principalement par une source de lumière, une caméra ou un senseur, et un échantillon du matériau. En plus, une mesure précise des BTFs exige au système d'avoir une procédure de rectification d'images et une stabilité des propriétés des matériaux durant la phase de capture suite à une exposition à une source de lumière souvent intense. Néanmoins, malgré les amé-

liorations de leur qualité technique, ces dispositifs de mesure se restreignent à de basses résolutions d'échantillonnage des directions de lumière et d'observation, et ne peuvent pas bien capter les propriétés de réflectance des matériaux à des angles rasants.

Dans le contexte de notre recherche, nous proposons de concevoir une application de simulation de BTFs synthétiques. Nous tenterons de produire des apparences des matériaux simulés aussi similaires que possible à ceux dans la réalité. Plusieurs problèmes sont à aborder dans la réalisation de cet objectif. Ainsi, nous devons utiliser un système de modélisation des micro-structures des surfaces. La définition des propriétés primitives (géométrie, réflexion diffuse, réflexion spéculaire, atténuation, etc.) à l'échelle microscopique et la simulation du transport de lumière nous permettront de produire des apparences très sophistiquées à l'échelle macroscopique. Pour ce faire, nous devons bâtir un système virtuel d'acquisition de BTFs. Les variables de la BTF seront les paramètres de ce dispositif. Nous pourrons, en optimisant le temps de la simulation, générer des BTFs à des résolutions beaucoup plus fines que les systèmes physiques actuels. Pour pouvoir inclure les divers phénomènes optiques de réflexion qui caractérisent les surfaces de matériaux réels, nous proposons d'avoir recours aux algorithmes d'illumination globale. Ainsi, nous effectuerons une étude comparative entre différentes techniques proposées dans la littérature. Notre choix sera basé principalement sur les critères suivants (dans l'ordre de leur citation) :

1. Possibilité de précalculer certains traitements de l'algorithme et de les utiliser pour le rendu des différentes images de la BTF.
2. Temps de calcul.
3. Espace mémoire.

Nous déterminerons le meilleur algorithme qui répond à ces critères. Certaines optimisations nous permettront de minimiser encore plus le temps de simulation des BTFs.

La taille des données, calculées par le système de simulation, sera vraisemblablement très grande, soit de l'ordre de giga-octets (GOs). Par conséquent, il est crucial

d'introduire une phase de compression dans notre application. Nous effectuerons une étude approfondie des diverses techniques de compression appliquées sur les BTFs ou utilisées pour compresser d'autres types de données similaires. L'algorithme adopté préservera les propriétés d'apparence des BTFs simulées. Afin de permettre un rendu de nos BTFs avec une bonne qualité et un temps de calcul raisonnable, nous proposerons une extension de la méthode de "*MIP map*" afin de fournir une approche multi-résolution. Finalement, nous validerons les résultats obtenus dans des systèmes de rendu en *batch*. Le but est de produire des images de synthèse aussi réalistes que possible.

Ce document s'articule autour de trois chapitres. Au chapitre 2, nous présentons les différents systèmes d'acquisition réelle des BRDFs et BTFs en mettant en évidence leurs principales limites, puis nous décrivons notre système d'acquisition virtuelle basé sur la projection parallèle. Le chapitre 3 est consacré dans sa première partie à présenter une étude bibliographique des principales techniques de compression des BRDFs et BTFs, puis nous décrivons notre approche adoptée de compression des BTFs. Nous présentons ensuite, au chapitre 4, une description des différentes techniques d'illumination globale et d'ajout des silhouettes sur des textures plaquées, ainsi que de représentations multi-échelles. Les techniques proposées seront présentées dans ce chapitre.

## CHAPITRE 2

### SYSTÈMES D'ACQUISITION

#### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons la définition et les propriétés de la BRDF, avant de décrire quelques systèmes physiques de mesure et d'autres de simulation de BRDFs. Ensuite, nous détaillons les principales caractéristiques de la BTF en mettant en évidence son apport par rapport à la BRDF et les difficultés à résoudre pour concevoir un système de simulation. Le reste du chapitre est consacré à la description de notre système de simulation de BTFs.

#### 2.2 Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF)

Nous proposons de donner la définition de quelques grandeurs radiométriques nécessaires à la compréhension de la BRDF.

##### 2.2.1 Grandeurs radiométriques

###### Angle solide

Soit une surface élémentaire  $dS$  définie sur une sphère de rayon  $r$  et centrée à l'origine du repère. En coordonnées sphériques,  $dS$  est donnée par  $r^2 \sin \theta d\theta d\phi$ . L'angle solide  $d\Omega$  sous lequel on voit la surface  $dS$  à partir de l'origine est décrit par :

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi. \quad (2.1)$$

### Éclairement énergétique

L'éclairement énergétique (ou densité du flux radiatif),  $E = d\Phi/dA$ , à un élément de surface  $dS$  est la quantité du flux radiatif passant par  $dS$  divisée par l'aire  $dA$  de cet élément. Elle est mesurée en  $\text{Watt}/m^2$ .

### Luminance énergétique

La luminance énergétique,  $L = d^2\Phi/(d\Omega \cos \theta dA)$ , est caractérisée par une direction  $\omega(\theta, \phi)$  et calculée en un élément de surface  $dS$  d'un objet. Le numérateur décrit le flux radiatif émis par  $dS$  dans la direction  $\omega$ . Le dénominateur correspond au produit scalaire de l'angle solide autour de la direction  $\omega$  par l'aire de  $dS$  projetée sur un plan perpendiculaire à la direction  $\omega$ .

#### 2.2.2 Définition de la BRDF

La BRDF [45] est une fonction mathématique qui détermine la proportion de lumière réfléchiée par un élément de surface éclairé par une source de lumière. En conséquence, une BRDF dépend essentiellement de la direction d'observation, de la direction de la lumière et de la longueur d'onde  $\lambda$  observée (figure 2.1). Ainsi, nous pouvons modéliser formellement la BRDF  $f_r$  d'une surface homogène par l'équation suivante :

$$f_r(\omega_i, \omega_o, \lambda) = f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o, \lambda) = \frac{dL_o(\omega_o, \lambda)}{dE_i(\omega_i, \lambda)} = \frac{dL_o(\theta_o, \phi_o, \lambda)}{L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i d\omega_i}. \quad (2.2)$$

D'une manière générale, la modélisation de l'interaction entre la lumière et les matériaux représente un objectif commun à plusieurs domaines scientifiques tels que la télédétection, l'optique, la synthèse d'images, etc. Néanmoins, chacun de ces domaines nécessite un niveau de détail plus ou moins complexe dans la description de cette interaction. Ainsi, dans la synthèse d'images, le niveau macroscopique caractérisé par l'échange radiatif de la lumière reste souvent suffisant. En effet, si on se place à une

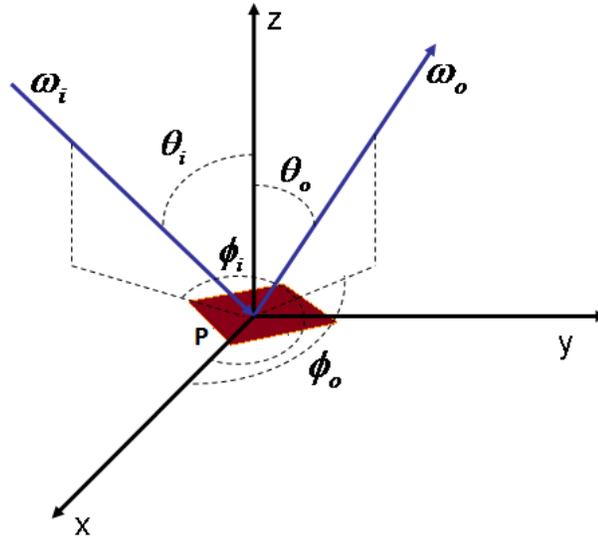


Figure 2.1 – Repère local en un point  $P$  sur un élément de surface.

distance suffisamment lointaine de la surface, les variations de la microgéométrie et de la réflectance se produisent à une échelle infinitésimale par rapport à la grandeur du pixel. Par conséquent, la réflectance sur la surface de l'objet est considérée uniforme.

## 2.3 Propriétés

Une BRDF doit respecter certaines propriétés, dont la symétrie et la conservation d'énergie. Elle peut aussi être isotrope ou anisotrope.

### 2.3.1 Symétrie

La propriété de symétrie a été introduite par Helmholtz [8]. Intuitivement, la quantité de lumière réfléchiée par la surface pour une direction d'observation  $\omega_o$  et une direction de lumière  $\omega_i$  dans l'hémisphère  $\Omega$  reste la même si nous permutons les deux directions. Formellement, cette propriété peut être décrite par l'équation suivante :

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i) \quad \forall \omega_i, \omega_o \in \Omega. \quad (2.3)$$

### 2.3.2 Conservation d'énergie

Cette propriété assume que le flux radiatif réfléchi par la surface en un point  $P$  est inférieur ou égal au flux radiatif reçu par celle-ci.

$$\int_{\Omega} f_r(\omega_i, \omega_o) d\omega_o \leq 1 \quad \forall \omega_i \in \Omega. \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Isotropie

D'une manière générale, la BRDF dépend de quatre grandeurs angulaires  $(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$ . Cependant, pour certains matériaux, la quantité de lumière réfléchie est invariante par rotation autour de la normale à la surface. En conséquence, la BRDF devient une fonction à trois paramètres et elle est définie par l'équation suivante :

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) = f_r(\theta_i, \theta_o, \phi) \quad \text{avec} \quad \phi = |\phi_o - \phi_i|. \quad (2.5)$$

## 2.4 Acquisition de la BRDF

Dans cette section, nous présentons deux approches de capture de la BRDF. La première consiste à mesurer la BRDF avec un système d'acquisition physique. Quelques variantes de ce dispositif ont été proposées dans la littérature. La première partie de cette section est consacrée à l'étude des avantages et des inconvénients de ces dispositifs. Nous proposons de les classifier selon le type d'instrument de mesure de la lumière réfléchie (caméra, senseur). Quelques exemples des différentes classes seront détaillés. L'objectif est de donner au lecteur une idée plus approfondie du principe de fonctionnement d'un système de mesure de BRDFs.

La deuxième approche d'acquisition consiste à simuler la BRDF avec un système analytique. Dans ce contexte, nous décrivons deux méthodes de simulation : par rendu direct de Cabral et al. [6] et par rendu Monte Carlo de Westin et al. [67].

### 2.4.1 Systèmes de mesure de la BRDF

La mesure des propriétés optiques des matériaux constitue une opération délicate. En effet, plusieurs problèmes sont à résoudre. Ils sont liés essentiellement à :

- La précision des valeurs mesurées.
- Le temps total d'acquisition.
- La taille des données mesurées : une fine discrétisation des paramètres de la BRDF requiert un espace mémoire considérable pour stocker les données résultantes.
- La résolution spectrale des données d'acquisition (les longueurs d'onde utilisées).
- La consistance (les matériaux doivent garder les mêmes propriétés dans le temps suite à une exposition à une source lumineuse intense).
- La dynamique de l'échantillon de mesure : il doit être statique.
- La taille physique de l'échantillon en rapport avec les instruments de mesure.
- La stabilité spectrale de la source lumineuse.

L'acquisition des BRDFs de matériaux d'objets réels constitue un domaine de recherche très actif qui a connu un développement remarquable durant les vingt dernières années. En conséquence, différents systèmes sont proposés dans le but d'améliorer la qualité des BRDFs mesurées. La différence entre ces dispositifs réside au niveau des types des composants de mesure et les degrés de liberté associés à chacun de ces composants. Ainsi, pour certains systèmes, la caméra bouge et la source de lumière est fixe, tandis que c'est le contraire pour d'autres. Plusieurs caméras et sources de lumière peuvent aussi remplacer le mouvement d'un composant unique.

Outre cette distinction, nous proposons de présenter les différents dispositifs de mesure selon le type de l'instrument de capture de la lumière réfléchi (senseur ou caméra). Il existe deux classes : les goniomètres et les systèmes de mesure à base d'images.

### 2.4.1.1 Les goniomètres

Les goniomètres [31, 42, 47] sont des appareils expérimentaux de mesure des propriétés optiques de matériaux. Ils sont composés principalement par une source de lumière, un senseur et un échantillon de mesure.

Dans ces systèmes, une combinaison des bras robotisés, automatisés et pilotés par un ordinateur, sont utilisés pour positionner la source lumineuse et le senseur dans différentes orientations selon l'hémisphère situé au-dessus de l'échantillon de mesure. Le senseur est généralement associé à un spectro-radiomètre afin de capturer une large bande spectrale pour chaque configuration de mesure.

Le temps de mesure typique d'une seule BRDF avec le goniomètre est très élevé, pouvant aller de l'ordre de jours. Le nombre relativement élevé de degrés de liberté (soit quatre) du système ralentit considérablement l'opération de mesure. Le système de commande (ordinateur) déplace les instruments du goniomètre suivant la résolution du mouvement des bras moteurs vers chaque combinaison possible de leurs positions. En plus, le développement et la maintenance sont assez coûteux. L'une des dernières variantes du goniomètre est celle de l'université *Cornell* [31]. Le but de la prochaine section est de donner une description détaillée de ce dispositif assez représentatif.

### ***Goniomètre de l'université Cornell (2005) [31]***

Li et al. [31] ont proposé une variante d'un goniomètre qui permet de mesurer des BRDFs isotropes. Dans ce cas, les BRDFs à mesurer sont décrites seulement par trois paramètres, ce qui nécessite un système de mesure à trois degrés de liberté. Le dispositif de Li et al. [31] possède deux degrés de liberté pour l'orientation de l'échantillon à mesurer et un troisième pour le déplacement angulaire de la source de lumière. Il est composé principalement par quatre parties (voir la figure 2.2) : une source de lumière avec une bande spectrale étendue, trois bras moteurs qui contrôlent le positionnement des instruments, un détecteur spectro-radiomètre fixe, et un ordinateur (il n'est pas montré) qui contrôle l'opération de mesure et le traitement des données.

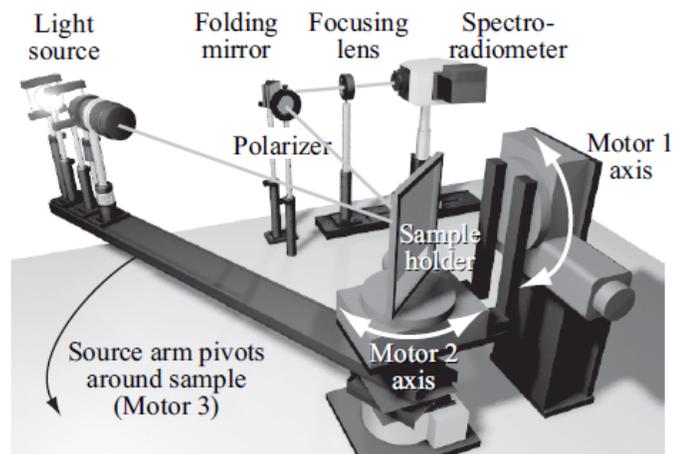


Figure 2.2 – Configuration du système de mesure de BRDFs par goniomètre de l'université *Cornell* [31].

La source de lumière utilisée est une lampe halogène de 300 Watts de puissance. Elle est fixée sur un bras moteur qui permet de la tourner autour de l'échantillon à mesurer (voir la figure 2.2). Les rayons lumineux passent par une ouverture réglable après être dépolarisés par un verre opale et rassemblés par une lentille convergente. Puis, ils sont transformés en rayons parallèles par un collimateur de lentille *Nikon*. Ces rayons sous-tendent un angle solide approximativement égal à  $2.4 \times 10^{-5} sr$  (*steradian*). L'illumination résultante est uniforme dans une zone circulaire de  $25mm$  de diamètre. Le

changement de la direction d'illumination revient juste à faire tourner la source lumineuse autour de l'échantillon de mesure. La résolution angulaire de ce mouvement est de  $0.13^\circ$ . Le plan de l'échantillon de mesure est tourné selon deux axes (correspondant aux flèches blanches dans la figure 2.2). La résolution angulaire de ces rotations est  $0.1^\circ$ . La lumière réfléchie est réfléchie par un miroir vers le senseur. Ce dernier est équipé d'une diode détectrice de 1024 pixels qui couvre tout le spectre visible ( $386nm-711nm$ ). Pour chaque combinaison de position lumière/senseur, Li et al. [31] mesurent 31 échantillons spectraux. Ce système est contrôlé par un programme C qui accepte en entrée un fichier de configuration angulaire. Ce fichier spécifie la position de chaque bras moteur. L'opération de mesure d'une BRDF dure environ entre 9 et 10 heures pour une résolution angulaire de  $10 \times 10 \times 10$ .

Ce système a été testé pour effectuer la mesure de la BRDF de quelques types de matériaux tels que l'aluminium, la peinture jaune, l'argent. Les propriétés de la BRDF (conservation de l'énergie, symétrie) sont bien respectées. Avec ce système, on peut effectuer des mesures à angle rasant jusqu'à un angle  $\theta$  égal à  $85^\circ$ .

#### 2.4.1.2 Systèmes de mesure à base d'images

La deuxième classe [10, 36, 44, 65], [32, 35, 37] de méthodes de mesure de la BRDF utilise une caméra au lieu d'un senseur comme instrument de capture de la lumière réfléchie. Une caméra contient plusieurs cellules photosensibles. En utilisant des lentilles et des miroirs, ces cellules peuvent capter simultanément différentes valeurs de réflectance. Les techniques proposées dans cette catégorie sont plus nombreuses que dans la première classe. En effet, le développement et la maintenance de cette variante de mesure est beaucoup moins coûteux. En plus, avec cette technique, l'acquisition d'une BRDF peut être réalisée en quelques minutes. Toutes les variantes de systèmes de cette catégorie sont composées principalement d'une caméra, une source lumineuse et un échantillon de mesure.

Cette classe peut être subdivisée en deux sous-classes selon la forme géométrique sur laquelle on dispose le matériau de mesure : une forme planaire ou une forme courbe (cylindre, sphère, etc.).

Dans la première sous-classe, nous pouvons citer deux systèmes représentatifs [10, 65]. Par exemple, le système de Ward [65] est constitué d'un dôme de forme hémisphérique composée d'une surface réfléchissante à l'intérieur, mais qui laisse passer la lumière située à l'extérieur du dôme. Elle réfléchit la lumière renvoyée par le matériau à mesurer. Une caméra CCD est fixée au centre du dôme, orientée pour capter la surface intérieure du dôme. L'échantillon de mesure est aussi placé au centre du dôme sur un plateau tournant sur sa normale. La source lumineuse est placée à l'extérieur du dôme sur un bras moteur commandé par un ordinateur, elle varie seulement en  $\theta$ . L'avantage majeur de ce système est de pouvoir mesurer une BRDF en quelques minutes, quoique les résolutions des mesures ne sont pas explicitement fournies dans l'article. Ses inconvénients sont liés à la difficulté de mesurer la réflectance pour un angle rasant et à la collimation de la source de lumière. La figure 2.3 illustre le principe de fonctionnement de ce système.

La deuxième sous-classe de méthodes [36, 44], [32, 35, 37] consiste à utiliser une forme

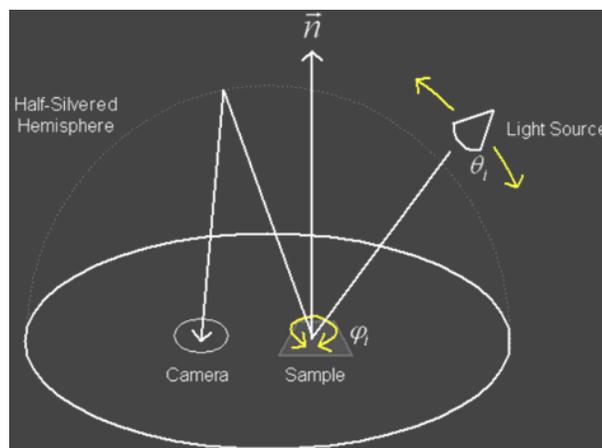


Figure 2.3 – Principe du système de mesure de Ward [65].

courbe (sphère, cylindre, etc.) sur laquelle on dépose la surface du matériau à étudier. Le vecteur normal varie d'un point à un autre sur la surface de la forme courbe. Ainsi, chaque image captée fournit plusieurs valeurs de différentes combinaisons des paramètres angulaires. Matusik et al. [36] ont utilisé une sphère comme forme pour mesurer

des BRDFs isotropes. Ils fournissent une base de données d'une centaine de matériaux mesurés accessible à partir du web.

Ngan et al. [44] se servent d'un cylindre pour capturer des BRDFs anisotropes. Ils découpent des bandes d'un matériau anisotrope suivant différentes orientations relativement à la direction de sa tangente. Ces bandes sont ensuite enroulées sur un cylindre. Leur nombre représente un degré de liberté du système de mesure. La rotation du cylindre et de la source lumineuse, et la variation de la normale sur la surface du cylindre correspondent aux trois autres degrés de liberté (voir la figure 2.4). Les orientations des bandes sont comprises entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  définies tous les  $9^\circ$ . Au total, Ngan et al. [44] utilisent 20 bandes. Le cylindre est tourné par un moteur d'une résolution angulaire de  $5^\circ$  sur un intervalle étendu de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ . La source de lumière effectue un mouvement circulaire, commandé par un moteur, autour du cylindre d'une résolution de  $2^\circ$ . Les positions d'occultations (la lumière est située entre le cylindre et la caméra, ou le cylindre est situé entre la lumière et la caméra) sont exclues.

Nous proposons de détailler les principes d'un système de mesure en particulier pour

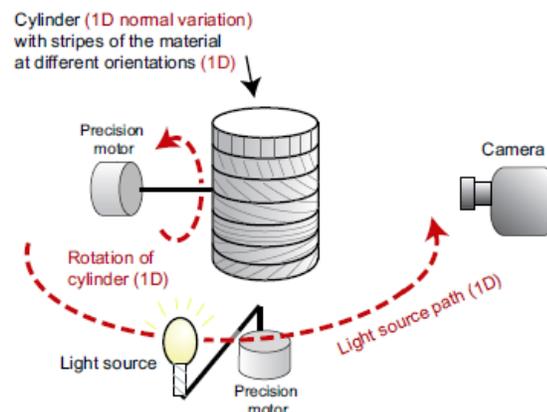


Figure 2.4 – Système de mesure des matériaux anisotropes de Ngan et al. [44].

chaque sous-classe. Il est important de noter que les dispositifs choisis ne représentent pas nécessairement les particularités de tous les systèmes des deux sous-classes, mais qu'ils en sont toutefois représentatifs.

### ***Système de mesure de la BRDF/BTF de Dana et al. [10]***

La mesure de la BRDF nécessite la détermination de la valeur de la radiance pour un ensemble de couples de directions (lumière, observation). Le système de mesure de Dana et al. [10] consiste à capter une image par une caméra vidéo pour chacun de ces couples. Chaque image est formée par  $640 \times 480$  pixels. Le pixel est codé sur 24 bits (8 bits pour chaque canal R/G/B). Ensuite, une étape de post-traitement de calibration et de segmentation est appliquée afin de convertir les valeurs des pixels en radiances. Les images calibrées et segmentées forment une BTF mesurée d'un matériau. Les valeurs de la BRDF associée correspondent à la moyenne des radiances de chaque image, comme il est illustré à la figure 2.5. La source lumineuse est une lampe halogène. Une lentille de Fresnel est utilisée sur la lumière pour générer des rayons parallèles. Elle est calibrée avec un *Kodak standard card* qui permet de faire correspondre la valeur du pixel de l'image à la valeur de radiance associée et de déterminer la stabilité temporelle de la lampe.

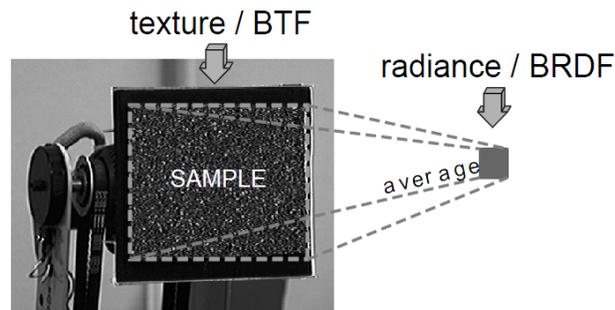


Figure 2.5 – La valeur de la BRDF d'un matériau, pour une combinaison de directions lumière/observation particulières, correspond à la moyenne d'une image de la BTF associée [10].

L'échantillonnage de l'hémisphère pour déterminer les directions de vue et de lumière constitue une opération délicate dans le processus de mesure. Pour résoudre ce problème, Dana et al. ont choisi de faire tourner l'échantillon de mesure avec un robot autour d'un

axe fixe. Comme le montre la figure 2.6, la source de lumière reste fixe durant l'opération de capture, tandis que la caméra est déplacée par un mouvement de rotation en sept positions. L'angle entre deux positions successives est égal à  $22.5^\circ$ . En chaque position de la caméra, l'échantillon de mesure est orienté tel que sa normale pointe vers un sommet d'un maillage polygonal de l'hémisphère supérieur.

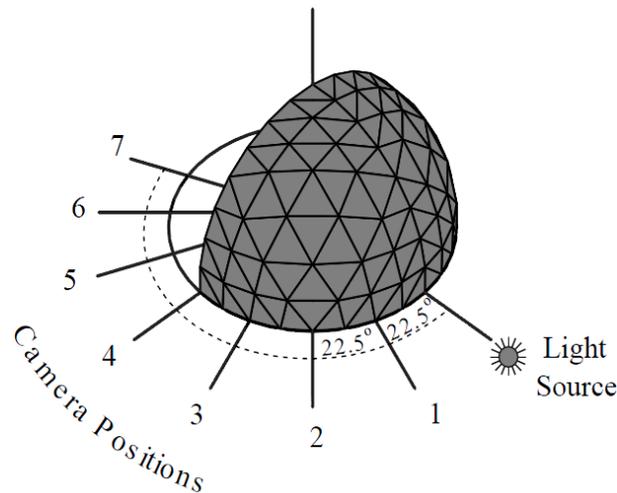


Figure 2.6 – Les sommets du maillage de l'hémisphère correspondent aux orientations de la normale de l'échantillon. La source de lumière reste fixe. La caméra est déplacée en différentes positions [10].

Ce système a été utilisé pour mesurer la réflectance de 61 types de matériaux. Chaque échantillon est observé suivant 205 combinaisons de directions lumière/vue. En effet, certaines orientations avec des angles  $\theta$  d'observation ou de lumière supérieurs à  $85^\circ$  sont exclues afin d'éviter les problèmes d'auto-occultation et d'auto-ombrage. Ce nombre de directions reste une faible résolution pour pouvoir capturer tous les phénomènes optiques qui se manifestent à la surface des matériaux. L'ensemble de ces mesures sont disponibles à l'adresse <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/curet/>. La figure 2.7 présente quelques types de matériaux mesurés.

### ***Système de mesure de la BRDF de Matusik et al. [36]***

Ce système a été conçu principalement pour mesurer des BRDFs isotropes. Il est com-

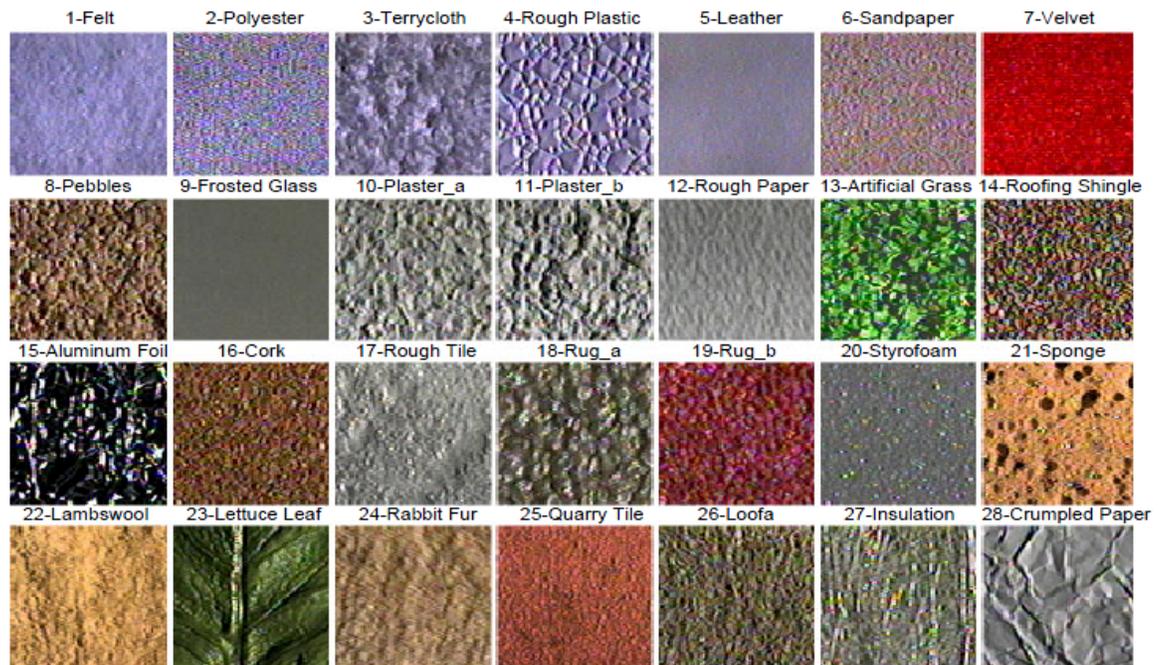


Figure 2.7 – Quelques types de matériaux mesurés par Dana et al. [10].

posé essentiellement par les éléments suivants :

- *QImaging Retiga 1300* (la résolution de la caméra est de  $1300 \times 1030$ ).
- Un ordinateur de contrôle *Kaidan MDT-19*.
- Une lampe *Hamamatsu SQ Xenon*.

La lampe tourne suivant une trajectoire d'un demi-cercle autour du centre de l'objet à mesurer (un matériau qui est placé sur une sphère). La caméra reste dans une position fixe. Le système prend au total 330 images HDR (*High Dynamic Range*) afin de couvrir toute la trajectoire de la lampe. Les directions respectives de la source de lumière sont écartées les unes par rapport aux autres d'un angle égal à  $0.5^\circ$ . Elles sont situées sur l'arc qui sépare la position de la caméra et la position opposée (à  $180^\circ$ ) par rapport à l'échantillon à mesurer. Le processus de mesure dure environ 3 heures. Pour chaque image HDR, le système capture 18 photos 10-bit/canal. La figure 2.8 correspond à une photo prise de ce système de mesure.

Les données prises nécessitent une étape de post-traitement. En fait, cette étape consiste à déterminer la valeur de la radiance pour chaque couple (direction d’observation, direction de lumière). Ainsi, un rayon d’origine d’un pixel dans l’image est intersecté avec la sphère du matériau pour déterminer le point  $P$ . La normale à la sphère au point  $P$ , le vecteur et la distance à la source lumineuse, et le vecteur vers le pixel de la caméra sont déterminés. On appelle  $\omega_i$  la direction de lumière et  $\omega_o$  la direction d’observation. Ensuite, la valeur d’irradiance au point  $P$  est calculée. Finalement, la valeur de la BRDF  $f_r(\omega_i, \omega_o)$  est donnée par le quotient “radiance du pixel / irradiance”.



Figure 2.8 – Système de mesure de la BRDF de Matusik et al. [36].

Les données des BRDFs sont exprimées dans la base de Rusinkiewicz [50] (le principe de cette transformation sera expliqué au chapitre 3). Ainsi, ils discrétisent les valeurs des angles  $\theta_h$ ,  $\theta_d$  en 90 *bins* et les valeurs de l’angle  $\phi_d$  en 360 *bins*. Au total, les  $90 \times 90 \times 360$  *bins* pour chaque composante de couleur constituent une haute résolution de discrétisation de la BRDF. La propriété de réciprocity permet de diviser ce nombre de *bins* par deux.

Pour chaque type de matériau mesuré, on obtient entre 20 et 80 millions de valeurs de la BRDF associée. Par conséquent, Matusik et al. moyennent l’ensemble des valeurs qui appartiennent au même *bin*, ce qui permet de réduire le bruit introduit par le processus de capture.

Ce dispositif a été utilisé pour mesurer des BRDFs de 100 types de matériaux incluant

des métaux, des tissus, des plastiques, etc. La figure 2.9 montre quelques exemples de BRDFs mesurées avec ce système.

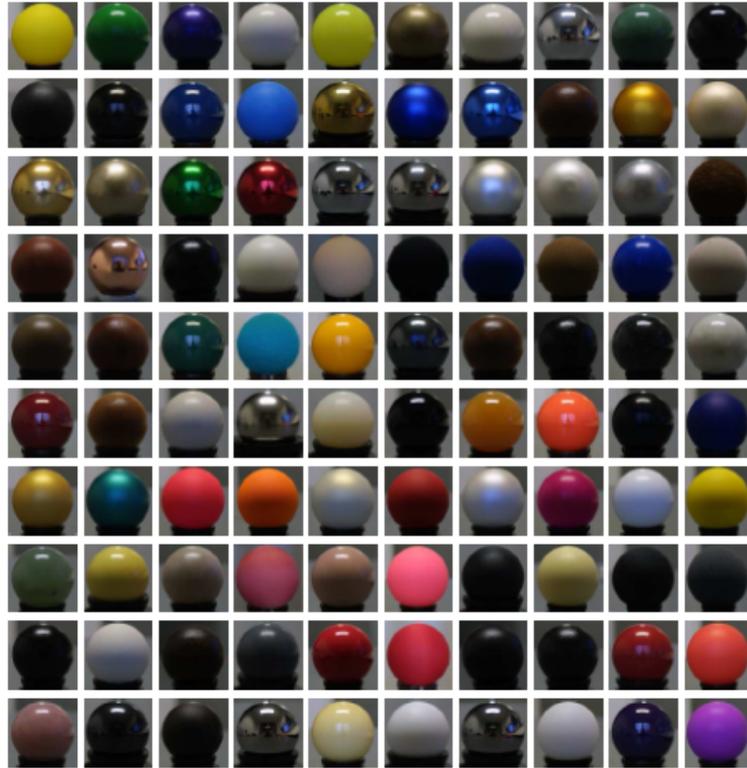


Figure 2.9 – Quelques exemples de photos réelles de BRDFs mesurées par Matusik et al. [36].

## 2.4.2 Simulation de la BRDF

### 2.4.2.1 Méthode de Cabral et al. [6]

Cabral et al. [6] furent les premiers à proposer une technique de simulation de la BRDF. Quelques méthodes en ont découlé, dont le principe général est de faire une transcription à l'échelle macroscopique des phénomènes microscopiques.

L'idée de base de Cabral et al. consiste à approximer la BRDF d'un matériau défini par une carte d'élévations. Elle utilise une approximation de la visibilité pour déterminer la proportion de la lumière provenant de la direction  $\omega_i(\theta_i, \phi_i)$  qui est réfléchié dans une direction  $\omega_o(\theta_o, \phi_o)$  par le matériau. La carte d'élévations est formée par une grille de

$m \times m$  quadrilatères divisés en un total de  $2m^2$  triangles  $S_i$ . En tenant compte des phénomènes d'ombrage, les auteurs estiment la quantité de lumière réfléchie dans certaines directions  $E = \{V_k \mid k = 1, n\}$ . Ces directions sont le résultat d'un échantillonnage régulier de l'hémisphère situé au-dessus de la micro-géométrie. A chaque direction  $V_k \in E$ , ils associent un *bin* défini par l'ensemble des directions qui sont plus proches de  $V_k$  que de n'importe quelle autre direction  $V_{k1} \in E$  avec  $k \neq k1$ . Cet ensemble est décrit par  $C_k = \{V \in D \mid \text{Nearest}(V) = k\}$ .  $d\omega_k$  représente la mesure de l'angle solide du *bin*  $C_k$ . L'expression analytique de la BRDF est donnée par l'équation suivante :

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) = \frac{\sum_{j=1}^{2m^2} \delta(k - \text{Nearest}(R_o)) F(N_j, \omega_i) B_j(\omega_i \cdot N_j)}{(\omega_i \cdot N) d\omega_k dA(V_k \cdot N)} \quad (2.6)$$

avec :

- $R_o = (\theta_o, \phi_o)$ ,  $\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$ ,
- $\text{Nearest}(R_j)$  : l'indice de la plus proche direction  $V_k$  de l'ensemble  $\{V_k \mid k = 1, n\}$ ,
- $N_j$  : la normale au triangle  $S_j$ ,  $N$  : la normale au plan moyen de la microstructure,
- $B_j$  : l'aire du triangle  $S_j$  qui réfléchit la partie non occultée des directions d'incidence,
- $F$  : le facteur de Fresnel entre  $N_j$  et  $\omega_i$ .

L'aire  $B_j$  est approximée en utilisant l'*horizon map* (cf. paragraphe suivant). Pour un angle d'incidence  $\theta_i$ , ils déterminent les angles d'horizon  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  des trois sommets du triangle  $S_j$ .  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  sont calculés par interpolation si  $\theta_i$  ne correspond pas à une entrée dans la table d'horizon. Dans le cas où  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  sont tous supérieurs à  $\theta_i$ , le triangle  $S_j$  est complètement illuminé. Dans le cas où ils sont tous inférieurs, le triangle  $S_j$  est totalement en ombre. Dans le cas où quelques angles sont supérieurs et d'autres sont inférieurs à  $\theta_i$ , ils approximent la position de deux points sur deux arêtes de  $S_j$ , pour lesquels  $\beta_k = \theta_i$ ,  $k = 1, 2$  ou  $3$ . Ainsi,  $S_j$  est subdivisé en un triangle et un quadrilatère, où un est dans l'ombre et l'autre est dans la lumière.

Pour l'estimation de la visibilité dans la micro-géométrie, les auteurs ont utilisé la technique d'*horizon map* introduite par Max [38]. Elle consiste à déterminer l'élévation de l'horizon pour un point de la surface et une direction donnée tangente à la surface. Max a construit une carte d'horizon pour une surface définie par une carte d'élévations. Pour un point donné de la surface, Max détermine l'angle de l'horizon pour huit valeurs différentes (à tous les  $45^\circ$ ) de l'angle  $\phi$  défini dans le plan perpendiculaire à la normale. Les directions intermédiaires sont calculées par interpolation.

Cette technique a été appliquée initialement pour ajouter des effets d'ombrage sur une surface de type carte de normales (*bump map*). En réalité, la surface est d'abord définie comme une carte de hauteurs (*displacement map*), dont la carte d'horizon est extraite, ce qui permet l'ombrage sur la carte de normales.

La méthode de simulation de Cabral et al. a été testée dans le calcul de la BRDF d'une surface dont la micro-géométrie est générée aléatoirement et définie comme une carte d'élévations. La résolution de la BRDF est de  $24 \times 24 \times 24 \times 24$ . Le temps de calcul de l'ensemble des valeurs de cette BRDF est 12 heures sur un VAX 11/785 (soit moins de 20 secondes sur un ordinateur contemporain).

En résumé, nous constatons que, malgré que cette méthode ait été conçue pour des surfaces définies par des cartes d'élévations et que le calcul d'illumination se restreigne à l'illumination directe, les résultats obtenus sont satisfaisants.

Cette technique ne calcule que l'illumination directe et n'exploite pas le GPU. Dans ce contexte, les contributions de tous les triangles de la micro-géométrie sont prises en compte. La figure 2.10 présente un exemple de scène dont la BRDF de la sphère a été simulée avec la méthode de Cabral et al. (1987) [6].

#### **2.4.2.2 Méthode de Westin et al. [67]**

Cette méthode consiste à simuler la réflexion de la lumière à la surface d'une structure micro-géométrique quelconque. Elle permet de modéliser la BRDF à l'échelle macroscopique à partir de la simulation des phénomènes de dispersion optique à l'échelle microscopique. En fait, à cette échelle, des modèles élémentaires de réflexion sont utilisés tels que la réflexion spéculaire parfaite, la réflexion diffuse parfaite et la réflexion



Figure 2.10 – Sphère réfléchissante de la carte d’environnement de Cabral et al. [6].

diffuse directionnelle [17]. D’une manière générale, il est supposé que l’interaction entre la lumière et la matière à l’échelle microscopique est complètement décrite par l’optique géométrique. Cette modélisation trouve ses origines dans le modèle physique de réflexion de micro-facettes miroirs de Torrance et Sparrow (1967) [59].

Westin et al. [67] encodent la BRDF sous la forme d’un produit matriciel en utilisant les harmoniques sphériques :

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) = \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n Y_j(\theta_i, \phi_i) m_{jk} Y_k(\theta_o, \phi_o) \quad (2.7)$$

$$= \mathbf{Y}^T(\theta_i, \phi_i) \mathbf{M} \mathbf{Y}(\theta_o, \phi_o); \quad (2.8)$$

où  $\mathbf{Y}(\theta, \phi)$  est un vecteur colonne de la fonction de base des harmoniques sphériques en  $(\theta, \phi)$ .

La détermination des coefficients de la matrice  $\mathbf{M}$  suffit pour caractériser la BRDF. Pour ce faire, Westin et al. [67] utilisent l’algorithme de lancer de rayons pour générer des résultats physiquement corrects. Ils estiment les coefficients de  $\mathbf{M}$  par une méthode nu-

mérique de Monte Carlo.

$$m_{jk} = \tilde{m}_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N N g_k(U_n, V_n) \mathbf{Y}_j(U_n) \quad (2.9)$$

$$\text{avec} \quad g_k(U_n, V_n) = \frac{R(U_n, V_n)}{\cos \theta_o} \mathbf{Y}_k(V_n). \quad (2.10)$$

$R(U_n, V_n)$  est l'atténuation du rayon réfléchi incident  $U_n$  dans la direction  $V_n$ . L'angle  $\theta_o$  correspond à l'angle entre la direction d'observation  $V_n$  et la normale au plan moyen de la micro-géométrie (plan en rouge dans la figure 2.11). Cette figure présente un exemple possible d'une structure micro-géométrique d'une surface selon une carte d'élévations. Westin et al. [67] lancent beaucoup de rayons dans des directions aléatoires  $U = (\theta_i, \phi_i)$  vers la surface. Chaque rayon possède une certaine quantité d'énergie. Lorsque le rayon atteint un point sur la micro-géométrie, l'énergie lumineuse est réfléchie dépendamment des propriétés optiques de la surface. La technique de *Monte Carlo Path Tracing* [20] est utilisée pour simuler les inter-réflexions de la lumière à l'échelle microscopique. Ainsi, si la surface est diffuse, un ensemble de  $n$  rayons sont émis avec  $(1/n)$ -ème de l'énergie vers des différentes directions (*bins*) échantillonnées de manière régulière sur l'hémisphère situé au-dessus de la surface. Dans le cas contraire (surface spéculaire), un seul rayon est envoyé dans la direction de la réflexion ou transmission parfaite avec toute l'énergie. La valeur de la radiance associée correspond à la valeur de l'énergie du rayon lorsqu'il quitte la micro-géométrie. Elle permet de mettre à jour les coefficients de la matrice  $\mathbf{M}$  en ajoutant à chaque élément  $m_{jk}$  la valeur  $\mathbf{Y}_j(U) \mathbf{Y}_k^T R / \cos \theta_o$ .

La matrice calculée  $\tilde{\mathbf{M}}$  représente une approximation de la matrice  $\mathbf{M}$  définie dans l'équation (2.7). L'algorithme de simulation ne garantit pas que  $\tilde{\mathbf{M}}$  soit symétrique. Ainsi, la BRDF résultante ne sera pas réciproque. Pour résoudre ce problème, Westin et al. ont proposé de moyenner les triangles supérieur et inférieur de la matrice  $\tilde{\mathbf{M}}$ . La matrice  $\frac{1}{2}(\tilde{\mathbf{M}} + \tilde{\mathbf{M}}^T)$  résultante correspond à l'estimation retenue de la matrice  $\mathbf{M}$ .

En conclusion, nous constatons que cette technique représente une généralisation des modèles analytiques proposés. Elle a permis d'enlever plusieurs restrictions sur la micro-géométrie. A cet effet, elle a été testée avec quelques types de matériaux. Ces derniers



Figure 2.11 – Échantillon de micro-géométrie dans Westin et al. [67] avec le plan moyen indiqué en rouge semi-transparent.

ont été modélisés par des micro-géométries différentes. A titre d'exemple, nous citons l'aluminium brossé, des tissus, des poils, etc.

Les figures 2.12 et 2.13 présentent des exemples des microstructures avec les BRDFs associées (utilisées dans des images de synthèse). Les résultats obtenus avec cette méthode ont montré l'efficacité de la technique Monte Carlo dans la modélisation de la dispersion de l'énergie lumineuse (illumination globale) à l'intérieur de la micro-géométrie d'un matériau, ce qui permet de simuler plusieurs types de surfaces ayant des apparences très réalistes. Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode reste au niveau du temps de calcul qui explose avec l'augmentation de la résolution du problème si on désire une solution convergée et sans bruit. Malheureusement, ces temps ne sont pas mentionnés dans l'article original [67].



Figure 2.12 – Micro-géométrie et BRDF associée (nylon) [67].

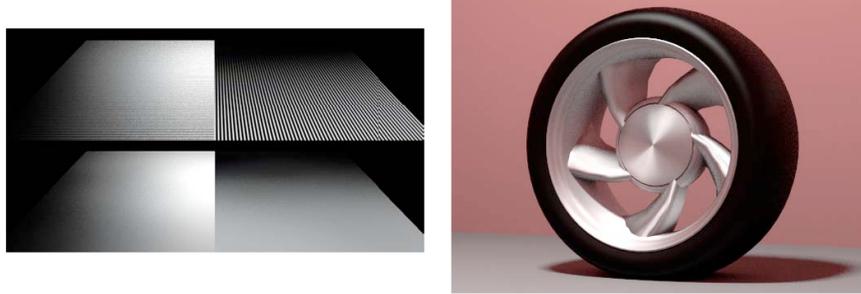


Figure 2.13 – Micro-géométrie et BRDF associée (aluminium brossé) [67].

## 2.5 Fonction de texture bidirectionnelle

### 2.5.1 Définition

La BTF “*Bidirectional Texture Function*” est une fonction 6D qui décrit la variation spatiale de la réflectance et de la méso-structure de la surface. En effet, elle encode les propriétés de réflectance d’un matériau sous la forme d’une texture qui dépend des directions d’observation et de lumière. Ainsi, la BTF intègre plusieurs phénomènes optiques d’un matériau complexe tels que l’auto-ombrage, l’inter-réflexion, la dispersion sous-surfacique, etc., indépendamment de la géométrie sous-jacente.

D’une manière intuitive, nous pouvons voir la BTF comme une texture de BRDFs. En conséquence, une BRDF encode la réflexion d’un point donné suivant différentes directions d’observation et de lumière. Souvent, les phénomènes décrits ci-avant violent la propriété de symétrie de ses BRDFs car l’énergie lumineuse est localement non conservée.

Une seconde interprétation de la BTF consiste à la voir comme un ensemble d’images successives. Ainsi, pour chaque paire de directions d’observation et de lumière, nous définissons une image de taille  $(M \times N)$  (taille de la texture). La figure 2.14 décrit ces deux représentations de la BTF.

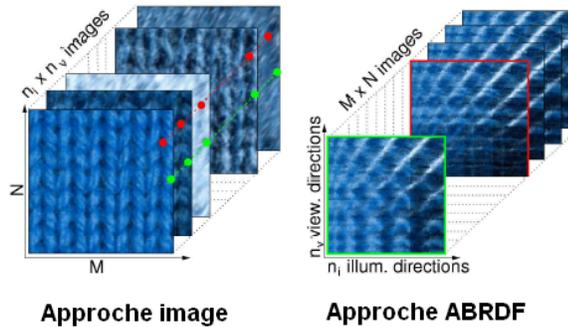


Figure 2.14 – Deux approches de représentation de la BTF [12].

### 2.5.2 Systèmes de mesure de la BTF

La BTF est une fonction multidimensionnelle (6D) dépendante au minimum de six paramètres. Ainsi, sa mesure est une tâche délicate. Cette difficulté se répartit à différents niveaux. Premièrement, la stabilité des propriétés physiques des instruments de mesure (source lumineuse, échantillon de mesure, etc.) constitue un critère relativement important qui a une influence directe sur la précision des données mesurées. Deuxièmement, la dimension élevée du problème (6D) limite généralement les résolutions de discrétisation des différents paramètres de la BTF. Dernièrement, les données issues d'une opération de mesure d'une BTF sont très volumineuses, voire des gigaoctets (GOs), malgré une basse résolution d'échantillonnage, ce qui nécessite un espace de stockage assez grand. Dans ce cadre général, peu de systèmes de mesure de BTFs ont été proposés. Nous avons déjà cité quelques exemples de systèmes qui permettent la mesure simultanée des BRDFs et BTFs [10]. Dans cette section, nous décrivons deux dispositifs qui ont été conçus essentiellement pour mesurer des BTFs. Le premier est celui de l'université de Bonn [41], dont les données sont les plus utilisées dans les traitements sur les BTFs. Le deuxième dispositif a été proposé par Han et Perlin [15]. Il permet la capture des BTFs à l'aide d'un kaléidoscope.

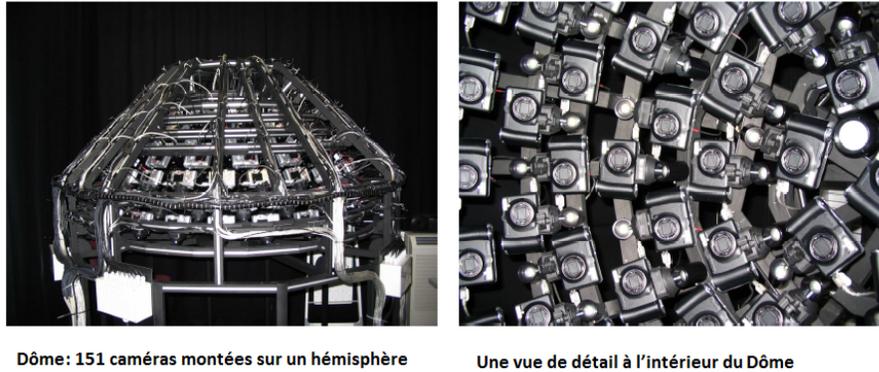
### ***Système de mesure de la BTF de l'université de Bonn [41]***

Le principe de l'étape de mesure de ce système consiste à prendre un ensemble dense de photos à partir des positions de vue prédéfinies (positions des caméras), échantillonnées d'une manière régulière sur l'hémisphère. Pour chaque position de vue  $v_1, \dots, v_m$ , Müller et al. [41] illuminent l'objet cible de mesure par des sources de lumière  $l_1, \dots, l_n$ , une après l'autre, positionnées aussi d'une manière équidistante sur l'hémisphère. Le résultat de mesure est un ensemble de photos  $\{I_{ij}\}_{i=1..m, j=1..n}$ , tel que  $I_{ij}$  correspond à une image prise à partir du point de vue  $v_i$  et illuminée par la source de lumière  $l_j$ . La figure 2.15 présente une illustration du positionnement des caméras et des sources de lumière utilisées par le système.

Ce système a été employé pour mesurer quelques BTFs de différents matériaux. Le tableau suivant liste ces différents types de matériaux. La dernière colonne du tableau correspond à la taille des BTFs encodées en format JPEG.

Matériel	Nombre d'images	Résolution de l'image	Nombre des directions	Taille
Corduroy	6561	260×260	81×81	332 MO
Impalla	6561	256×256	81×81	320 MO
Proposte	6561	256×256	81×81	342 MO
Pulli	6561	256×256	81×81	294 MO
Wallpaper	6561	256×256	81×81	360 MO
Wool	6561	256×256	81×81	353 MO
Ceiling	6561	800×800	81×81	2.16 GO
Walkway	6561	800×800	81×81	1.86 GO
Floortile	6561	800×800	81×81	2.57 GO
Pinktile	6561	800×800	81×81	1.54 GO

Tableau 2.I – Différents types de matériaux mesurés.



Dôme: 151 caméras montées sur un hémisphère

Une vue de détail à l'intérieur du Dôme

Figure 2.15 – Système de mesure de type Dôme [41].

### ***Système de mesure de la BTF de Han et Perlin [15]***

Ce système de mesure est basé sur le principe du kaléidoscope. Un kaléidoscope est un tube creux formé par  $n$  côtés. Dans le cas de leur article [15], les auteurs ont pris  $n = 3$ . À l'intérieur de chaque côté est collé un miroir. Ainsi, l'image d'un échantillon de surface placé à une extrémité du tube apparaît répliquée à l'autre côté du tube. Si le kaléidoscope est *tapered* (ses côtés font un angle  $\alpha$  avec l'axe principal du tube), l'image d'un échantillon de surface est répliquée sur une sphère virtuelle (voir la figure 2.16). En effet, l'image d'un objet subit plusieurs réflexions par les miroirs du tube jusqu'à ce qu'elle disparaisse à la silhouette de la sphère. Ce phénomène est équivalent à un ensemble de caméras placées sur l'hémisphère et orientées vers l'échantillon de surface. Par conséquent, la mesure de la BTF devient possible avec ce système. Donc, une caméra placée à une extrémité du tube peut voir l'échantillon de surface sous différents angles en même temps.

Concernant la source lumineuse, Han et Perlin ont utilisé un projecteur placé dans la même extrémité du tube que la caméra. Ainsi, l'opération de mesure de la BTF est effectuée d'une manière successive. À chaque étape, ils considèrent juste un sous-ensemble des pixels de l'image du projecteur (les autres sont mis en noir). Après des réflexions successives de la lumière sur les miroirs du tube, l'échantillon de surface est illuminé suivant une seule direction. Le nombre de combinaisons de directions d'observation et

de lumière dépend de la valeur de l'angle d'inclinaison des côtés du tube par rapport à son axe principal. A titre d'exemple, pour une inclinaison de  $9^\circ$ , nous avons 484 combinaisons de directions de vue/lumière. La précision des données mesurées est reliée avec le nombre de pixels de chaque triangle de l'image du kaléidoscope, ce qui peut être limitatif.

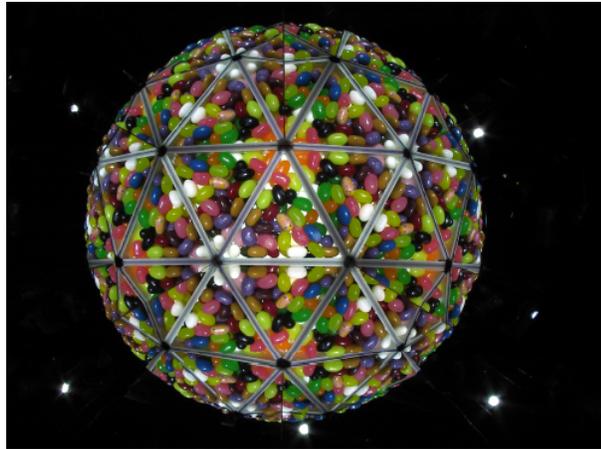


Figure 2.16 – Une vue prise avec un kaléidoscope avec les sources de lumière apparaissant comme des régions brillantes sur le fond noir [15].

## 2.6 Système de simulation

L'amélioration technique des systèmes de mesure des BTFs reste un domaine de recherche ouvert qui attire les intérêts des chercheurs. De nombreux problèmes sont encore à résoudre pour atteindre cet objectif. Ils sont liés principalement à :

- Le nombre limité des matériaux mesurés jusqu'à présent. Certains matériaux ne peuvent pas être capturés avec les systèmes existants, parce qu'ils sont trop grands, trop petits, trop éloignés, etc.
- La basse résolution de la discrétisation des paramètres de la BTF. Ainsi, de nombreux phénomènes optiques peuvent être manqués.
- Le stockage de la taille gigantesque du volume de données.

- La précision des mesures et la stabilité du système restent encore des critères à améliorer.

Pour combler ces limites, nous proposons un système virtuel de simulation des fonctions de texture bidirectionnelles. Les variables de la fonction BTF correspondent aux paramètres de notre système. Par conséquent, des fines résolutions deviennent théoriquement possibles. Il suffit de trouver les optimisations nécessaires pour y arriver.

### 2.6.1 Caméra virtuelle

Une caméra physique standard de capture utilise un système optique pour rendre tous les rayons captés parallèles entre eux. Pour différentes orientations de la caméra physique au-dessus de l'échantillon à mesurer, la taille de cet échantillon diminue avec un facteur  $\cos \theta$  selon l'angle  $\theta$  entre la normale au plan de l'échantillon et la direction de vue de la caméra. Les points au centre de chaque pixel changent donc à chaque mouvement de caméra. Il faut ainsi supposer que localement, les points autour d'une certaine zone observée dans un pixel sont suffisamment homogènes. Certaines images captées doivent aussi être corrigées. Malgré tous ces efforts, à angle rasant, ces hypothèses sont brisées. Ainsi, à angle rasant ( $\theta$  proche de  $90^\circ$ ), l'image de l'échantillon devient très étroite, causant ainsi toutes sortes de problèmes extrêmement difficiles à résoudre.

Pour réduire certains des problèmes associés à une caméra physique, notre système de capture utilise une caméra virtuelle basée sur la projection parallèle. Le principe de cette caméra consiste à intersecter les mêmes positions des points situés sur une surface plane à partir de n'importe quelle position de la caméra. La figure 2.17 illustre le principe de cette caméra.

Pour la concevoir, il suffit de fixer trois axes orthonormés  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  et de faire varier juste l'origine du repère de la caméra qui coïncide avec la position d'observation. La direction de projection est donnée par un point central fixe situé sur le plan moyen de la microstructure et la position de la caméra. Ceci correspond conceptuellement à faire

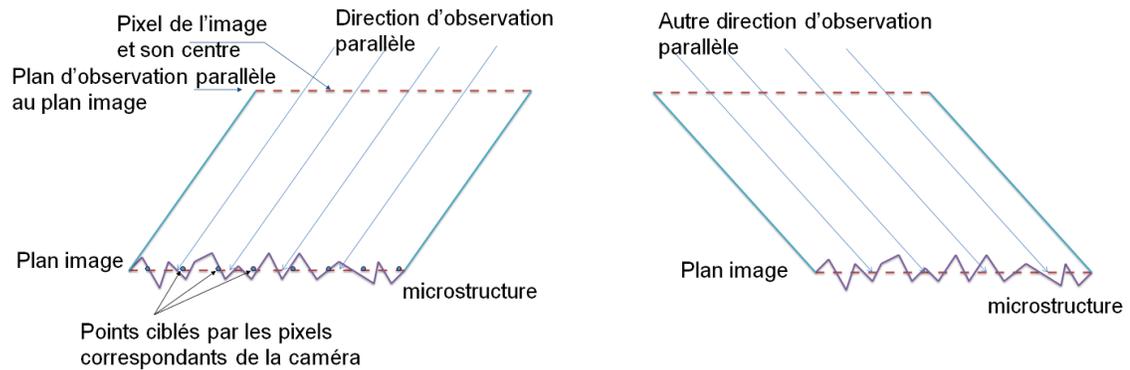


Figure 2.17 – Caméra parallèle.

glisser le plan d'observation afin que la direction entre un pixel de la caméra et le point d'intersection de la microstructure soit  $(x, y, z)$ .

Pour chaque texel situé sur le plan de base  $XY$  de la microstructure, le point d'intersection suivant une direction donnée dépend de la visibilité. Par exemple, pour une direction perpendiculaire au plan  $XY$ , ce point peut être proche du centre du texel, tandis que pour une direction rasante, ce point est souvent plus éloigné (voir la figure 2.18).

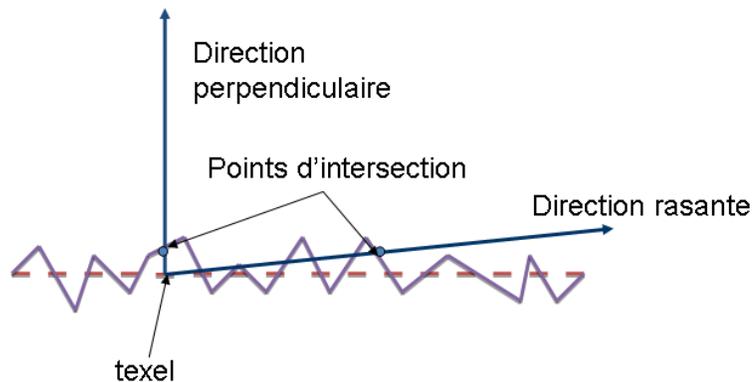


Figure 2.18 – Visibilité du texel pour deux directions différentes.

A la différence des systèmes physiques de mesure, notre dispositif de simulation ne requiert pas un post-traitement de registration des images entre elles. Ce traitement est effectué implicitement. En fait, pour une microstructure plane, les points d'intersections directs avec toutes les directions d'observation sont identiques (voir la figure 2.19).

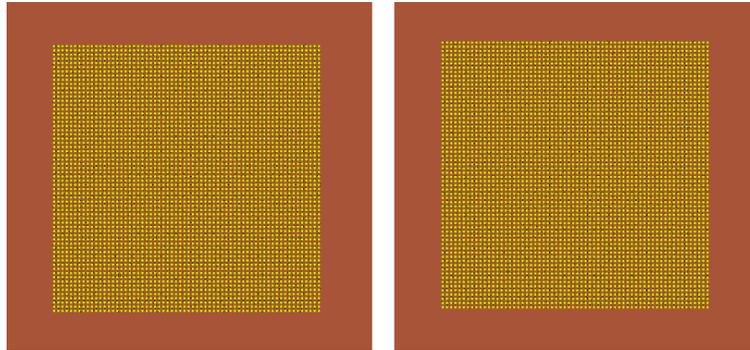


Figure 2.19 – Points d’intersection avec le plan  $XY$  pour deux directions différentes  $\theta = \{10^\circ, 85^\circ\}$  sont ici identiques.

### 2.6.2 Microstructures

Un designer pourra modéliser une microstructure en spécifiant les propriétés géométriques et optiques sous-jacentes (la BRDF en chaque point de la surface). La microstructure sera donc entièrement créée par le designer, mais en plus celui-ci devra spécifier un plan et une grille de points sur ce plan correspondant aux pixels observés. L’étape de simulation permet de générer des BTFs ayant une apparence très sophistiquée sans qu’elles soient nécessairement réalistes. La microstructure n’a pas non plus à se limiter à la définition d’un champ de hauteurs (*heightfield*), car elle peut avoir une forme complètement arbitraire. On peut parler d’une couche de cailloux, d’un milieu aquatique, d’une forêt, etc.

### 2.6.3 Caméra et source de lumière

La caméra et la source de lumière, toutes deux de type parallèle, pourront partager la même structure. Il s’agit ainsi d’une carte d’ombre (*shadow map* [68]) particulière pour chaque direction de lumière.

La détermination de la source de lumière pour chaque point de la microstructure pourra ainsi être calculée en projetant le point dans la carte d’ombre correspondante.

#### 2.6.4 Résultats préliminaires

Nous avons testé ce système pour effectuer la simulation de BRDFs isotropes et anisotropes. Le modèle isotrope testé est celui de Torrance-Sparrow [59] avec une géométrie plane. Les résultats obtenus (voir la figure 2.20) sont visuellement satisfaisants pour une résolution d'échantillonnage au-dessus de 40/80 des angles  $\theta$  et  $\phi$  des directions de lumière et d'observation. Pour simuler l'anisotropie, nous avons construit une

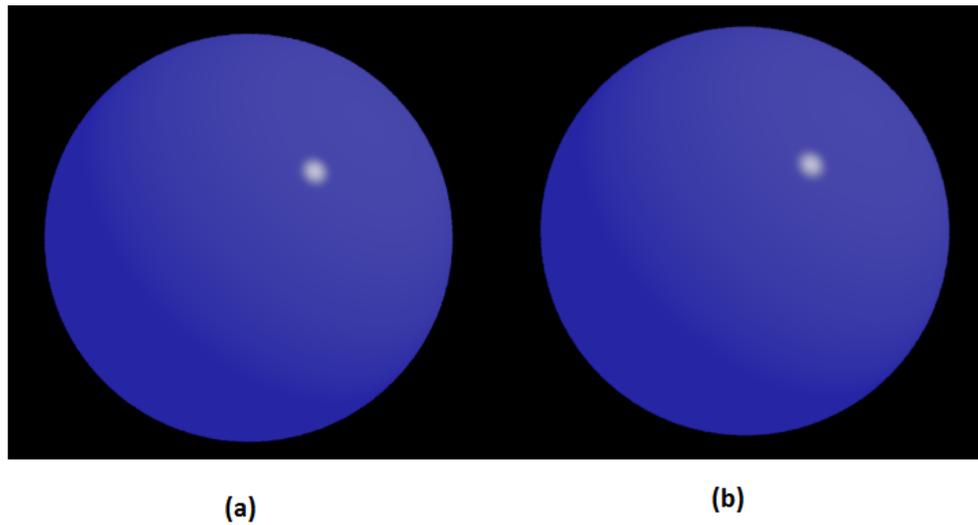


Figure 2.20 – (a) BRDF originale, BRDF simulée sur une microstructure plane d'un modèle de Torrance-Sparrow [59] : (b) résolution 60/120.

microstructure sinusoïdale. La BRDF est définie par la moyenne des radiances mesurées sur un échantillon de cette microstructure. Pour chaque combinaison de direction lumière/observation, nous lançons  $20 \times 20$  rayons. Comme dans le cas isotrope, la qualité visuelle des BRDFs simulées est jugée satisfaisante pour une résolution d'échantillonnage au-dessus de 40/80. La figure 2.21 illustre l'effet de la résolution sur la qualité visuelle de la BRDF anisotrope simulée où une résolution des directions réduite produit des régions de valeurs plus uniformes, telles des fantômes.

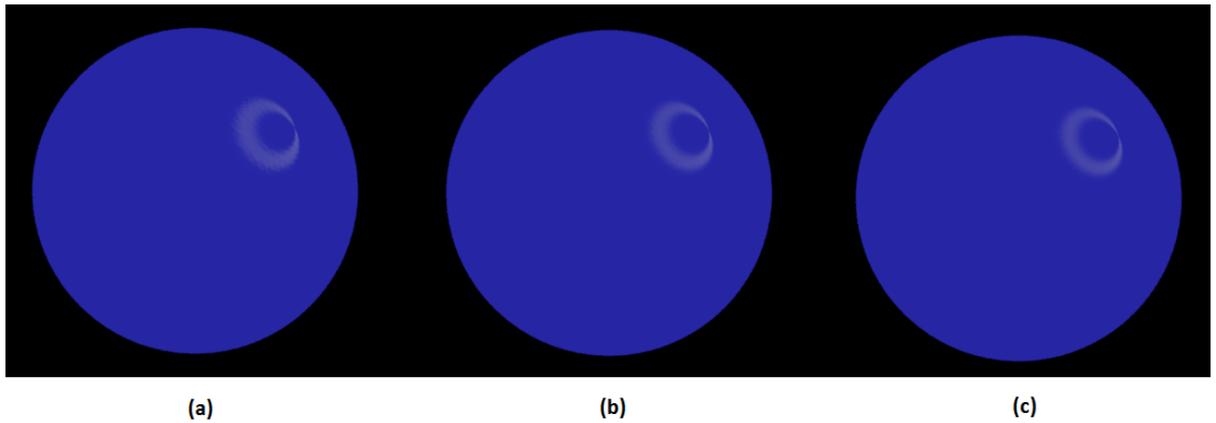


Figure 2.21 – BRDF anisotrope simulée sur une microstructure sinusoïdale : (a) résolution 40/80, (b) résolution 60/120, (c) résolution 80/160.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales techniques de mesure de la BRDF et de la BTF. Nous avons pu identifier les limites et les difficultés de ces méthodes de capture. Puis nous avons décrit notre système de simulation des BTFs. Dans le prochain chapitre, nous présenterons une étude détaillée des techniques de compression des BRDFs/BTFs.

## CHAPITRE 3

### COMPRESSION DE BTFS

#### 3.1 Introduction

La BTF est une fonction 6D qui dépend de deux variables planaires  $(u, v)$ , décrivant une texture 2D standard, de la direction d'observation  $\omega_o = (\theta_o, \phi_o)$  et de la direction de lumière  $\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$ . Cette fonction permet d'encoder plusieurs phénomènes optiques assez complexes modélisant les interactions lumière-matériau, ce qui explique la qualité de l'apparence des images utilisant les BTFS dans le rendu de la figure 3.1. Néanmoins,



Figure 3.1 – Exemple d'un t-shirt rendu par une BTF [40].

l'étape d'acquisition de la BTF reste un problème majeur qui limite leur utilisation. Ce problème se manifeste à deux niveaux. Premièrement, au niveau du temps d'acquisition et de la précision des données mesurées. Deuxièmement, au niveau de l'espace mémoire considérable pour stocker les données de la BTF. Par conséquent, il s'avère primordial de procéder à une étape de compression de ces données avant de les conserver.

Nous entamons ce chapitre par une description du problème de la compression des BTFS. Puis nous donnons une classification de quelques techniques de compression de la BRDF et de la BTF. Enfin, nous décrivons notre approche adoptée de compression de BTFS.

### 3.2 Description du problème

Pour illustrer l'espace mémoire requis pour stocker sans compression une BTF pour différentes résolutions de directions d'observation/lumière et de texture, nous avons rassemblé quelques résultats obtenus au tableau 3.1.

Résolutions observation / lumière	Résolution texture	Taille de la BTF
$5 \times 10 \times 5 \times 10$	$64 \times 64$	41 MO
$5 \times 10 \times 5 \times 10$	$128 \times 128$	163 MO
$5 \times 10 \times 5 \times 10$	$256 \times 256$	655 MO
$10 \times 20 \times 10 \times 20$	$64 \times 64$	655 MO
$10 \times 20 \times 10 \times 20$	$128 \times 128$	2621 MO
$10 \times 20 \times 10 \times 20$	$256 \times 256$	10485 MO

Tableau 3.1 – Taille mémoire d'une BTF pour différentes résolutions.

L'analyse de ces résultats montre que la taille de la BTF croît d'une façon linéaire par rapport à ses résolutions. Ainsi, aux hautes résolutions auxquelles nous comptons avoir recours, la taille mémoire de la BTF devient très volumineuse, ce qui montre l'utilité et même la nécessité de la compression et la difficulté de cette tâche. Par exemple, une BTF de résolutions de directions lumière/observation de  $(90 \times 180) \times (90 \times 180)$  et texture de  $1024 \times 1024$  nécessite un espace de stockage de 1100 TB. Rappelons que les BTFs encodées ici ne sont qu'en niveaux de gris. Le problème triple en taille si nous utilisons des BTFs en RGB, et pire en format HDR RGBE.

### 3.3 Méthodes de compression

Une BTF peut être interprétée comme une texture de BRDFs. Dans cette section, nous commençons par étudier quelques méthodes de compression de BRDFs, puis nous détaillons quelques techniques de compression dédiées spécifiquement aux BTFs.

#### 3.3.1 Compression de la BRDF

Une BRDF est une fonction 4D qui caractérise les propriétés de réflectance d'un matériau. Elle dépend des directions d'observation et de lumière. L'hémisphère situé

au-dessus du plan tangent au point de mesure constitue le domaine de définition de cette fonction. Pour cela, les coordonnées sphériques caractérisent généralement les paramètres de la BRDF.

Les données mesurées d'une BRDF occupent un espace mémoire considérable. Ce volume de données augmente d'autant plus que la résolution d'échantillonnage des paramètres de la BRDF devient de plus en plus fine. Divers travaux de recherche ont réduit la taille des données de la BRDF. A ce propos, certaines méthodes ont tenté de la factoriser, d'autres ont proposé un schéma d'ajustement de la BRDF à un modèle analytique, alors qu'un troisième groupe de techniques l'approchent par une combinaison linéaire d'une base de fonctions. Les prochaines sections décrivent quelques exemples de chacune de ces classes de méthodes.

### 3.3.1.1 Factorisation de la BRDF

La factorisation correspond à la décomposition d'une fonction multidimensionnelle en un produit de fonctions de dimensions inférieures. Ainsi, une BRDF, qui est une fonction 4D, peut être approximée par un produit de fonctions 2D ou 1D. Ces fonctions peuvent être discrétisées dans des textures 2D, ce qui permet de faire une illumination en temps réel d'un modèle géométrique grâce au support GPU des textures.

La première méthode de factorisation a été proposée par Kautz et McCool [21]. Ils ont approximé la BRDF sous forme d'une somme de produits de deux fonctions 2D en utilisant l'algorithme de décomposition en valeurs singulières (SVD) d'une matrice carrée.

$$f(\omega_i, \omega_o) = \sum_{k=1}^K P_k(F_1(\omega_i, \omega_o)) Q_k(F_2(\omega_i, \omega_o)). \quad (3.1)$$

Les fonctions  $F_1$  et  $F_2$  sont des fonctions de projection qui transforment un espace 4D déterminé par les directions d'incidence et de réflexion en un espace 2D. Les facteurs  $P_k$  et  $Q_k$  sont stockés dans des textures pour lesquelles une BRDF est facilement reconstruite en *pipeline* graphique.

McCool et al. [39] ont introduit pour cette tâche la technique de factorisation homo-

morphique. Ils approximent la BRDF par un produit de  $J$  facteurs, où chaque facteur correspond à une fonction 2D,

$$f(\omega_i, \omega_o) = \prod_{j=1}^J P_j(F_j(\omega_i, \omega_o)). \quad (3.2)$$

Suykens et al. [58] ont proposé une méthode de factorisation, nommée factorisation des matrices chaînées. Elle correspond à une généralisation de deux approches précédentes. En d'autres termes, les méthodes de Kautz et McCool [21], et de McCool et al. [39] représentent des cas particuliers de cette technique,

$$f(\omega_i, \omega_o) = \prod_{j=1}^J \sum_{k=1}^K P_{j,k}(F_{j,1}(\omega_i, \omega_o)) Q_{j,k}(F_{j,2}(\omega_i, \omega_o)). \quad (3.3)$$

Pour  $K = 1$  et  $Q_{j,k} = 1$ , nous nous trouvons dans le cas de la factorisation homomorphique [39]. Pour  $J = 1$ , nous nous trouvons dans le cas de la méthode de décomposition des matrices [21].

Toutes ces méthodes proposent de décrire d'abord la BRDF dans le repère de Rusinkiewicz [50] (figure 3.2). Le principe de cette transformation consiste à orienter l'un des axes du repère dans la direction de réflexion miroir parfaite. Cette paramétrisation a tendance à centrer le *highlight* au milieu de l'espace, souvent encodé sous forme d'image 2D.

Lawrence et al. [28] ont proposé une technique de factorisation dont le principe consiste à organiser la BRDF suivant chaque direction d'observation possible, puis ils appliquent une paramétrisation vers le repère de Rusinkiewicz [50]. Par conséquent, l'énergie de la BRDF est répartie d'une manière équivalente par rapport à la direction de demi-angle. Ensuite, les données de la BRDF sont stockées dans une matrice 2D. Le rang de cette matrice est proche de 1. Enfin, en utilisant l'algorithme NMF (Non-negative Matrix Factorization) de Lee et Seung [29], Lawrence et al. appliquent une première factorisation. Le résultat obtenu est un ensemble de termes de type  $F$  et  $G$ . Le

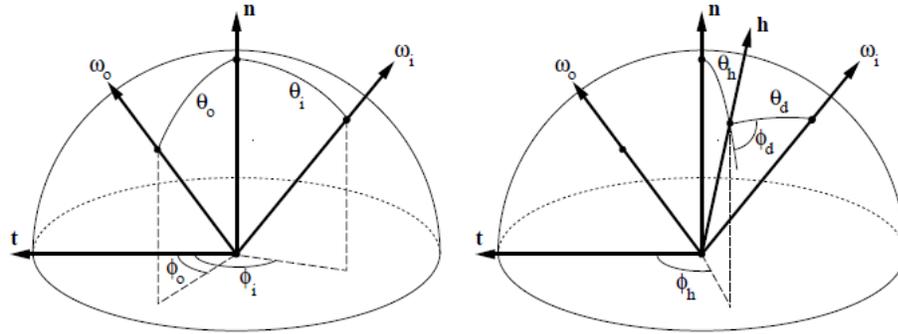


Figure 3.2 – Reparamétrisation de la BRDF dans le repère de Rusinkiewicz [50]. Au lieu de définir la BRDF comme (gauche) une fonction de  $(\theta_i, \phi_i)$  et  $(\theta_o, \phi_o)$ , on la considère comme (droite) une fonction de  $(\theta_h, \phi_h)$  et  $(\theta_d, \phi_d)$ .

facteur  $F$  dépend de la direction d'observation  $\omega_o$ , tandis que le facteur  $G$  est lié à la direction de demi-angle. Après, ils effectuent une seconde factorisation sur les termes  $G$ . Le principe de cette méthode est illustré à la figure 3.3. Les formules mathématiques de décomposition sont :

$$\rho(\omega_i, \omega_o)(\omega_i \cdot n) = \sum_{j=1}^J F_j(\omega_o) G_j(\omega_p) \quad (3.4)$$

$$\rho(\omega_i, \omega_o)(\omega_i \cdot n) = \sum_{j=1}^J F_j(\omega_o) \sum_{k=1}^K u_{jk}(\theta_h) v_{jk}(\phi_h). \quad (3.5)$$

### 3.3.1.2 Ajustement à un modèle analytique

L'ajustement des données de mesure de la BRDF constitue une méthode de compression en l'approximant par un modèle analytique de la BRDF. Ces modèles fournissent une expression explicite de la BRDF, définie généralement par une fonction mathématique paramétrique. Les valeurs de ces paramètres peuvent être choisies arbitrairement ou déterminées à partir de données de mesure. Dans d'autres cas, certaines valeurs particulières peuvent caractériser des types spécifiques de matériaux. Plusieurs modèles analytiques existent tels que Blinn-Phong [3], Cook-Torrance [9], Ward [65], Poulin-

Fournier [46], Lafortune et al. [26], Ashikhmin-Shirley [2] et d'autres.

L'objectif de l'opération d'ajustement est de déterminer les valeurs possibles des paramètres du modèle analytique qui décrivent au mieux l'ensemble des données de mesure de la BRDF. Cette formulation générale du problème peut être traduite mathématiquement par une minimisation de l'écart-type entre les valeurs mesurées et celles modélisées de la BRDF.

Quelques travaux [13, 44] ont été proposés pour résoudre le problème de compression de cette manière. Ils sont basés sur des méthodes d'optimisation non linéaire, telles que la technique de Levenberg-Marquardt, pour retrouver les meilleures valeurs des paramètres tout en minimisant l'erreur commise.

Néanmoins, ces méthodes présentent quelques lacunes relatives à la lenteur du temps de convergence de l'opération d'optimisation. De plus, certains modèles sont spécifiques à un certain type de matériau et sont définis dans un domaine angulaire précis. Enfin, il n'est pas clair si certains modèles permettent de représenter plusieurs BRDFs mesurées, considérant les simplifications introduites dans ces modèles.

### 3.3.1.3 Projection dans une base de fonctions

#### *Harmoniques sphériques*

Les harmoniques sphériques permettent de représenter les données définies sur une sphère. Cette représentation consiste à projeter les données dans un espace infini de fonctions de base d'harmoniques sphériques  $Y_l^m(\theta, \phi)$ . Les indices  $l$  et  $m$  correspondent respectivement à l'ordre et le degré. Toute fonction  $f$  intégrable sur une sphère est exprimée par une somme infinie de fonctions d'harmoniques sphériques,

$$f(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l C_l^m Y_l^m(\theta, \phi) \quad (3.6)$$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi}. \quad (3.7)$$

Les coefficients  $C_l^m$  sont calculés en projetant la fonction  $f$  sur chacune des fonctions de base  $Y_l^m$ . Ils peuvent être interprétés comme une pondération de chaque fonction  $Y_l^m$ ,

$$C_l^m = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\theta, \phi) Y_l^m(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi. \quad (3.8)$$

$P_l^m$  correspond au polynôme de Legendre. La compression réside au niveau de l'utilisation d'un nombre restreint de fonctions de base. La fonction reconstruite représente donc une approximation de la fonction originale. La qualité de la reconstruction dépend des propriétés spectrales des données et du nombre d'harmoniques sphériques utilisées. Par exemple, pour une fonction lisse, un nombre relativement petit de fonctions de base suffit pour reconstruire une bonne approximation.

Les harmoniques sphériques permettent de représenter toute fonction intégrable sur la sphère, en particulier la BRDF. Cabral et al. [6], Sillion et al. [53] et Westin et al. [67] les ont utilisées pour encoder leur BRDF sous forme d'une matrice de coefficients de sa projection sur un ensemble fini de fonctions de base.

### **Ondelettes**

La transformation en ondelettes est un outil mathématique d'analyse multi-résolution d'un signal. Elle offre une plus grande finesse au niveau de l'analyse du signal et permet de mieux s'adapter aux propriétés locales du signal. Elle offre donc une procédure élégante pour encoder les niveaux de détails.

Formellement, une ondelette est une fonction  $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$  qui vérifie la condition d'admissibilité assurant que la transformée en ondelettes est complète et conserve l'énergie.

$$C_\Psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{w} dw < \infty. \quad (3.9)$$

Cette condition implique que la moyenne de  $\Psi$  sur son domaine de définition est

nulle,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0. \quad (3.10)$$

A partir de l'ondelette  $\Psi$ , une famille d'ondelettes est définie par une dilatation d'un facteur  $a$  et une translation d'un facteur  $b$ ,

$$\Psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (3.11)$$

La transformée en ondelettes d'une fonction  $f \in L^2(\mathbb{R})$  est définie par :

$$Wf_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3.12)$$

Cette transformée correspond au produit de convolution de la fonction  $f$  par la fonction  $\Psi$  dilatée d'un facteur  $a$  et tradatée d'un facteur  $b$ . Elle peut être interprétée comme une mesure de variation de  $f$  dans un voisinage de  $b$  de taille proportionnelle à  $a$ . La fonction  $f$  peut être reconstruite par la formule suivante :

$$f(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Wf_{a,b} \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right) db \frac{da}{a^2}. \quad (3.13)$$

Il existe plusieurs types de fonctions d'ondelettes mères qui ont été proposées dans la littérature, tels que les ondelettes de Haar, de Daubechies, de Morlet, etc. En infographie, on utilise souvent les ondelettes de Haar pour leur simplicité.

Dans la suite, nous étudions les propriétés de la transformation par les ondelettes de Haar en une dimension. Nous définissons une famille de fonctions nommées fonctions d'échelles de Haar par :

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

et  $\Phi_{j,k}(t) = \Phi(2^j t - k) \quad k = 0, \dots, 2^j - 1.$

$$\Phi_{j,k}(t) = \begin{cases} 1 & \frac{k}{2^j} \leq t < \frac{k+1}{2^j} \\ 0 & \text{autrement.} \end{cases}$$

Pour chaque  $j$ , les fonctions  $\Phi_{j,k}(t)$  forment une base orthogonale du sous-espace vectoriel  $\mathbf{V}_j$  de dimension  $2^j$  contenant toutes les fonctions qui ont des valeurs constantes sur les  $2^j$  sous-intervalles. De même, nous définissons une famille de fonctions nommées les ondelettes de Haar par :

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 0.5 \\ -1 & 0.5 \leq t < 1 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

$$\text{et } \Psi_{j,k}(t) = \Psi(2^j t - k) \quad k = 0, \dots, 2^j - 1.$$

Les fonctions  $\Psi_{j,k}(t)$  forment aussi pour chaque  $j$  une base orthogonale du sous-espace vectoriel  $\mathbf{W}_j$  de dimension  $2^j$  et complémentaire à  $\mathbf{V}_j$  engendré par les fonctions  $\Phi_{j,k}(t)$ . Par conséquent,  $\mathbf{V}_j \oplus \mathbf{W}_j = \mathbf{V}_{j+1}$  où  $\mathbf{V}_{j+1}$  est l'espace vectoriel de dimension  $2^{j+1}$  engendré par les fonctions  $\Phi_{j+1,k}(t)$ .

Pour décomposer un signal discret en ondelettes, nous commençons par l'exprimer dans la base orthonormée de l'espace vectoriel  $\mathbf{V}_j$  où  $j$  représente la résolution du signal. Puis, nous cherchons une combinaison linéaire de ce signal dans les bases orthonormées des sous-espaces vectoriels  $\mathbf{W}_{j-1}$  et  $\mathbf{V}_{j-1}$ . Nous poursuivons ce traitement jusqu'à la valeur  $j = 1$ .

Principalement, la transformée en ondelettes est efficace dans la localisation des variations rapides, des sauts et de tout ordre de discontinuités dans les fonctions d'une manière générale. Elle permet de les détecter et de les analyser. La compression par ondelettes consiste à mettre à zéro les coefficients dont la valeur absolue est inférieure à un seuil fixé.

Les ondelettes ont été utilisées par certains travaux dans la représentation des BRDFs. Schröder et Sweldens [52] décrivent chaque tranche 2D de la BRDF par une combinaison linéaire d'un ensemble fini d'ondelettes sphériques. Lalonde et Fournier [27] ont étendu ce travail en encodant la fonction de réflectance 4D par une combinaison d'un ensemble de fonctions 4D d'ondelettes. Matusik et al. [37] ont proposé une base commune de fonctions d'ondelettes pour plus d'une centaine de BRDFs isotropes (i.e., 3D).

### 3.3.2 Compression de la BTF

Encore plus que pour la BRDF, l'étape de compression constitue un traitement inévitable pour l'utilisation de la BTF. De même, elle détermine le coût de son évaluation et sa qualité de reconstruction. Quelques méthodes ont été développées dans la littérature pour compresser une BTF. Ces méthodes sont classées en deux : les méthodes par décomposition en bases linéaires et les méthodes par approximation par un modèle analytique de BRDF. Dans les sections suivantes, nous décrivons quelques techniques de chacune de ces deux classes.

#### 3.3.2.1 Méthode de décomposition en bases linéaires

##### *Méthode de compression par ACP globale*

Sattler et al. [51] ont subdivisé les images de la BTF en des sous-ensembles disjoints  $S_j$ ,  $j \in (1, \dots, n)$ , par rapport à la direction d'observation. Les images d'un sous-ensemble  $S_j$  encodent l'effet de la variation de la position de lumière pour une direction d'observation fixe. Chaque image  $N_{ij}$ ,  $i \in (1, \dots, n)$  de  $S_j$  est représentée par un vecteur  $X_{ij} = (r_{1,1}, g_{1,1}, b_{1,1}, \dots, r_{h,w}, g_{h,w}, b_{h,w})$  de dimension  $3 \times h \times w$  où  $h$  et  $w$  correspondent respectivement à la hauteur et à la largeur de l'image en pixels. Sattler et al. [51] appliquent la méthode d'analyse en composantes principales sur l'ensemble des vecteurs  $X_{ij}$  de chaque  $S_j$ . Ils déterminent un ensemble de  $c$  images  $\{B_{1,j}, B_{2,j}, \dots, B_{c,j}\}$  qui minimisent l'erreur quadratique moyenne de projection des données originales.

Une image  $N_{ij}$  est définie dans la nouvelle base par :

$$N_{ij} = \sum_{k=1}^c p_{ikj} B_{kj} \quad (3.14)$$

$$\text{avec} \quad p_{ikj} = N_{ij} \cdot B_{kj}. \quad (3.15)$$

La figure 3.4 donne un aperçu sur la qualité de la reconstruction de la BTF pour différentes valeurs de  $c$ .

Koudelka et al. [23] ont utilisé la technique de décomposition en valeurs singulières dans la compression des BTFs. Ils interprètent la BTF comme un ensemble de BRDFs contiguës. La première étape de leur algorithme consiste à choisir quelques BRDFs représentatives de l'ensemble des données. Puis ils les mettent dans une matrice et appliquent l'algorithme de décomposition en valeurs singulières. Ils déterminent les  $k$  vecteurs descriptifs des données de la BTF. La figure 3.5 décrit la variation du taux d'erreur en fonction de la valeur de  $k$  pour quelques types de matériaux.

### ***Méthode de compression par ACP Locale***

Müller et al. [41] ont observé que les données des BTFs varient linéairement dans des zones locales. Ils proposent d'appliquer une analyse en composantes principales en chacune de ces zones, nommées cellules. Cette approche se voit une combinaison des deux méthodes de compression : Quantification Vectorielle (QV) et Analyse en Composantes Principales (ACP).

Le principe général de leur algorithme est décrit par les étapes suivantes :

- Subdivision des données de la BTF en  $k$  cellules distinctes. Pour chaque cellule  $j$ ,  $0 \leq j \leq k$ , on choisit d'une manière aléatoire un centre  $r_j$  et on définit une base formée de  $c$  vecteurs. La cellule  $j$  contient tous les échantillons de la BTF étant plus près de son centre  $r_j$  que des autres centres des cellules de la subdivision. Une

erreur de reconstruction des données est cumulée en chaque cellule.

$$\|x - \tilde{x}_j\|^2 = \|x - r_j - \sum_{i=1}^c \langle x - r_j, e_{i,j} \rangle e_{i,j}\|^2 \quad (3.16)$$

$\langle a, b \rangle$  : correspond au produit scalaire canonique.

$x$  : représente une BRDF.

- Pour chaque cellule  $j$ , on calcule un nouveau centre  $r_j$  en moyennant ses données.
- On applique la méthode d'analyse en composantes principales ACP pour recalculer une nouvelle base  $\{e_{i,j}\}_{1 \leq i \leq c}$  pour chaque cellule  $j$ .
- On redistribue les données de la BTF selon leur proximité aux nouveaux centres des cellules. On répète les étapes de l'algorithme jusqu'à ce que l'erreur de reconstruction soit inférieure à un seuil fixé.

Rappelons qu'une BTF peut être interprétée comme une texture de BRDFs ( $BTF_{\text{brdf}}$ ) ou comme un ensemble d'images successives ( $BTF_{\text{tex}}$ ) pour différentes directions observation/lumière. Par exemple, supposons que nous avons une BTF de résolution de  $256 \times 256$  pour la texture et de résolution de  $81 \times 81$  pour les directions lumière/observation. La  $BTF_{\text{brdf}}$  correspondante est représentée par  $256 \times 256$  vecteurs et la  $BTF_{\text{tex}}$  est encodée en  $81 \times 81$  vecteurs. Müller et al. [41] ont essayé d'étudier la performance de leur méthode en l'appliquant sur chacune de ces deux représentations. Les expériences ont montré que l'erreur de reconstruction de la  $BTF_{\text{brdf}}$  est inférieure à celle de la  $BTF_{\text{tex}}$ . La figure 3.6 donne un aperçu de la variation de cette erreur en fonction du nombre de cellules pour  $c = 8$ . Le taux de compression atteint est de 1 : 275.

### ***Méthode de compression par apprentissage***

Ruiters et Klein [49] décomposent les données de la BTF, encodées dans un tenseur  $\mathbf{B} \in \mathfrak{R}^{C \times L \times V \times P}$ , en un produit d'un dictionnaire et de deux tenseurs éparés :

$$B = \Gamma_{clj} X_{jvk} Y_{kp}. \quad (3.17)$$

$\Gamma_{clj} \in \mathfrak{R}^{C \times L \times D_1}$  est un dictionnaire dont les atomes représentent la dépendance de la couleur avec la direction de la lumière. Le tenseur  $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^{D_1 \times V \times D_2}$  définit une combinaison linéaire des atomes du dictionnaire pour chaque direction d'observation. Finalement, le tenseur  $\mathbf{Y} \in \mathfrak{R}^{D_2 \times P}$  décrit la distribution spatiale des BRDFs.

Les auteurs utilisent l'algorithme K-SVD dans la construction des différents éléments de l'équation. Cet algorithme est basé sur la mise-à-jour progressive d'un dictionnaire et d'un tenseur épars à partir des données traitées.

Néanmoins, l'application directe de K-SVD sur les données de la BTF, qui sont très volumineuses, est assez coûteuse. Ainsi, Ruiters et Klein [49] proposent de projeter les données dans un espace de dimension inférieure en utilisant l'algorithme de décomposition en valeurs singulières SVD,  $\mathbf{B} = \mathbf{USV}^T$ .

Dans un premier temps, ils appliquent le K-SVD sur la matrice  $\mathbf{SV}^T$  pour construire une première décomposition de  $\mathbf{B}$  sous la forme d'un dictionnaire  $\mathbf{D}$  et un tenseur  $\mathbf{P}$ . Puis ils reprojettent le dictionnaire  $\mathbf{D}$  dans l'espace original et appliquent une deuxième fois l'algorithme K-SVD sur le tenseur  $\mathbf{UD}$  qui permet de déterminer le dictionnaire  $\Gamma$  et le tenseur  $\mathbf{X}$ .

Havran et al. [16] ont développé une méthode de compression de BTFs basée sur la quantification vectorielle hiérarchique. Ils ont proposé un nouveau système de paramétrisation des variables de la BRDF qui décrit l'hémisphère des directions d'illumination par des coupes d'oignon. Dans leur cas, les auteurs ont juste exprimé les directions d'illumination dans le nouveau système, tandis que les directions d'observation sont définies avec les coordonnées sphériques standards. Les équations de transformation sont décrites par :

$$\begin{aligned} \{\alpha, \beta, \theta_o, \phi_o\} &\leftrightarrow \{\theta'_i, \phi'_i, \theta'_o, \phi'_o\}. \\ \theta_o = \theta'_o &\quad \beta = \arcsin(\sin \theta'_i \cos(\phi'_i - \phi'_o)). \\ \phi_o = \phi'_o &\quad \alpha = \arccos\left(\frac{\cos \theta'_i}{\cos \beta}\right). \end{aligned}$$

Les lignes entre les pôles A et B de l'hémisphère de la figure 3.7 sont décrites par

la variable  $\beta$ , les lignes placées uniformément sur l'hémisphère de la même figure sont contrôlées par la variable  $\alpha$ . Les auteurs commencent leur procédure de compression par la transformation des données vers l'espace luminance-chrominance de couleur et le nouvel espace spatial de paramétrisation des BRDFs.

Le schéma général de l'algorithme est présenté à la figure 3.8. Les BRDFs encodées dans la BTF sont indexées par une texture de taille égale à la résolution spatiale de la BTF. Puis chaque fonction 4D de BRDF est décomposée suivant l'angle  $\phi_o$  en un ensemble de fonctions 3D. D'une manière similaire, chaque fonction 3D est découpée en un ensemble de fonctions 2D par rapport à l'angle  $\theta_o$ . Les fonctions 2D décrivent les propriétés de réflectance du matériau de l'ensemble des coupes paramétrisées par  $[\alpha, \beta]$  dont chaque coupe définit une fonction unidimensionnelle.

Les différentes fonctions construites 1D, 2D, 3D, 4D sont normalisées pour obtenir les fonctions de densité de probabilité correspondantes. L'algorithme de quantification vectorielle est appliqué séparément sur les données de luminance et de chrominance. Dans le premier cas, un *code-book* de données est formé par des fonctions unidimensionnelles et des *code-books* d'indices et de facteurs de pondération sont créés aux différents niveaux du schéma de décomposition. Dans le cas des données de chrominance, la différence réside au niveau du choix d'un ensemble de valeurs prédéfinies de couleurs, puis l'algorithme de quantification vectorielle est appliqué pour construire les *code-books* d'indices et de facteurs de pondérations pour les différents types de fonctions (4D, 3D, 2D, 1D). Le taux de compression atteint est de 1 : 1000.

### 3.3.2.2 Méthode d'approximation par un modèle analytique

#### ***Clustered Polynomial Extension (PLM-C)***

Filip et Haindl [11] ont décomposé les images de la BTF en des sous-ensembles définis suivant la direction d'observation. Ainsi, chaque sous-ensemble caractérisé par une direction d'observation  $v$  est représenté par une fonction 5D  $R_v(r_1, r_2, r_3, \theta_i, \phi_i)$  appelée *surface reflectance field*. Cette fonction encode la radiance en chaque point de surface  $r = (r_1, r_2, r_3)$  avec  $r_1, r_2$  représentant les coordonnées planaires du point de surface et

$r_3$  correspondant à la bande spectrale. Les auteurs ont utilisé le modèle de  $n_l$  - lobes de Lafortune [24] pour modéliser chaque fonction  $R_v$ .

$$Y_v(r, i) = \sum_{k=1}^{n_l} \rho_{k,v,r} (\omega_i^T D_{k,v,r})^{n_{k,v,r}} \quad (3.18)$$

avec  $\omega_i(\theta_i, \phi_i) = [u_x, u_y, u_z]^T$  correspondant au vecteur de directions de la lumière. Chaque lobe dépend de cinq paramètres  $\rho, D_x, D_y, D_z, n$ . Ces paramètres sont estimés en utilisant l'algorithme d'optimisation non linéaire de Levenberg-Marquardt. Le modèle original de Lafortune et al. [24] est défini avec un seul lobe. Ce modèle est instable pour certaines combinaisons des angles d'illumination et d'observation. Même une augmentation du nombre de lobes ne résout pas le problème. Filip et Haindl [11] ont proposé de généraliser le schéma d'estimation des paramètres du modèle de Lafortune et al. [24] en ajoutant une seconde étape basée sur la mise en correspondance des histogrammes des images originales de la BTF et des images estimées par un 1-lobe du modèle de Lafortune et al. [24]. Ce traitement consiste à calculer l'histogramme cumulatif, pour chaque longueur d'onde, des images originales de la BTF et de leurs 1-lobes LM correspondants. Ces deux histogrammes cumulatifs représentent les entrées d'un algorithme de mise en correspondance entre eux. La fonction résultante est approximée par un polynôme de degré  $n_p$  et de coefficients  $a_{r_3,v,i,j}$ . La figure 3.9 illustre le principe général de cet algorithme. L'extension du modèle de 1-lobe en utilisant les coefficients  $a_{r_3,v,i,j}$  est modélisée par l'expression suivante :

$$\tilde{Y}_{i,v}(r) = \sum_{j=0}^{n_p} a_{r_3,v,i,j} Y_{i,v}(r)^j. \quad (3.19)$$

Cet algorithme permet de réduire la taille des données d'un facteur de 1 : 20. Néanmoins, la taille de données reste encore volumineuse pour qu'on puisse l'utiliser dans une application de rendu en temps réel. Le schéma de compression adopté consiste à choisir pour chaque champ de réflectance un sous-ensemble d'images représentatives en utilisant l'algorithme de Kullback-Leiber. Puis on applique l'algorithme *K-means* pour segmenter les images choisies en  $c$  agrégats. Pour chaque agrégat, on applique l'algo-

rithme décrit ci-avant. Le taux de compression atteint est de 1 : 20.

### 3.4 Approche de compression

Nous devons compresser la quantité énorme de données résultant de la phase de rendu de la BTF, de l'ordre de GO, à une taille beaucoup plus petite, de l'ordre de MO, qui peut être efficacement utilisée plus tard dans une application de rendu. Nous avons appliqué la méthode de factorisation de Lawrence et al. [28] à chaque texel individuel calculé (aBRDF) par notre application de simulation de BTF. Cette méthode a l'avantage d'être applicable avec différents types de paramétrisations de la BRDF. Aussi, une fonction d'*importance sampling* peut être définie à partir de ses facteurs non négatifs.

On rappelle que cette technique utilise l'algorithme de factorisation des matrices en valeurs positives (NMF), proposé par Lee et Seung [29], pour décomposer la matrice de la BRDF paramétrisée dans la base  $(\omega_o, \omega_i)$  en des facteurs de valeurs positives. Le schéma de factorisation peut être mathématiquement formulé comme suit : étant donné une matrice  $\mathbf{V}_{n,m}$  de dimension  $(n, m)$ , avec des valeurs  $V[i, j] \geq 0$ , et un entier positif  $k \leq \min(m, n)$ , on calcule deux matrices positives  $\mathbf{W}_{n,k}$  et  $\mathbf{H}_{k,m}$  tel que  $\mathbf{V} \approx \mathbf{WH}$  en minimisant la différence entre  $\mathbf{V}$  et  $\mathbf{WH}$ .

La factorisation proposée est tout à fait semblable à celle de Lawrence et al. [28], avec la différence que nous utilisons la méthode de décomposition en valeurs singulières pour déterminer la valeur de  $k$ . Mathématiquement, la formule utilisée est la suivante :

$$\rho(\omega_o, \omega_i) = \sum_{j=1}^J F_j(\omega_o) G_j(\omega_i). \quad (3.20)$$

Intuitivement, les BRDFs qui entraînent une haute variation suivant les directions de lumière et d'observation nécessitent plus de facteurs que les BRDFs possédant une basse variation. En utilisant la SVD, nous avons calculé les valeurs singulières  $\{\lambda_i\}_{i=1, \dots, \min(n, m)}$  de la matrice  $\mathbf{V}_{n,m}$ . Le paramètre  $k$  est défini par l'entier le plus petit qui satisfait l'in-

égalité suivante :

$$\left( \sum_{i=1}^k \lambda_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{\min(n,m)} \lambda_i \right) \geq \beta, \quad \text{avec } \beta \in [0, 1]. \quad (3.21)$$

Nous avons utilisé les vecteurs propres de la matrice  $\mathbf{V}_{n,m}$  pour initialiser les matrices  $\mathbf{W}_{n,k}$  et  $\mathbf{H}_{k,m}$  de l'algorithme de factorisation comme décrit par Boutsidis et Gallopoulos [4]. À ce point, chaque aBRDF (texel dans la BTF) est décomposée en  $k$  facteurs qui dépendent de  $(\theta_o, \phi_o)$ , appelés facteurs  $\mathbf{H}$ , et en  $k$  facteurs qui dépendent de  $(\theta_i, \phi_i)$ , appelés facteurs  $\mathbf{W}$ . Pour exploiter la corrélation spatiale des BRDFs sous-jacentes qui pourrait venir de texels très semblables de la BTF et donc, leurs facteurs  $\mathbf{W}$  et  $\mathbf{H}$ , nous avons appliqué la méthode d'analyse en composantes principales sur chacun des ensembles de facteurs.

La compression prend environ trois heures pour une BTF avec une résolution de texture de  $64 \times 64$  et douze heures pour une BTF de  $128 \times 128$ . Dans nos BTFs simulées, le paramètre  $\beta$  s'étend entre 0.7 et 0.8. Avec notre application de simulation de BTFs, nous avons pu synthétiser nos propres BTFs avec une résolution des directions ( $16 \times 32 = 512$ ,  $20 \times 40 = 800$  directions) plus fine que celles de l'université de Bonn (81 directions). Notez qu'il est toujours possible d'augmenter nos résolutions de BTFs, mais nous devons investir plus de temps, particulièrement dans l'étape de compression. Le tableau 3.II donne un aperçu sur les taux de compression obtenus en utilisant notre approche de compression. Malgré que ces taux sont à l'ordre de grandeur des méthodes de compression existantes, nous avons pu obtenir des faibles taux d'erreurs (RMSE).

À la figure 3.10, nous comparons une BTF compressée de bosses colorées à une version non compressée de la même BTF. Nous remarquons que les altérations sont plus visibles dans les zones d'ombres en raison des hautes discontinuités dans ces zones.

Méso-géométrie	Données orig. : compress.		Ratio	RMSE
plafond (900k)	48.4 GO	147 MO	1 : 330	0.073
tressage (200k)	12.1 GO	50 MO	1 : 240	0.062
<i>bump</i> coloré (350k)	7.5 GO	40 MO	1 : 190	0.068
brique (860k) (illumination directe)	48.4 GO	130 MO	1 : 372	0.071
brique (860k) (illumination globale)	48.4 GO	108 MO	1 : 448	0.065
cuir (820k)	48.4 GO	150 MO	1 : 323	0.076

Tableau 3.II – Taux de compression obtenus pour nos BTFs simulées.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales techniques de compression de BRDFs et de BTFs. Nous avons pu les classifier suivant leurs principes. Nous avons présenté à la fin de ce chapitre notre approche de compression basée sur la méthode de Lawrence et al. [28].

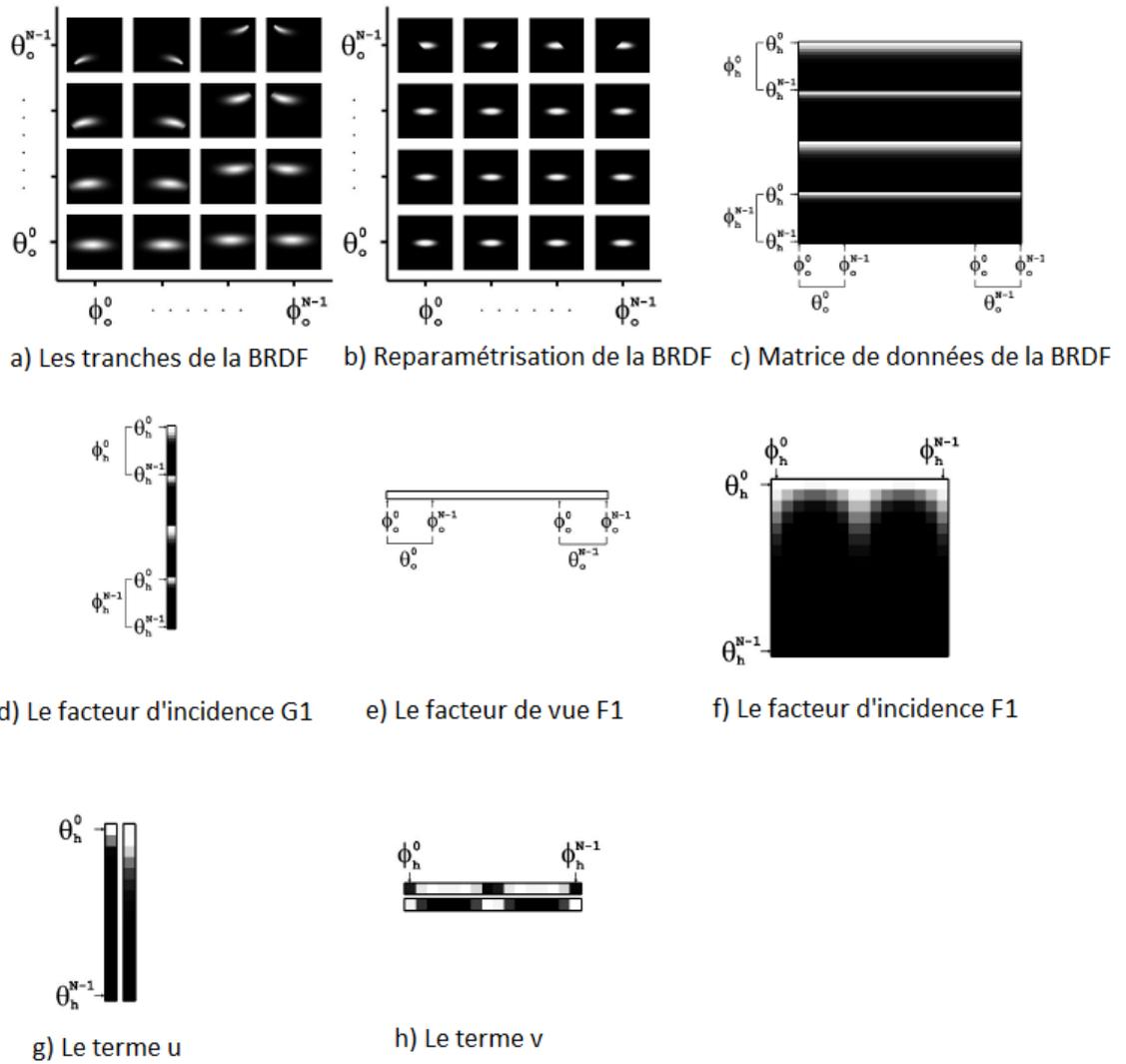


Figure 3.3 – Principe de factorisation de la méthode de Lawrence et al. [28].

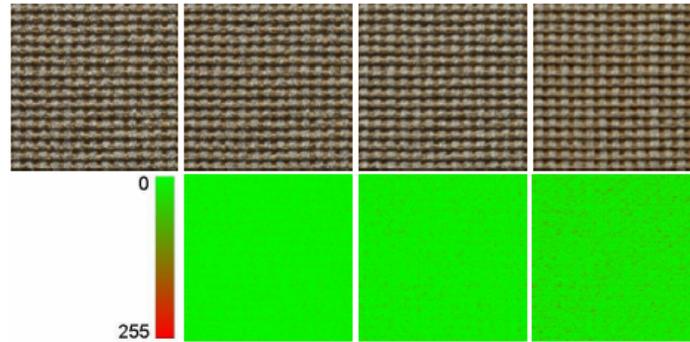


Figure 3.4 – Reconstruction d’une texture de la BTF pour une direction d’observation et une direction de lumière fixe : de gauche à droite, en haut : texture originale, 16, 10, 5 composantes. En bas : erreur de reconstruction des textures [51].

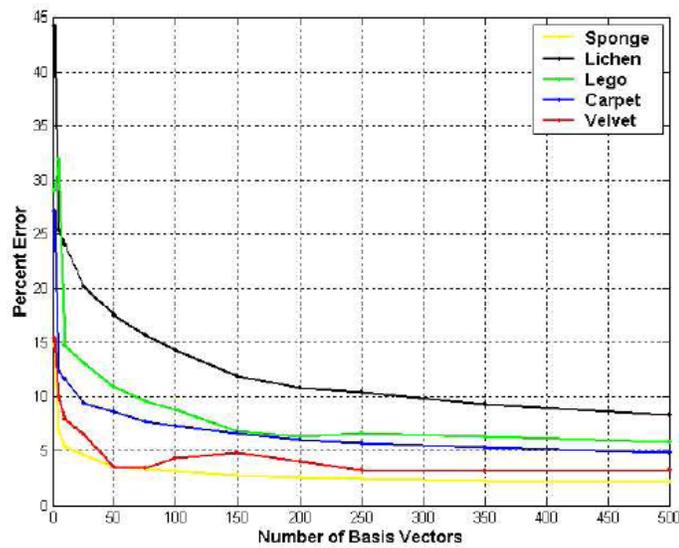


Figure 3.5 – Pourcentage d’erreur de la reconstruction de la BTF en fonction du nombre de vecteurs de base [23].

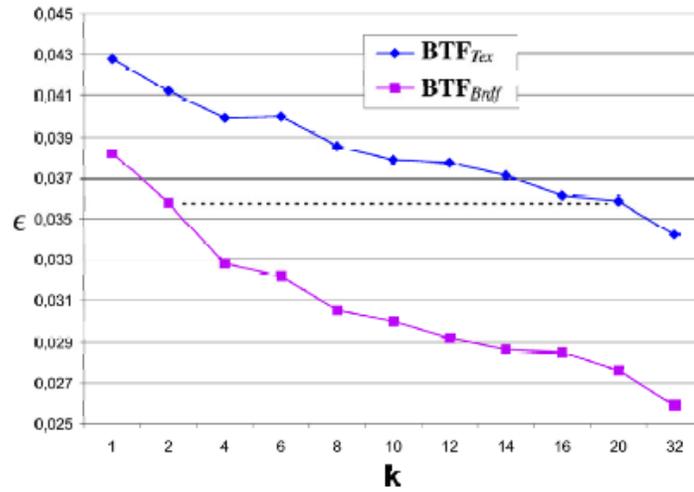


Figure 3.6 – L'erreur moyenne de reconstruction de la BTF en fonction du nombre d'agrégats [41].

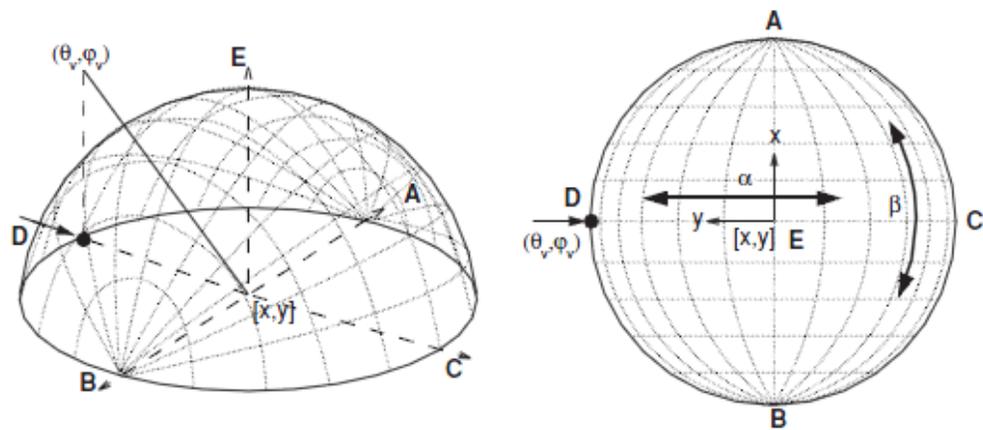


Figure 3.7 – Nouveau système de paramétrisation de Havran et al. [16].

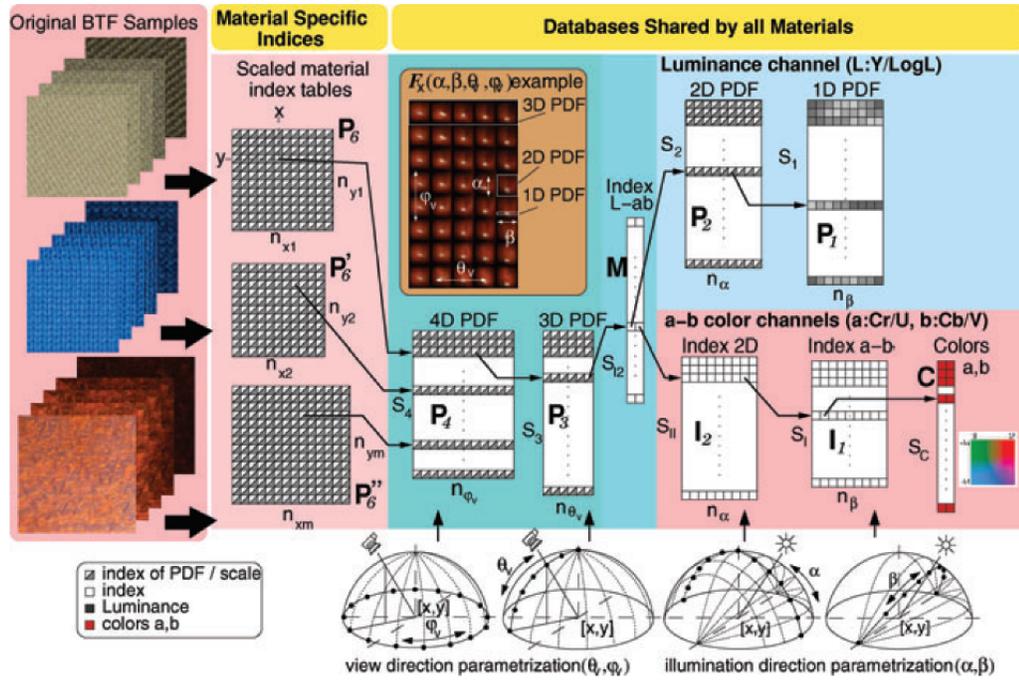


Figure 3.8 – Principe de la méthode de compression à base de la quantification vectorielle hiérarchique [16].

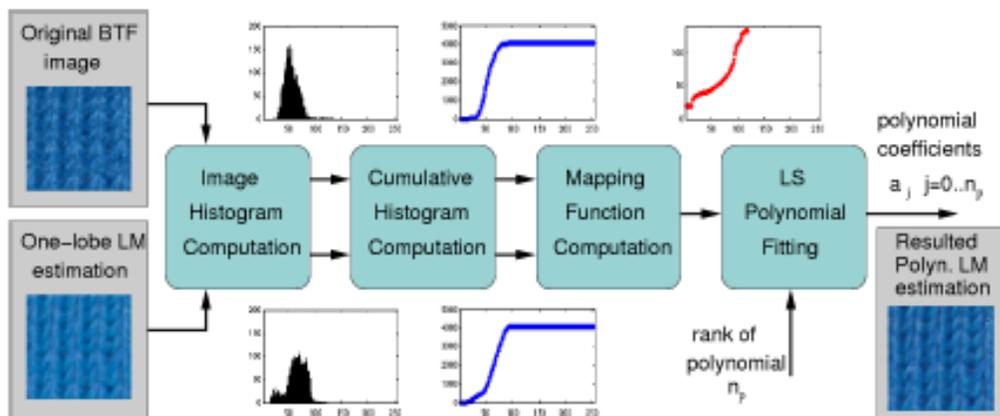


Figure 3.9 – Procédure de calcul des coefficients  $a_{r3,v,i,j}$  [11].

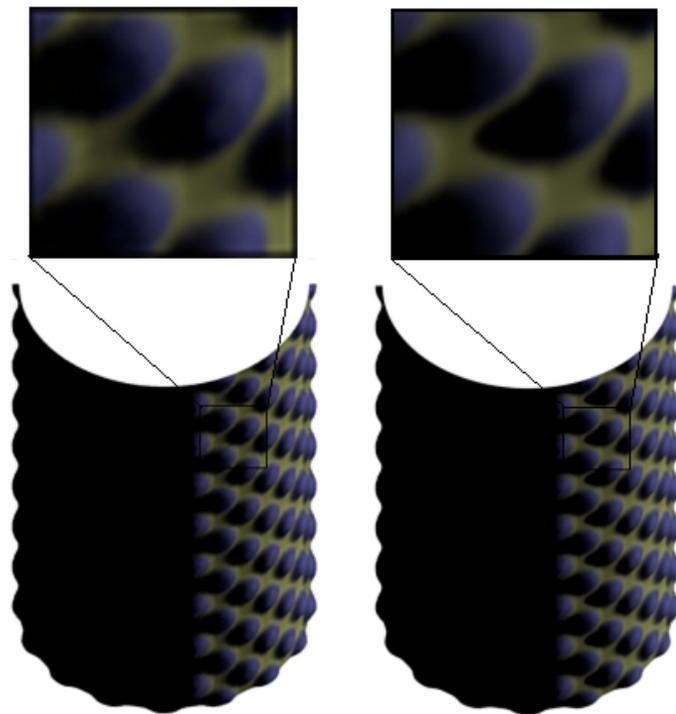


Figure 3.10 – BTF de bosses colorées : (gauche) compressée, (droite) non compressée.

## CHAPITRE 4

### APPROCHE DE SIMULATION

#### 4.1 Introduction

L'apparence des surfaces dépend des propriétés de ses éléments primitifs (géométrie, réflexion diffuse, réflexion spéculaire, etc.). Pour des surfaces opaques homogènes sans détail surfacique qui sont individuellement visibles, la BRDF reste suffisante pour caractériser leur réflexion lumineuse. Pour des surfaces hétérogènes, la BRDF varie sur la surface. La BTF encode cette variation spatiale de réflexion dans une texture 2D, i.e., une texture 2D pour chaque paire de directions d'observation et d'illumination. Une BTF capture ainsi tous les effets visuels incluant l'inter-réflexion, l'auto-ombrage, la dispersion surfacique, etc., qui peuvent affecter ou peuvent venir de différents points sur la surface. Dans le cadre de notre projet, nous nous intéressons à modéliser l'inter-réflexion qui se manifeste à l'échelle mésoscopique. Pour ce faire, nous avons recours aux algorithmes d'illumination globale. La première partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude des algorithmes d'illumination globale. Nous commençons par déterminer les critères de l'algorithme d'illumination globale à adopter dans notre contexte de simulation de BTFs. Puis, nous présentons une étude détaillée de quelques techniques d'illumination globale. Nous tenterons de mettre en lumière leurs avantages et leurs limites par rapport à des critères d'optimalité que nous cherchons à atteindre. La fin de cette partie est consacrée à la description de notre solution adoptée pour simuler certains effets lumineux.

Dans un autre registre, une BTF est définie par un ensemble d'images. Elle ne conserve aucune information sur la géométrie sous-jacente. Ainsi, elle ne reproduit pas les détails des silhouettes et ne prend pas en compte les occultations causées par les variations de courbure. Pour résoudre ce problème, nous avons augmenté la BTF par une structure 4D. La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la description de notre solution proposée. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous décrirons une approche de rendu de la BTF en multi-résolution.

## 4.2 Illumination globale

Le traitement des inter-réflexions de la lumière à l'intérieur d'une scène permet la production d'images de synthèse plus proches de la réalité. Pour ce faire, nous avons recours aux algorithmes d'illumination globale. L'objectif de ces algorithmes est de résoudre l'équation d'équilibre énergétique d'une scène, proposée par Kajiyama [20].

$$L(x, \theta_o, \phi_o) = L_e(x, \theta_o, \phi_o) + \int_{\Omega} f_r(x, \theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) L_i(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i. \quad (4.1)$$

Les éléments de cette équation sont :

- $x$  : point de la scène.
- $L$  : radiance au point  $x$ .
- $L_e$  : radiance d'émission propre au point  $x$  en direction  $\theta_o, \phi_o$ .
- $\theta_i, \phi_i$  : angles polaires de la direction incidente de lumière. Ils sont exprimés dans un repère local à  $x$ .
- $\theta_o, \phi_o$  : angles polaires de la direction d'observation. Ils sont exprimés dans un repère local à  $x$ .
- $f_r$  : BRDF au point  $x$ . Cette fonction décrit la proportion de la radiance réfléchie par rapport au flux de l'irradiance reçue.
- $\Omega$  : domaine d'intégration. Il est décrit par l'hémisphère centré en  $x$ .
- $L_i$  : radiance incidente des différents points de la scène.
- $\cos \theta_i$  : facteur de projection d'une surface infinitésimale.
- $d\omega_i$  : angle solide d'intégration.

Intuitivement, la radiance  $L$  en direction  $(\theta_o, \phi_o)$  à partir d'un point  $x$  de la scène correspond à la somme de sa radiance propre émise  $L_e$  et de la radiance réémise (radiance reçue et réfléchie à partir des points visibles dans la scène).

Pour résoudre cette équation, plusieurs algorithmes ont été proposés. Leur but ultime est de simuler les échanges énergétiques et les réflexions dans une scène d'une manière exacte. La réflexion de la lumière en un point donné dépend des caractéristiques des matériaux sous-jacents. Par exemple, pour une surface diffuse, la lumière est réémise également en intensité dans toutes les directions possibles. Le modèle lambertien décrit ce type de réflexion. Pour une surface miroir (lisse), la lumière est réfléchiée dans une direction unique particulière. Elle correspond à la direction symétrique à la direction d'incidence par rapport à la normale à la surface. D'une manière générale, la BRDF d'un matériau permet de déterminer l'énergie lumineuse réémise dans la direction de réflexion en fonction de la direction d'incidence. Les échanges énergétiques peuvent être calculés en utilisant un lancer de rayons ou une méthode à éléments finis.

#### 4.2.1 Critères de l'algorithme d'illumination

L'apparence des surfaces constitue un critère d'évaluation de la qualité des images synthétisées. Elle nécessite la détermination des caractéristiques physiques des matériaux et la distribution correcte de la lumière dans une scène, ce qui permet de modéliser les multiples phénomènes optiques qui se manifestent dans une scène, tels que les inter-réflexions de la lumière, les occultations, les dispersions sous-surfaciques, etc.

Tous ces effets doivent être pris en compte lors du développement d'une application de simulation réaliste des BTFs. Dans un autre registre, l'objectif d'un algorithme d'illumination globale est de résoudre le problème d'illumination en respectant toutes ces caractéristiques. Actuellement, malgré l'arrivée de processeurs graphiques (*graphic processing units* ou GPUs) puissants et plus flexibles, une simulation suffisamment précise de l'inter-réflexion de la lumière entre les surfaces d'une scène nécessite un temps de calcul considérable. Il est souvent de l'ordre des minutes et augmente avec la complexité de la scène et du transport de lumière. Dans le cas d'une BTF, ce temps explose puisqu'il faut potentiellement, selon l'algorithme d'illumination globale, faire ce calcul chaque combinaison de directions observation/lumière et peut atteindre même des jours. Par exemple, supposons que nous disposons d'une BTF composée de  $200 \times 200$  images et que le temps de simulation d'une image prend une minute. Ainsi, le temps de simulation

de la BTF serait d'environ 28 jours. Bien entendu, nous visons des résolutions de beaucoup supérieures à  $200 \times 200$ .

La motivation est grande de faire un rendu temps réel en présence de multiples phénomènes optiques. Par conséquent, il demeure nécessaire de précalculer certains traitements communs entre toutes les images de la BTF. De plus, il est obligatoire d'introduire des optimisations dans la détermination de la visibilité à l'intérieur de la scène, ainsi que dans la modélisation de transfert mutuel de l'énergie lumineuse entre les points de la scène.

Dans le but de simplifier le problème et comme introduit avant, nous proposons d'utiliser les mêmes vecteurs de directions pour la caméra et la lumière. Ces directions sont définies par un échantillonnage régulier de l'hémisphère supérieur du plan global de la micro-géométrie.

Dans la section suivante, nous effectuons une classification des algorithmes d'illumination globale selon les critères suivants :

- Possibilité de précalculer certains traitements et de les utiliser dans le rendu des différentes images de la BTF.
- Favoriser l'algorithme qui requiert le minimum d'espace mémoire dans son exécution.
- Favoriser la méthode la plus rapide en exécution.

#### **4.2.2 Classification des méthodes d'illumination globale**

L'illumination globale a constitué un domaine de recherche très actif durant les trois dernières décennies. Son objectif est de pouvoir modéliser les effets de dispersion et de réflexion de la lumière sur les surfaces des objets constitués et recouverts de différents détails géométriques. Le calcul de l'illumination globale est divisé en deux parties : l'illumination directe et l'illumination indirecte. L'illumination directe considère un seul rebond de la lumière entre l'observateur et la source lumineuse. En conséquence, plusieurs aspects de la lumière ne peuvent pas être capturés par ce type d'illumination.

L'illumination indirecte tient compte des multiples rebonds de la lumière à travers la scène. Ainsi, il sera possible de simuler divers effets complexes de la lumière. Cependant, le calcul de l'illumination indirecte reste toujours un traitement difficile qui prend un temps de calcul considérable, même avec une machine puissante ou une carte graphique performante. Le but des travaux de recherche dans ce domaine est de trouver un bon compromis entre la qualité des images générées, le temps de calcul requis et la taille des structures associées. Dans les sections suivantes, nous présentons les diverses techniques proposées en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites par rapport aux critères d'optimalité que nous cherchons à atteindre.

#### 4.2.2.1 Méthode de *Monte Carlo Path Tracing*

Le *Monte Carlo Path Tracing* (MCPT) [20] est l'une des premières méthodes proposées pour la résolution de l'équation du rendu. Cette technique permet de simuler en théorie "tous" les effets d'illumination globale, incluant les inter-réflexions diffuses et *glossy*. Elle consiste à suivre des rayons depuis l'observateur vers les objets de la scène. Pour chaque point visible dans la direction d'un rayon, l'équation du rendu est évaluée en utilisant la méthode d'intégration Monte Carlo. En effet, on lance  $N$  rayons par pixel qui se réfléchissent entre les objets de la scène et s'arrêtent lorsqu'ils atteignent la lumière. La réflexion d'un rayon sur une surface dépend des propriétés du matériau sous-jacent. A chaque intersection, un seul rayon est généré aléatoirement. Le calcul de l'irradiance de deux points distincts visibles est complètement indépendant. Ainsi, il est possible de le faire d'une manière parallèle. Par contre comme les chemins suivis peuvent être très différents, les valeurs de la radiance de pixels voisins dans l'image finale peuvent être non corrélées. Cet effet explique la présence de bruit dans les images synthétisées par cette méthode. Pour réduire l'impact du bruit, on peut lancer un grand nombre de rayons par pixel ou lancer ces rayons dans des directions plus importantes (*importance sampling*). Néanmoins, le temps de calcul devient alors considérable, de l'ordre d'heures. De plus, cette technique pourrait totalement rater certains phénomènes optiques, par exemple des caustiques fines, si le nombre de rayons lancés est relativement petit.

La résolution de ces problèmes fait l'objet de quelques variantes de la méthode Monte

Carlo, tels que le tracer de chemins bidirectionnels, la méthode Metropolis, etc. Le principe derrière chacune de ces techniques sera expliqué dans les sections suivantes.

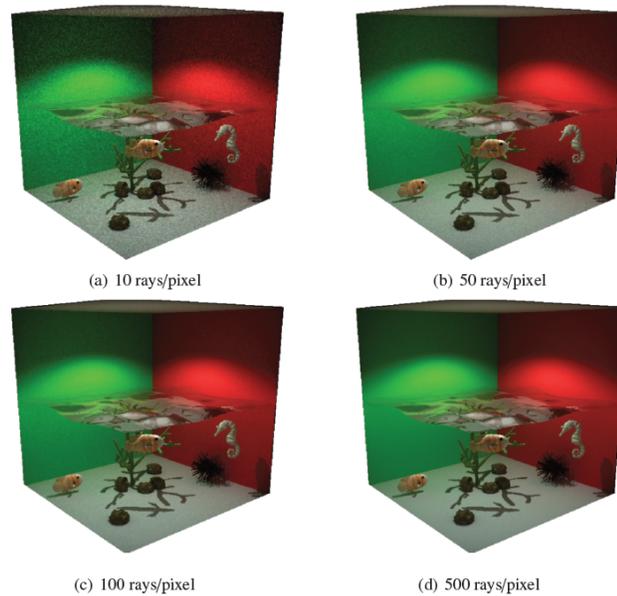


Figure 4.1 – Méthode de MCPT [5].

#### 4.2.2.2 Tracer de chemins bidirectionnels

L'algorithme de MCPT consiste à suivre  $N$  rayons à partir du point d'observation jusqu'à qu'ils atteignent une source lumineuse. Le *light tracing* est le dual du MCPT. Ainsi, le chemin optique est tracé à partir des sources lumineuses jusqu'à absorption par les surfaces diffuses. La technique du tracer de chemins bidirectionnels, proposée indépendamment par Lafortune et Willems [25] et Veach et Guibas [60], combine les deux approches. Elle constitue une variante de la méthode *Monte Carlo Path Tracing*. Elle consiste à tracer, en même temps, un chemin optique à partir de la source de lumière et un autre à partir de la position d'observation. Par conséquent, on aura les deux chemins suivants :

- un chemin qui commence à partir d'un point de surface  $y_o$ , point directement visible à partir du pixel de l'image. Puis, nous générons un chemin de longueur  $k$ .

Ce chemin est formé par une série de  $k + 1$  points de surfaces  $y_0, y_1, \dots, y_k$ . Sa longueur est contrôlée par la roulette russe. La probabilité de générer en particulier ce chemin est égale au produit de la valeur de la fonction de distribution de probabilités (PDF) de choix de chaque point  $y_i$  (en mathématiques statistiques, une PDF d'une variable aléatoire  $X$  réelle continue est une fonction  $f$  positive ou nulle sur  $\mathbb{R}$ , intégrable sur  $\mathbb{R}$ , et qui vérifie  $\int_{\mathbb{R}} f(t)dt = 1$ ).

- Un chemin de longueur  $l$  est généré à partir de la source lumineuse. Il est composé par les points de surface  $x_0, x_1, \dots, x_l$ .

En connectant chaque paire de points, dont chacun provient d'un chemin différent parmi les deux chemins générés, nous pouvons déterminer la contribution de chaque point des deux chemins dans le transport des flux lumineux par rapport au pixel courant.

La figure 4.2 donne un aperçu de disposition de ces différents points le long des deux chemins. A la différence de la technique MCPT, le tracer de chemins bidirectionnels per-

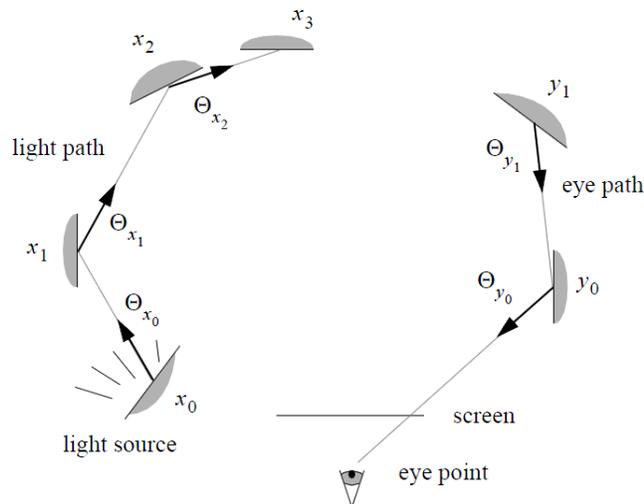


Figure 4.2 – Chemins générés à partir de la source de lumière et du point d'observation [25].

met de simuler plus aisément quelques effets lumineux complexes tels que les caustiques et la distribution de la lumière en présence de petites sources de lumière difficilement atteignables par MCPT.

### 4.2.2.3 *Metropolis*

La technique *Metropolis*, appliquée au calcul de l'illumination globale, a été développée par Veach et Guibas [61]. Ce modèle est basé sur les principes d'échantillonnage *Metropolis* des chemins lumineux. Cet algorithme permet de générer une séquence de chemins de transport de lumière en appliquant des mutations aléatoires sur des chemins précalculés. Des exemples de mutations consistent à ajouter ou supprimer un point dans un chemin, déplacer un point, etc.

L'algorithme commence par calculer un ensemble de  $N$  chemins aléatoires par MCPT. Des nouveaux chemins sont générés en appliquant des stratégies de mutations décrites ci-avant. Chaque mutation peut être acceptée ou refusée suivant la contribution du chemin échantillonné associée dans l'image finale. Par exemple, une mutation appliquée à un chemin  $x$  produit un nouveau chemin  $y$ . Si ce chemin  $y$  n'a aucune contribution dans le rendu de l'image finale (e.g., points successifs ne sont pas mutuellement visibles), sa probabilité d'acceptance est nulle et la mutation engendrée est rejetée.

L'avantage majeur de cet algorithme est que les mutations appliquées permettent de construire des chemins de lumière importants (ayant une forte illumination) et qui sont difficiles à déterminer, tout en restant non biaisés. Néanmoins, cette technique reste plus compliquée du côté implémentation surtout dans le choix des mutations à appliquer. De plus lorsque le nombre des chemins augmente, ceci entraîne une augmentation des mutations appliquées.

### 4.2.2.4 *Irradiance Caching*

La technique du *Irradiance Caching* a été introduite par Ward [66]. Cette méthode permet d'accélérer le calcul de l'illumination indirecte dans une scène entièrement diffuse. L'*Irradiance Caching* exploite le fait que l'irradiance le long d'une surface diffuse varie souvent d'une manière lisse. Ainsi, il suffit de déterminer l'irradiance à des points particuliers, et de faire une interpolation pour l'approximer sur le reste de la surface.

L'irradiance interpolée dans un point  $x$  est donnée par :

$$E(x) = \frac{W_i(x)E_i(x)}{\sum W_i(x)} \quad (4.2)$$

$$W_i(x) = \frac{1}{\zeta_i(x)} \quad (4.3)$$

$$\zeta_i(x) = \frac{\|x - x_i\|}{R_i} + \sqrt{1 - N_x N_{x_i}} \quad (4.4)$$

où :

- $R_i$  : moyenne harmonique des distances de surfaces visibles à partir du point particulier  $x_i$ . La moyenne harmonique de  $n$  points  $x_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , est donnée par  $\bar{x} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$ .
- $N_x$  : la normale au point  $x$ .
- $N_{x_i}$  : la normale au point  $x_i$ .
- $E_i(x)$  : l'irradiance au point  $x_i$  interpolée au point  $x$ .

Les points particuliers sont stockés dans un *octree*. Cette structure permet d'accélérer la recherche des points voisins à un point  $x$ . Leurs valeurs d'irradiance sont interpolées pour l'estimer au point  $x$ .

#### 4.2.2.5 *Photon Mapping*

La technique de *Photon Mapping* a été développée par Jensen [18]. Elle est composée de deux phases successives : une phase de propagation de photons et une phase de rendu. La première étape consiste à lancer des photons à partir des sources de lumière de la scène. Le nombre de photons lancés depuis une source lumineuse dépend de sa puissance. Chaque photon se propage par réflexion et transmission dans la scène jusqu'à ce qu'il soit absorbé par une surface ou qu'il quitte la scène.

Lorsque le photon intersecte une surface non spéculaire parfaite, il est stocké avec sa

direction incidente dans une structure globale appelée *photon map*. Pour faciliter la recherche des photons, un *kd-tree* est utilisé. Deux structures de *photon maps* sont calculées : un *caustic photon map* et un *global photon map*. Les caustiques se manifestent lorsque les photons sont transmis ou réfléchis par des surfaces spéculaires avant d'intersecter une surface diffuse. La densité de tels photons peut être très grande, requérant ainsi une structure dédiée pour ne pas pénaliser le *global photon map*. La distribution de photons des deux *maps*, qui constitue une répartition de l'énergie lumineuse à l'intérieur de la scène, permet de déterminer la valeur d'irradiance en tout point  $x$  sur la surface. Ainsi, la radiance pour une direction donnée est déterminée en multipliant l'irradiance au point  $x$  par la BRDF associée.

La deuxième étape consiste à calculer la valeur de radiance pour chaque pixel de l'image. Pour ce faire, on utilise un lancer de rayons. Ainsi, pour chaque rayon émis, nous déterminons le point visible directement. L'illumination de chaque point de contact se divise en deux contributions : l'illumination directe et l'illumination indirecte. L'illumination indirecte est calculée en utilisant le *photon map*. Théoriquement, cette valeur est donnée par la formule suivante :

$$L_r(x, \omega_o) = \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (n_x \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (4.5)$$

où :

$\Omega$  : hémisphère situé au-dessus de  $x$ .

$f_r$  : BRDF au point  $x$ .

$L_i(x, \omega_i)$  : radiance reçue au point  $x$  à partir de la direction  $\omega_i$ .

$n_x$  : la normale au point  $x$ .

Un photon dans le *photon map* représente un "paquet" d'énergie reçue par une surface. Ainsi, pour l'utiliser dans l'estimation de cette équation, la radiance  $L_i$  doit être exprimée en fonction du flux radiatif,

$$L_i(x, \omega_i) = \frac{d^2\Phi(x, \omega_i)}{(n_x \cdot \omega_i) d\omega_i dA}. \quad (4.6)$$

En utilisant les  $N$  plus proches photons du point  $x$ , la radiance est estimée par l'expression suivante :

$$L_r(x, \omega_o) = \sum_{i=1}^N f_r(x, \omega_i, \omega_o) \frac{\Delta\Phi_i(x, \omega_i)}{\pi r^2}. \quad (4.7)$$

$\Delta\Phi_i(x, \omega_i)$  correspond à la quantité d'énergie transportée par le photon  $i$  qui arrive au point  $x$  à partir de la direction  $\omega_i$  et  $r$  représente le rayon de la sphère de recherche.

Pour produire des images de meilleure qualité, une étape additionnelle de *final gathering* est appliquée. Elle consiste à estimer la radiance  $L_i(x, \omega_i)$  de l'équation (4.6) à des points directement visibles à partir du point  $x$  suivant les directions les plus importantes (*importance sampling*). Ce processus est répété d'une manière récursive à un ordre fixé. La figure 4.3 illustre l'effet de l'augmentation du nombre de photons voisins utilisés pour l'estimation de la radiance et du *final gathering* sur la qualité des images synthétisées.

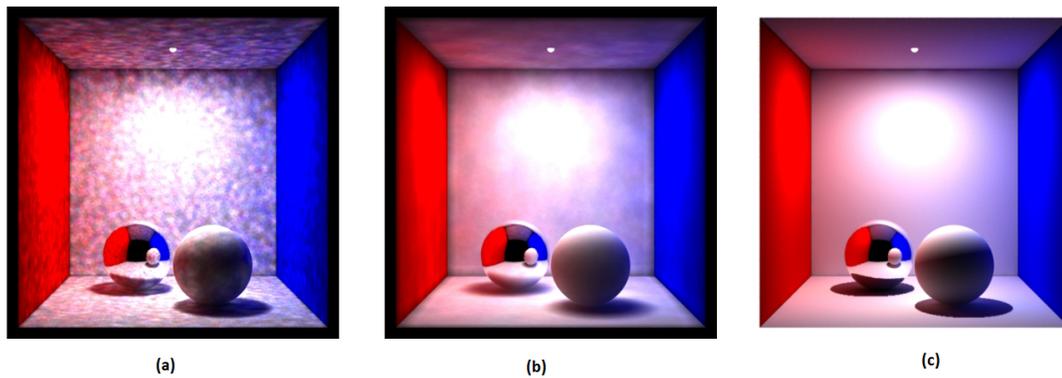


Figure 4.3 – *Photon mapping* : (a) voisinage de 50 photons, (b) voisinage de 500 photons, (c) *final gathering* [5].

#### 4.2.2.6 Radiosité

L'objectif de cette méthode est de modéliser les interactions lumineuses entre les surfaces diffuses. Cette idée provient de la théorie de transfert d'énergie sous la forme de radiations électromagnétiques. Les premiers algorithmes d'application de cette théorie pour résoudre l'équation du rendu sont apparus en 1984 [14]. La radiosité de chaque objet prend deux formes : une énergie émise intrinsèquement et une énergie générée

par réémission d'une partie des radiations reçues en provenance des autres objets de la scène. Après un certain nombre d'échanges radiatifs, un équilibre énergétique s'établit dans la scène et l'énergie radiative de chaque composante de la scène est transformée en couleur (i.e., radiosité) qui la caractérise. C'est la couleur que nous voyons.

Le principe général de cette technique consiste à discrétiser la scène en un ensemble de  $N$  morceaux de surfaces (*patches*), à calculer un facteur de forme pour chaque couple de *patches*, et à résoudre un système d'équations linéaire formé par les quantités d'énergies émises par chaque *patch*.

### **Facteur de forme**

Le facteur de forme  $F_{ij}$  représente la proportion d'énergie émise par le *patch*  $i$  et reçue par le *patch*  $j$ . Cette grandeur géométrique dépend de l'orientation relative des *patches*, leurs formes et leurs positions relatives dans la scène et leur visibilité mutuelle (figure 4.4). Il est décrit par la formule suivante :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{x \in P_i} \int_{y \in P_j} \frac{\cos \theta_x \cos \theta_y}{\pi r^2} V(x, y) dy dx. \quad (4.8)$$

avec :

- $A_i, A_j$  : aires des deux *patches*  $P_i$  et  $P_j$ .
- $V(x, y)$  : visibilité entre les points  $x$  et  $y$ . Elle est égale à 1 si  $x$  voit  $y$ , 0 autrement.
- $r$  : distance entre les points  $x$  et  $y$ .
- $\theta_x, \theta_y$  : angles entre les vecteurs normaux de deux *patches* avec le vecteur  $\vec{xy}$ .

Il existe essentiellement trois techniques utilisées pour évaluer les facteurs de forme :

**Échantillonnage par lignes locales et globales :** Des lignes globales sont lancées à travers la scène sans contraindre qu'elles commencent d'un élément particulier. Il est possible, avec une certaine probabilité, qu'elles traversent des objets de la scène. Les

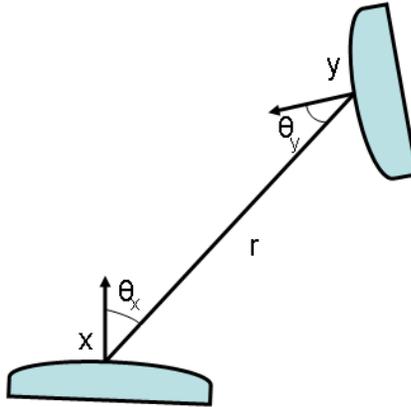


Figure 4.4 – L'échange radiatif entre les points  $x$  et  $y$  dépend de leurs orientations relatives, distance et visibilité.

facteurs de forme sont déduits à partir de ces lignes. L'échantillonnage par lignes locales consiste à évaluer le facteur de forme de tous les couples  $(P_i, P_j)$ . Ainsi, pour un  $i$  fixé, on lance un rayon partant de  $P_i$ , on détermine le premier *patch*  $P_j$  rencontré, et on met à jour la valeur de  $F_{ij}$ .

**Projection sur l'hémisphère :** L'estimation du facteur de forme d'un point  $x \in P_i$  à un *patch*  $P_j$  est effectué en projetant toutes les portions de  $P_j$  visibles depuis  $x$  sur l'hémisphère unitaire centré en  $x$ . Puis on projette la portion de l'hémisphère sur le cercle situé au plan tangent à la surface au point  $x$ . On divise l'aire de la surface obtenue par  $\pi$ .

**Projection sur l'hémi-cube :** L'hémisphère est approximé par cinq plans de projection formant un hémi-cube. Chaque face de l'hémi-cube est discrétisée en un certain nombre de cellules carrées identiques. Le facteur de forme d'un élément est approximé par la somme des facteurs de forme des cellules intersectées par la projection de l'élément sur l'hémi-cube.

### Résolution de l'équation de radiativité

Pour un *patch*  $i$ , l'équation de radiativité  $B_i$  est de la forme :

$$B_i = E_i + \delta_i \sum_j B_j F_{ij}. \quad (4.9)$$

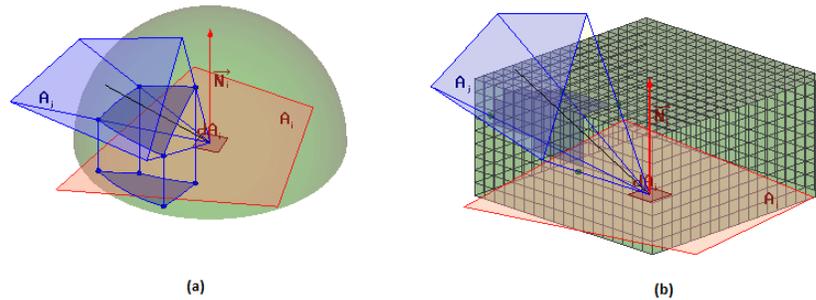


Figure 4.5 – Calcul du facteur de forme : (a) hémisphère, (b) hémis-cube.

avec :

$E_i$  : l'émission du *patch*  $i$  en tant que source de lumière lambertienne.

$\delta_i$  : la réflectivité (albedo) du *patch*  $i$ .

L'échange radiatif entre tous les *patches* de la scène peut être modélisé par le système linéaire suivant :

$$\begin{pmatrix} 1 - \delta_1 F_{1,1} & -\delta_1 F_{1,2} & \dots & -\delta_1 F_{1,n} \\ -\delta_2 F_{2,1} & 1 - \delta_2 F_{2,2} & \dots & -\delta_2 F_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\delta_n F_{n,1} & -\delta_n F_{n,2} & \dots & 1 - \delta_n F_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{pmatrix}.$$

Ce système est généralement résolu par une méthode itérative, par exemple Gauss-Seidel ou la relaxation de Jacobi.

Cet algorithme présente plusieurs avantages par rapport aux techniques basées sur le lancer de rayons. En effet, on n'a pas à recalculer l'équilibre énergétique si on change la position d'observation. En plus, une fois le système linéaire résolu, le rendu de la scène est très rapide (en utilisant Z-buffer ou un lancer de rayons). Cependant, cette méthode présente des limites importantes quant à la modélisation uniquement de la lumière transmise de façon diffuse. En fait, cet algorithme ne tient pas en compte des transmissions et des réflexions spéculaires. Le temps de calcul des facteurs de forme et de la résolution du système linéaire dépend du nombre de *patches* considérés dans la scène. Bien évi-

demment, une valeur élevée entraîne une explosion du temps de calcul, ce qui constitue un inconvénient majeur pour une application en temps réel.

#### 4.2.2.7 Transfert de radiance précalculé

Le transfert de radiance précalculé [22, 55] (*Precomputed Radiance Transfer* ou PRT) (voir la figure 4.6) est une technique permettant de synthétiser des images en temps réel. La qualité des résultats obtenus par cette méthode a attiré l'attention des chercheurs de la communauté d'informatique graphique. Ainsi, plusieurs travaux en ont découlé [30, 48, 54, 56].

Le principe de cette technique consiste à précalculer des fonctions qui permettent de transformer la lumière émise par une carte d'environnement et reçue sur la surface d'un objet en lumière réfléchi. L'équation générale du rendu par PRT découle directement de l'équation du rendu proposée par Kajiya [20] :

$$L(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega} L(x', \omega_i) \rho(x, \omega_i, \omega_o) V(x, x') G(x, x') d\omega_i \quad (4.10)$$

avec :

- $\Omega$  : le domaine de toutes les directions possibles.
- $L(x', \omega_i)$  : quantité de lumière arrivant au point  $x$  à partir d'un autre point  $x'$  suivant la direction  $\omega_i$ .
- $V(x, x')$  : fonction de visibilité binaire. Elle est égale à 1 si  $x$  voit  $x'$ , 0 autrement.
- $G(x, x')$  : relation géométrique entre  $x$  et  $x'$ . Elle correspond au produit scalaire entre le vecteur  $\omega_i$  et la normale au point  $x$ .

Le développement de cette équation sous forme d'une série de Neumann donne l'équation du rendu de PRT.

$$L(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + L_0(x, \omega_o) + L_1(x, \omega_o) + L_2(x, \omega_o) + \dots \quad (4.11)$$

Le terme  $L_e$  représente l'illumination émise par le point  $x$  dans la direction  $\omega_o$ . Le second terme  $L_0$  correspond à l'illumination réfléchie au point  $x$  dans la direction  $\omega_o$  provenant directement d'une source de lumière de toutes les directions possibles. Le terme  $L_1$  représente la quantité de lumière réfléchie au point  $x$  dans la direction  $\omega_o$  après qu'elle soit rebondie une fois avant d'atteindre le point  $x$ . De manière générale,  $L_i$ ,  $i \geq 2$ , correspond à l'illumination réfléchie au point  $x$  dans la direction  $\omega_o$  après qu'elle soit rebondie  $i$  fois avant d'arriver au point  $x$ . On constate que le niveau d'indirection  $N$  peut être calculé à partir du niveau d'indirection  $N - 1$ . Ainsi, on peut déduire l'équation suivante :

$$L_N(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L_{N-1}(x', \omega_i) \rho(x, \omega_i, \omega_o) (1 - V(x, x')) G(x, x') d\omega_i. \quad (4.12)$$

Le terme d'occultation  $(1 - V(x, x'))$  filtre toutes les directions qui sont visibles directement à partir du point  $x$ . Dans la suite de cette section, nous ne montrons que les techniques de précalcul du premier terme  $L_0$ . Les autres termes se résolvent de la même manière.

Les fonctions  $\rho$ ,  $V$  et  $G$  peuvent être groupées dans une fonction unique  $T$ , nommée fonction de transfert.

$$L_0(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L_e(\omega_i) T(x, \omega_o, \omega_i, x') d\omega_i. \quad (4.13)$$

La lumière incidente et la fonction de transfert sont représentées dans la même base de fonctions  $\{\beta_k\}_{k=1..n}$ . Généralement, on utilise la base des harmoniques sphériques. Cependant, d'autres bases de fonctions peuvent être utilisées telles que les ondelettes. Ainsi, la première étape d'évaluation de l'intégrale consiste à projeter les deux fonctions  $L_e$  et  $T$  dans une base orthonormée. Cette phase est réalisée en prétraitement.

$$L_e(\omega_i) = \sum_{k=1}^n l_k \beta_k(\omega_i) \quad (4.14)$$

$$l_k = \int L_e(\omega_i) \beta_k(\omega_i) d\omega_i \quad (4.15)$$

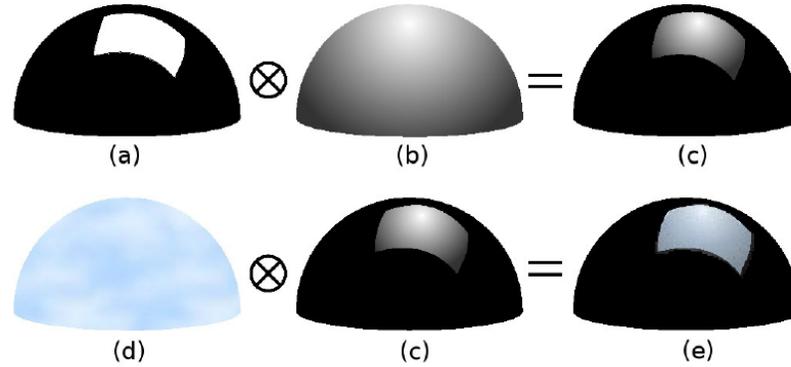


Figure 4.6 – (a) Le terme de visibilité combiné avec (b) le facteur de géométrie, donnent (c) le facteur de transfert. Ce dernier est combiné avec (d) la radiance reçue pour déterminer (e) l’illumination finale [57].

$$T(x, \omega_o, \omega_i, x') = \sum_{k=1}^n t_k \beta_k(\omega_i) \quad (4.16)$$

$$t_k = \int T(x, \omega_o, \omega_i, x') \beta_k(\omega_i) d\omega_i \quad (4.17)$$

$$L_0(\omega_o, x) = \int \sum_{k=1}^n c_k \beta_k(x) \sum_{k=1}^n d_k \beta_k(x) dx = \sum_{k=1}^n c_k d_k \int \beta_k(x) \beta_k(x) dx = \sum_{k=1}^n c_k d_k. \quad (4.18)$$

Ainsi, la deuxième étape consiste à calculer le produit scalaire entre les deux vecteurs représentant la lumière incidente et la fonction de transfert dans la base  $\{\beta_k\}_{k=1..n}$ . Ce traitement est calculé en temps réel.

La fonction de radiance précalculée est évaluée en chaque sommet d’un maillage triangulaire décrivant la géométrie des objets de la scène. Ainsi, certains phénomènes optiques seraient possiblement manqués. Si la surface est lambertienne (diffuse), la fonction de transfert est représentée par un vecteur. En un point donné de la scène, si la lumière réfléchiée par une surface spéculaire dépend de la direction de vue, la fonction de transfert en ce point devient une matrice, ce qui nécessite un grand espace de stockage pour conserver les données précalculées même si on fait une compression. Selon Lehtinen et Kautz [30], une matrice de taille  $M^2 \times n^2$  est définie en chaque sommet du maillage, où  $n$  représente l’ordre des harmoniques sphériques et  $M^2$  est le nombre de fonctions de base d’harmoniques sphériques. Pour un maillage de taille 50,000 sommets et ( $n = 5$ ,

$M = 11$ ), la taille des données précalculées est approximativement égale à 600 MO.

#### 4.2.2.8 Synthèse

Cette section se veut une classification des différentes méthodes citées ci-dessus selon les critères caractérisant notre problématique. Les avantages et les inconvénients de chaque technique sont liés à la possibilité de faire des précalculs, aux ressources mémoires nécessaires pour stocker les différentes structures utilisées par l'algorithme, au temps de calcul, et à la capacité de simuler les effets optiques engendrés par les matériaux.

#### ***Photon mapping***

- + Les images générées par cette technique sont souvent les moins bruitées.
- + Elle est la technique la plus réaliste couramment utilisée par l'industrie.
- + Elle est la plus rapide technique d'illumination globale basée sur le lancer de rayons.
- Nous devons lancer un grand nombre de photons, ce qui entraîne des ressources mémoires très volumineuses.
- Pour chaque couple de directions (lumière, observation), nous devons recalculer les structures de *photon map*, ce qui entraîne l'impossibilité de faire des précalculs.

#### **Radiosité**

- + Indépendante de la position de vue, d'où la possibilité d'effectuer des précalculs en tenant compte du changement de la position de lumière.

- + Pour l'ensemble des images de la BTF, les ressources mémoires ne sont pas considérables puisque nous pouvons faire des précalculs et les stocker par sommet de la micro-géométrie.
- Les effets optiques modélisés se restreignent à l'inter-réflexion diffuse. Le problème explose avec le nombre de *patches* considérés.

### ***Irradiance Caching***

- + Possibilité de précalculer les valeurs d'irradiance en des points particuliers de chaque couple de directions (observation, lumière).
- Les effets optiques modélisés se restreignent à l'inter-réflexion diffuse.
- Le nombre des points particuliers dépend de la complexité de la micro-géométrie.

### ***Metropolis***

- + Possibilité de précalculer les chemins optiques de la micro-géométrie.
- L'implémentation de la technique est une tâche très délicate.
- Le test d'acceptation/rejet des mutations est coûteux en temps de calcul.

### ***Tracer de chemins bidirectionnels***

- + Possibilité de précalculer les chemins optiques de la micro-géométrie.
- La technique devient trop biaisée avec l'étape de précalcul.

### **Transfert de lumière précalculé**

- + Elle permet de précalculer l'éclairage global d'une scène et de faire le rendu par la suite en temps réel.
- L'illumination est évaluée aux sommets des polygones de la scène. Ainsi, certains phénomènes optiques peuvent être ratés.
- Le problème devient beaucoup plus complexe si la réflectance de la surface dépend de la direction d'observation. Les données précalculées deviennent très volumineuses.

Après cette étude comparative des différentes méthodes d'illumination globale citées, nous favorisons l'algorithme de tracer de chemins bidirectionnels. Notre objectif est d'effectuer un précalcul des sous-chemins optiques formant ainsi un réseau d'interconnexions entre un ensemble d'échantillons de la micro-géométrie. Nous pourrions introduire une technique d'optimisation de calcul de la visibilité de ces échantillons à partir des directions de lumière/observation.

#### **4.2.3 Description de notre approche d'illumination globale**

Dans notre application, nous avons utilisé une technique d'illumination globale pour simuler les effets d'inter-réflexion de la lumière au sein de la micro-géométrie d'un matériau. Notre étude détaillée des quelques méthodes d'illumination globale a montré la

nécessité d'avoir recours à des techniques d'optimisation aux différentes phases du traitement. Rappelons que nous faisons appel à la technique d'illumination globale pour chaque couple de directions (observation, lumière). Nous tenterons d'identifier les sous-traitements communs entre ces combinaisons de directions. Ainsi, des techniques de précalculs et d'optimisations seront appliquées afin de réduire le temps de calcul.

Nous avons choisi d'adapter l'algorithme de tracer de chemins bidirectionnels, proposé indépendamment par Lafortune et Willems [25] et Veach et Guibas [60]. Dans les sections suivantes, nous décrivons les optimisations proposées dans la réalisation de cet objectif.

#### **4.2.3.1 Description générale de l'algorithme**

Nous rappelons que notre méthode d'illumination globale est basée sur l'algorithme de tracé de chemins bidirectionnels. Nous avons modifié cet algorithme pour qu'il s'adapte à notre cas de figure. Nous avons aussi introduit une phase de précalcul des traitements communs de l'algorithme entre les différentes images de la BTF. Le schéma général de cette méthode consiste à :

- Étape 1 : Calculer un échantillonnage de la micro-géométrie.
- Étape 2 : Construire un réseau d'interconnexions entre les échantillons mutuellement visibles.
- Étape 3 : Précalculer des chemins et une carte d'ombre pour chaque direction.
- Étape 4 : Exécuter l'algorithme du tracer de chemins bidirectionnels.

#### **4.2.3.2 Description détaillée de l'algorithme**

##### **Technique d'échantillonnage d'un modèle 3D**

Nous avons utilisé une technique d'échantillonnage des modèles 3D proposée par Nehab et Shilane [43]. Cet algorithme est composé de trois étapes. La première phase consiste à voxeliser le modèle cible. Puis, nous déterminons la meilleure position possible pour un échantillon à l'intérieur de chaque voxel. La dernière étape permet de contraindre la

distance minimale entre les échantillons en supprimant ceux qui sont trop proches.

**Voxelisation :** Dans cette étape, nous construisons une grille régulière englobant la micro-géométrie. Puis nous déterminons les triangles qui intersectent chaque voxel de la grille. Nous signalons que la résolution de la grille est un paramètre de cet algorithme. Cette résolution contrôle le nombre d'échantillons à placer sur le modèle tridimensionnel.

**Echantillonnage :** Le but de cette étape est de calculer le plus proche point sur la micro-géométrie du centre de chaque voxel de la grille. Pour ce faire, nous parcourons l'ensemble des triangles, un après l'autre, intersectant le voxel actuel. Un triangle est considéré homogène si son aire est inférieure à un seuil fixé. Dans ce cas, le centroïde de ce triangle correspond à l'échantillon courant du voxel s'il minimise la distance au centre de ce voxel. Dans le cas contraire (triangle non homogène), il est subdivisé en quatre sous-triangles et l'algorithme est appelé sur chacun d'entre eux.

**Suppression des sommets proches :** Les échantillons de certains voxels peuvent être très proches d'une frontière commune. Par conséquent, certains échantillons de quelques voxels voisins le seront aussi. Ceci constitue une situation indésirable pour certaines applications telles que la simplification des maillages. Pour le résoudre, les auteurs proposent d'exiger une contrainte de distance minimale entre les différents échantillons. Ainsi, ils suppriment les échantillons qui ne la respectent pas.

La figure 4.7 présente l'emplacement des échantillons sur des exemples de micro-géométries.

### **Réseau d'interconnexions entre les échantillons**

Nous avons utilisé un lancer de rayons standard pour connecter les points du réseau mutuellement visibles. Pour chaque point, nous le lions avec un seul point mutuellement visible. Ceci est accompli en échantillonnant des directions, en trouvant des points du réseau voisins dans ces directions et en choisissant un point du réseau selon une fonc-

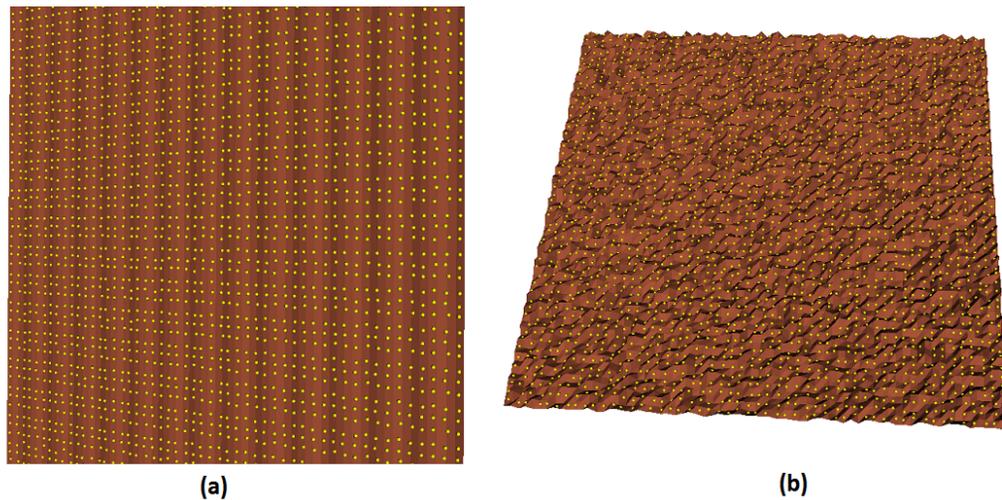


Figure 4.7 – Emplacement des échantillons sur des exemples de micro-géométries : (a) sinusoïdale, (b) aléatoire.

tion d'importance basée sur leurs facteurs de forme (la normale et la distance). Le point du réseau choisi est retesté pour la visibilité. Les liens sont naturellement inclus dans l'enveloppe convexe de la méso-géométrie. Ils interconnectent le réseau des points qui se trouvent dans les cavités. Plusieurs ensembles de points connectés peuvent résulter de cet algorithme. Ces ensembles sont débranchés les uns des autres. Ces interconnexions sont représentées par les lignes en rose à la figure 4.8.

Dans cette étape, un facteur de visibilité est calculé pour chaque point du réseau, défini par :

$$\alpha(x) = \int_{\Omega^+} V(x, \omega) d\omega \quad (4.19)$$

où  $V(x, \omega)$  est une fonction binaire qui égale 1 si  $x$  est occulté dans la direction  $\omega$  et 0 autrement. Ce facteur sera utilisé plus tard dans la phase de rendu pour pondérer la radiance  $L$  évaluée en ce point du réseau. Typiquement, nous avons utilisé 256 directions.

### Précalcul des chemins et une carte d'ombre pour chaque direction

La caméra et la source de lumière utilisent des rayons parallèles ; elles peuvent donc

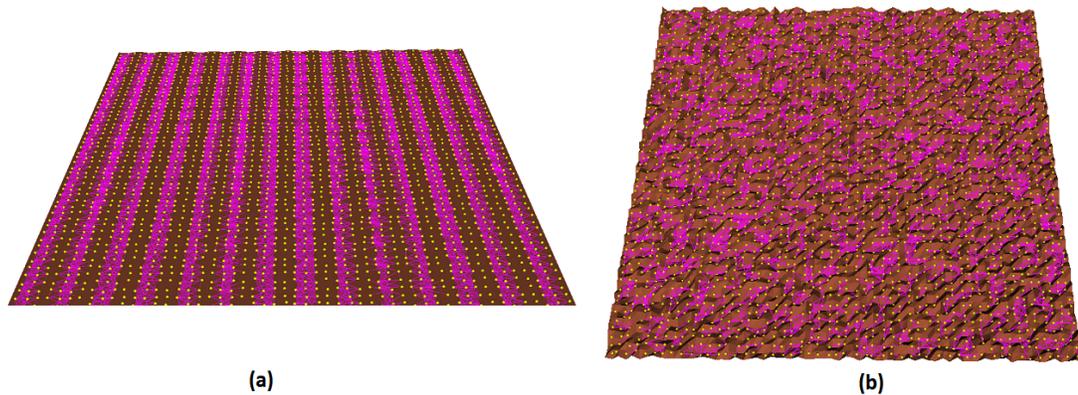


Figure 4.8 – Réseau d’interconnexions (en rose) entre les échantillons des exemples de micro-géométries : (a) sinusoidale, (b) aléatoire.

partager la même structure. Dans cette étape de prétraitement, nous calculons les points d’intersection directs pour chaque direction  $(\theta, \phi)$ . Pour chaque point, nous stockons l’indice de son triangle, ses coordonnées barycentriques et l’indice de son type de matériau. Les coordonnées barycentriques sont utilisées pour recalculer le plan local (le vecteur normal et les deux vecteurs tangents). En outre, dans cette étape, une carte d’ombre est calculée pour chaque direction. La valeur d’ombrage pour un pixel de l’image est donnée par la distance entre le point d’intersection direct et sa projection sur le plan de référence.

La visibilité de la source lumineuse, pour chaque point de la méso-structure, peut être approximée en le projetant dans la carte d’ombre correspondante. Pour chaque point d’intersection direct, nous le lions à  $N_1$  points du réseau. Dans nos simulations,  $N_1 = 4$  ou 6. Un facteur de visibilité est aussi calculé pour chaque point d’intersection direct.

### Phase de rendu

**Test de visibilité :** Le test de visibilité à la figure 4.9 est défini comme suit : un point d’intersection direct est précalculé à partir d’une direction  $\omega_o$ . Pour déterminer s’il est dans l’ombre, sa valeur de profondeur dans la carte d’ombre de la direction de lumière

associée est déterminée. La distance  $r$  du point  $p$  au pixel correspondant et la valeur de profondeur  $d$  sont déjà précalculées. Le point  $p$  est visible si la distance  $r$  est inférieure à la distance  $d$ .

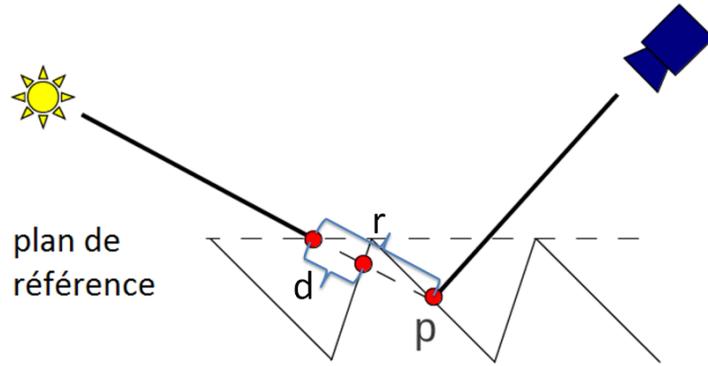


Figure 4.9 – Test de visibilité.

Pour chaque pixel à la figure 4.10, la radiance est évaluée en utilisant les chemins précalculés sur l'ensemble du réseau des points et les points d'intersection directs. La réflexion de la lumière à un point de contact dépend des propriétés du matériau sous-jacent. La visibilité de la source lumineuse d'un point dans la scène est déterminée en utilisant la procédure décrite dans le paragraphe précédent.

L'illumination globale est développée comme suit, où l'indice  $i - 1$  correspond au nombre d'inter-réflexions, et  $\overrightarrow{y_{i-1}y_i}$  correspond à la réflexion de la lumière entre deux points successifs  $(y_{i-1}, y_i)$  du réseau de points.

$$\begin{aligned}
 L &= L_{dir} + L_{ind} \\
 L_{ind} &= L_{ind_1} + L_{ind_2} + \dots + L_{ind_i} \\
 L_{ind_1} &= \frac{\alpha_1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \rho(\overrightarrow{\omega_o}, \overrightarrow{xy_1}) L_1(y_1) \\
 L_{ind_2} &= \frac{\alpha_1 \times \alpha_2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \rho(\overrightarrow{\omega_o}, \overrightarrow{xy_1}) \rho(\overrightarrow{xy_1}, \overrightarrow{y_1y_2}) L_2(y_2) \\
 L_{ind_i} &= \frac{\alpha_1 \times \dots \times \alpha_i}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \rho(\overrightarrow{\omega_o}, \overrightarrow{xy_1}) \dots \rho(\overrightarrow{y_{i-2}y_{i-1}}, \overrightarrow{y_{i-1}y_i}) L_i(y_i).
 \end{aligned}$$

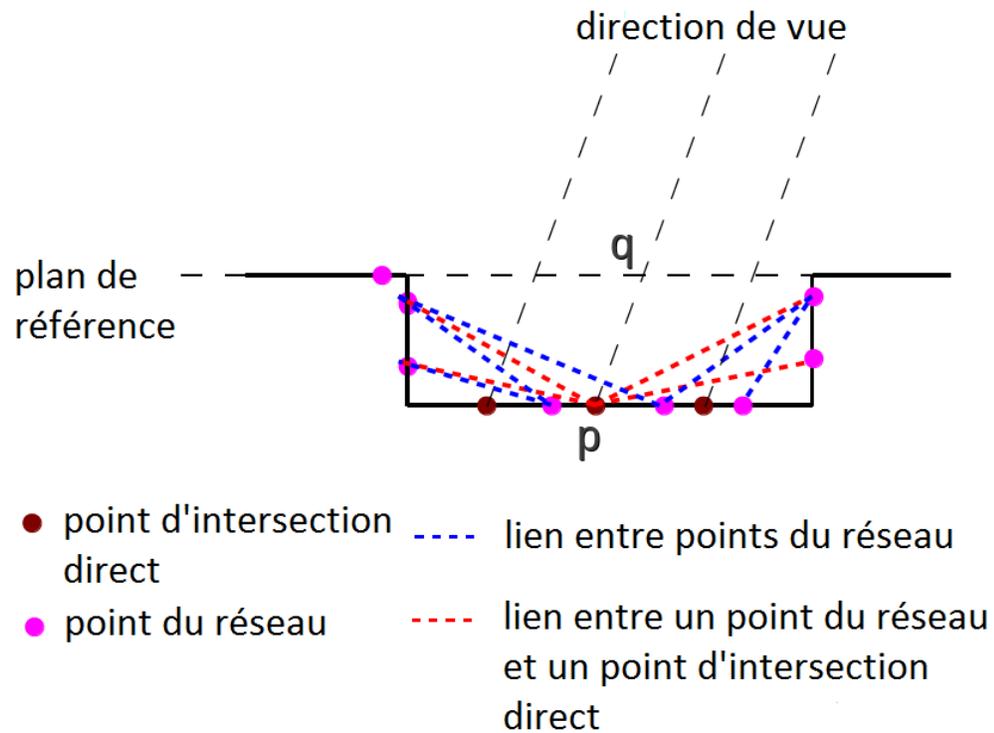


Figure 4.10 – Les données précalculées sont constituées par les points d'intersection directs, un réseau de points avec des liens vers les points d'intersection directs, et une carte ombre.

Typiquement, nous avons utilisé des chemins de longueurs de deux à quatre, bien que des chemins plus longs sont possibles pour une méso-géométrie sujette à plusieurs inter-réflexions.

La figure 4.11 compare l'effet d'ajout d'un éclairage indirect sur l'apparence de la BTF de briques. Il apparaît essentiellement entre les briques, où les inter-réflexions de la lumière adoucissent l'ombre.

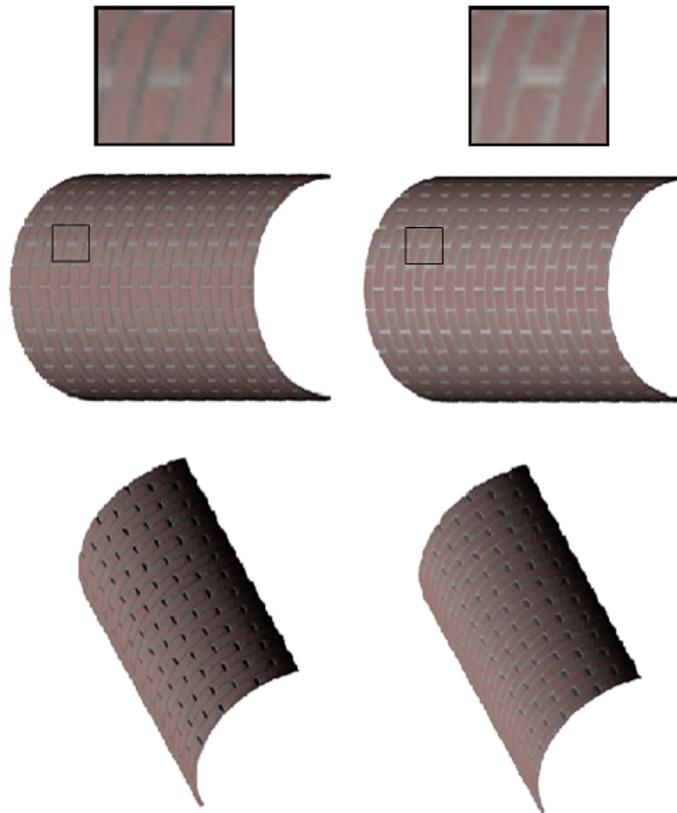


Figure 4.11 – Une surface avec une BTF faite de briques. Gauche : sous l’effet d’un éclairage local. Droite : sous l’effet de l’illumination globale.

### 4.3 Ajout de silhouettes

#### 4.3.1 État de l’art

Wang et al. [63] ont introduit une structure 5D appelée *View-dependent Displacement Mapping* (VDM). La VDM dépend de la résolution des coordonnées de texture ( $u$ ,  $v$ ), de la direction de vue ( $\theta$ ,  $\phi$ ) et de la variation de courbure. L’inconvénient majeur de cette technique consiste en ce qu’elle peut être seulement appliquée avec des surfaces de carte d’élévations (*height-field*). Wang et al. [64] ont proposé une généralisation de la VDM, aussi comme une structure 5D. Elle est définie sur les points d’une grille régulière d’une méso-structure donnée. Elle dépend de la position  $(x, y, z)$  et de la direction de vue des points. Wang et al. [62] ont mesuré une structure 4D pour ajouter des détails

de silhouettes à une BTF plaquée sur une surface tridimensionnelle. Les silhouettes sont ajoutées en comparant, lors du rendu, la distance du déplacement précalculée avec celle entre les surfaces d'avant et d'arrière. L'inconvénient de cette technique consiste en ce qu'elle néglige la variation de la courbure de surface. Magda et Krigmen [34] ont encodé la BTF sous forme d'une pile de couches pour représenter la texture volumétrique. Ils ont estimé à partir d'une BTF capturée un vecteur normal, un facteur d'atténuation, une composante diffuse, etc., d'un modèle paramétrique de réflectance pour chaque texel de chaque couche. Cette représentation est appropriée pour un affichage en temps réel avec GPU, mais à angles rasants, les silhouettes peuvent apparaître comme des couches minces superposées.

### 4.3.2 Approche proposée

Le rendu d'une BTF plaquée sur une surface fournit des effets visuels plus riches qu'un simple plaquage standard de texture, car elle peut inclure des effets comme l'auto-ombrage, l'inter-réflexion, l'occultation mutuelle, etc. Cependant, il ne reproduit pas les détails de silhouettes et ne prend pas en compte les occultations causées par les variations de courbure. En effet, une BTF est définie par un ensemble d'images. Elle ne conserve aucune information sur la géométrie sous-jacente. Elle encode tous les effets causés par la méso-structure sans modéliser explicitement la géométrie.

Pour résoudre ce problème, nous avons ajouté à la BTF une fonction 4D de carte de visibilité (VMF). Elle est définie par  $VMF(u, v, \theta, \phi)$ , où  $(u, v)$  sont les coordonnées de texture et  $(\theta, \phi)$  sont les coordonnées sphériques de la direction de vue. Elle correspond à la distance de  $p$  à  $q$  dans la figure 4.10.

#### 4.3.2.1 Détermination des coordonnées de texture et de la direction de vue

Nous commençons par extruder le maillage de la surface de base. Chaque sommet du triangle est extrudé le long de sa direction normale interpolée pour produire un maillage volumétrique (défini par des blocs de triangles formant un maillage par couche). Nous

essayons d'éviter l'auto-intersection des extrusions, mais ceci reste un problème ouvert pour des géométries complexes entrelacées. Pour faire le rendu de chaque pixel de l'image, nous avons fait le suivi d'un rayon, lancé à partir de la caméra, au long de la méso-structure extrudée jusqu'à ce que nous identifions une intersection avec les détails de la surface ou atteignons sa base (si c'est opaque). Ce suivi est effectué simultanément dans l'espace objet et l'espace texture. Cependant, on rappelle que nous n'avons plus accès à la méso-géométrie de la BTF. Un exemple du processus est illustré à la figure 4.12. Pour un rayon de pixel, nous déterminons son point d'entrée  $p_1$  dans le maillage volumétrique et ses coordonnées  $t_1$  dans l'espace texture, ainsi que ses points de sortie  $p_2$  et  $t_2$  dans les deux espaces. Le segment  $(t_1, t_2)$  donne la direction de vue  $V(\theta, \phi)$  dans l'espace texture. Sur le plan de référence, le point d'entrée  $t_1$  est identique au point  $t_0$ . La  $VMF(t_0, \theta, \phi)$ , définie au point  $t_0$ , encode la distance la plus courte à la méso-géométrie. Comme  $VMF(t_0, \theta, \phi) \geq (t_2 - t_0)$ , nous supposons qu'il n'y a aucune intersection dans ce bloc et le rayon continue son parcours au prochain bloc (défini par les segments  $(p_2, p_3)$  et  $(t_2, t_3)$ ). Dans l'espace texture, le segment  $(t_2, t_3)$  intersecte le plan de référence à un nouveau point  $t_0$  où la VMF est définie. Ici de nouveau, aucune intersection n'est trouvée car  $VMF(t_0, \theta, \phi) \geq (t_3 - t_0)$ , donc le rayon continue son chemin. Finalement, pour les segments  $(p_3, p_4)$  et  $(t_3, t_4)$  et leur nouveau  $t_0$  associé,  $VMF(t_0, \theta, \phi) \leq (t_4 - t_0)$  et nous considérons qu'il y a une intersection avec la méso-géométrie.

#### 4.3.2.2 Détermination de la direction de la lumière

Jusqu'ici, nous avons déterminé les coordonnées de texture  $(u, v)$ , la direction de vue  $\omega_o(\theta, \phi) = V(\theta, \phi)$  et la distance au point d'intersection à partir de la VMF associée. Nous pouvons transformer le point d'intersection associé dans l'espace objet pour trouver la direction de lumière à partir de ce point. Pour déterminer la direction de la lumière  $\omega_i(\theta, \phi)$  dans l'espace texture, nous traçons dans l'espace objet un rayon du point d'intersection vers la source lumineuse jusqu'à ce que nous quittons le maillage volumétrique. Si aucun segment n'est bloqué, nous utilisons la direction  $\omega_i$  du bloc où l'intersection à partir de la direction de vue est détectée. Elle correspond à notre direction de lumière par défaut. Sinon, nous mettons à jour la direction de la lumière du bloc où

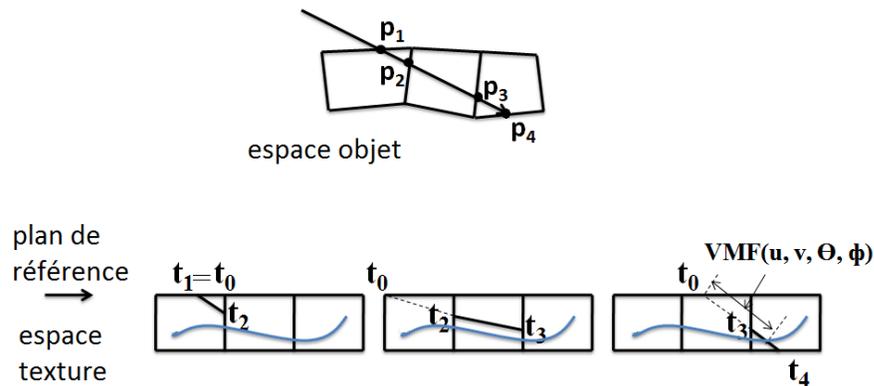


Figure 4.12 – Haut : intersection du rayon avec la surface (en 2D) extrudée dans l'espace objet. En bas : les segments de rayons correspondants dans l'espace de texture volumétrique. Notez que la surface en bleu clair est donnée à titre indicatif, car aucune méso-géométrie est présente à ce stade de la représentation de la BTF.

une intersection est détectée allant de l'intérieur vers l'extérieur. Finalement, la couleur du rayon actuel est donnée par  $BTF(u, v, \omega_o, \omega_i)$ .

#### 4.3.2.3 Résultats

Méso-géométrie	Directions	Textures	Nombre des points du réseau	Temps de précalcul	Temps de rendu
plafond (900k)	$16 \times 32$	$128 \times 128$	2,521,853	70 min	130 min
tressage (200k)	$16 \times 32$	$64 \times 64$	3,623,758	13 min	36 min
bump (350k)	$20 \times 40$	$32 \times 32$	2,855,710	15 min	45 min
cuir (820k)	$16 \times 32$	$128 \times 128$	2,043,534	56 min	145 min
brique (860k)	$16 \times 32$	$128 \times 128$	1,933,122	58 min	142 min

Tableau 4.I – Statistiques de simulation des BTFs.

Le tableau 4.I donne un aperçu sur la résolution d'échantillonnage des directions de

l'hémisphère supérieur à la méso-structure, la résolution de chaque BTF et les temps de précalcul des données pour la simulation de nos BTFs. Le précalcul comprend l'échantillonnage de la méso-géométrie, le calcul des facteurs de visibilité et la construction du réseau d'interconnexions. Le rendu comprend la production de chaque image de la BTF, y compris les effets d'illumination globale.

Un vase avec une BTF d'un modèle de plafond est illustré à la figure 4.13, et un cuir a été appliqué sur une chaise (figure 4.14) et un coussin (figure 4.15). Ces images montrent un rendu cohérent de l'illumination directe, des ombres des silhouettes, et des inter-réflexions sous différentes directions de lumière/vue.

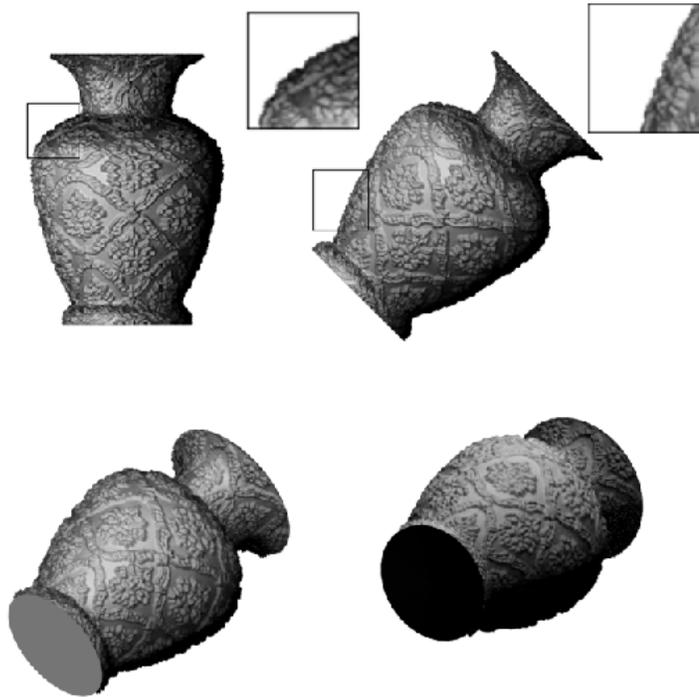


Figure 4.13 – Un vase avec une BTF de plafond, avec un *shading* adéquat, ombres, silhouettes et inter-réflexions.

La figure 4.16 montre qu'en utilisant notre structure de VMF, nous sommes également en mesure de simuler une BTF qui présentent des effets de transparence, sans avoir besoin d'un canal supplémentaire dans les données de la BTF.

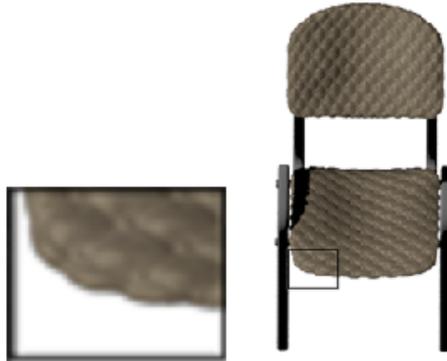


Figure 4.14 – Une chaise avec une BTF de cuir.

Afin de valider nos résultats, nous avons utilisé l’algorithme de *Monte Carlo Path Tracing* pour faire le rendu des images avec la méso-géométrie elle-même. Nous pouvons voir dans la figure 4.17, avec la solution exacte sur la colonne de gauche et notre méthode de plaquage de BTF sur la colonne centrale, que nos BTFs peuvent approcher la solution exacte. La distorsion dans l’aspect de surface est principalement liée aux effets dus à la compression et la discrétisation de la BTF. La différence du temps de calcul entre la solution exacte et notre méthode est d’environ un facteur de 8 à 12 fois. Le rendu d’une BTF plaquée sur une surface prend environ 30 à 60 secondes (PBRT), comparé à 300 à 700 secondes nécessaires pour faire le rendu de la solution exacte. La figure 4.17 (à droite) montre à quel point l’apparence est modifiée lorsque la direction de la lumière dans la BTF n’est pas déplacée à travers tous les texels déformés, mais calculée directement là où le rayon coupe la géométrie de la surface.

La figure 4.18 représente un exemple d’une BTF qui ne peut être réduit à un champ de hauteurs. La méso-géométrie sous-jacente est constituée d’un ensemble de sphères, les sphères rouges situées à une hauteur de deux fois leur rayon et les sphères vertes à trois fois leur rayon. La BTF et la méso-géométrie sont toutes les deux appliquées sur une section d’un cylindre de grande taille. Pour les BTFs du haut, nous avons utilisé des coefficients diffus et spéculaire de 0.7 et 0.3 respectivement. Pour les BTFs du bas, nous les avons inter-changés. Nos BTFs simulées sont comparées à la solution exacte

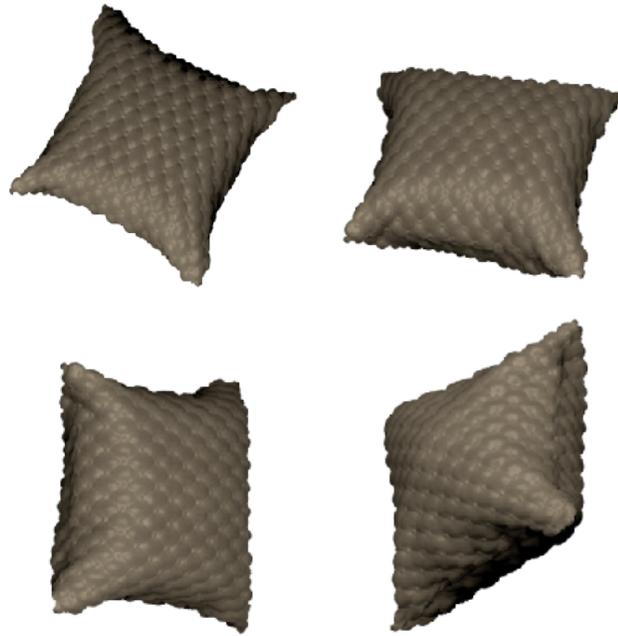


Figure 4.15 – Un coussin avec une BTF de cuir.

(colonne de droite).

#### 4.4 Rendu en multi-résolution de la BTF

##### 4.4.1 État de l'art

Le rendu de textures à différents niveaux de détails (LOD) a été utilisé en infographie pour réduire les effets d'aliasage dans les images synthétisées. La méthode la plus populaire est le *mipmapping* [68]. Elle consiste à créer une pyramide de textures de résolutions inférieures qui seront utilisées à la place de la texture originale, en fonction de la distance du point de vue à l'objet texturé et du niveau de détails nécessaire. La texture utilisée lors du rendu sera alors celle dont la résolution est la plus proche de celle de l'objet sur l'image projetée. La texture de chaque niveau de détails est construite à partir de celle du niveau supérieur en utilisant un filtre boîte moyenné des quatre pixels voisins. Par exemple, à partir d'une texture de taille  $128 \times 128$  seront produites des textures de résolutions de  $64 \times 64$ ,  $32 \times 32$ ,  $16 \times 16$ ,  $8 \times 8$ ,  $4 \times 4$ ,  $2 \times 2$  et  $1 \times 1$ . Lors du rendu, pour

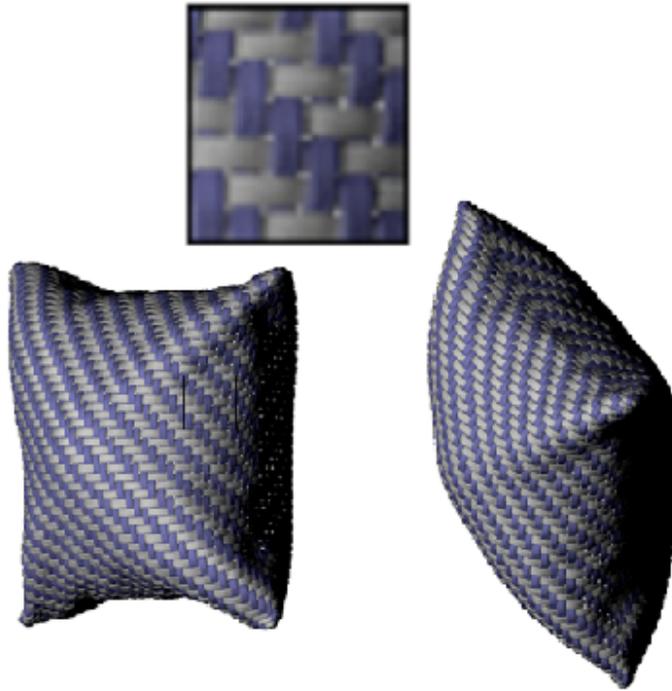


Figure 4.16 – Coussin avec une BTF de tissus tressés.

simuler une transition progressive, différentes techniques de filtrage ont été proposées tel que le filtrage trinéaire et le filtrage anisotrope. L'application du *mipmapping* au rendu de la BTF nécessite la résolution des difficultés majeures qui freinent son adoption par la communauté graphique même en négligeant la variation de courbure de la surface sur laquelle la BTF est plaquée. Ces difficultés sont liées principalement à l'espace mémoire requis pour stocker les différentes BTFs construites pour chaque niveau de détails.

Dans la littérature, Ma et al. [33] furent les premiers à proposer une méthode de rendu des fonctions de texture bidirectionnelle à différents niveaux de détails. Ils commencent par décomposer les images de la BTF en de multiples sous-bandes en utilisant la pyramide de Laplace. Puis ces sous-bandes sont compressées en utilisant l'algorithme d'analyse en composantes principales. Lors du rendu, le niveau de détails choisi pour chaque pixel est déterminé en fonction de la distance entre le point de vue et la sur-

face. L’algorithme de rendu utilise ce paramètre pour déterminer le nombre de niveaux dans la pyramide de Laplace qui sont nécessaires pour faire le rendu de la BTF au pixel concerné.

#### 4.4.2 Approche proposée

Nous commençons par simuler la BTF de base en utilisant notre approche de simulation décrite ci-avant. Puis des BTFs de résolutions inférieures sont construites de la même façon qu’en *mipmapping*. Une BRDF dans un niveau supérieur dans la hiérarchie correspond à une combinaison linéaire des quatre BRDFs du niveau inférieur adjacent. Ainsi, une approche de compression multi-linéaire permet de mieux exploiter cette redondance. Pour ce faire, nous avons utilisé l’algorithme *K-means* pour regrouper les BRDFs des différents niveaux dans des sous-ensembles disjoints. Puis nous avons appliqué une approche de factorisation multi-linéaire.

##### 4.4.2.1 Algorithme de regroupement

Nous avons appliqué l’algorithme d’agrégats *K-means* pour classer les BRDFs en  $K$  agrégats disjoints. Dans notre implémentation, la valeur de  $K$  est choisie selon l’approximation  $K = \sqrt{n/2}$  où  $n$  représente le nombre des BRDFs.

Notre but ultime est de compresser une très grande quantité de données, dans l’ordre de 100 GO et plus. Cependant, cela serait une tâche très coûteuse en temps de calcul pour regrouper cette quantité de données, même en utilisant un algorithme de regroupement “*out-of-core*”. Nous avons utilisé la méthode de Cardoso et Wichert [7], basée sur la projection aléatoire et l’algorithme de *K-means*. Le principe de cette méthode consiste à appliquer le *K-means* plusieurs fois, en augmentant la dimension des données après chaque itération. L’idée de la projection aléatoire est basée sur le théorème Johnson-Lindenstrauss [19] : si  $n$  points appartenant à un espace vectoriel de dimension  $d$  sont projetés aléatoirement dans un sous-espace vectoriel de dimension  $h$ , alors la distance euclidienne entre les points est presque préservée. Le théorème peut être décrit comme

suit :

**Theorem 4.4.1.** [19] Soit  $0 < \varepsilon < 1$  et un entier  $n$ ,  $h$  est un entier positif tel que

$$h \geq 4 \left( \frac{\varepsilon^2}{2} - \frac{\varepsilon^3}{3} \right)^{-1} \ln n.$$

Donc, pour chaque ensemble  $V$  de  $n$  points dans  $\mathbb{R}^d$ , il existe  $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^h$  tel que pour chaque  $u, v \in V$ ,

$$(1 - \varepsilon) \|u - v\| \leq \|f(u) - f(v)\| \leq (1 + \varepsilon) \|u - v\|.$$

La projection aléatoire d'une matrice de données  $\mathbf{M}_{n \times d}$  dans un sous-espace  $\mathbf{P}$  est donnée par  $\mathbf{M}_{n \times h} = \mathbf{M}_{n \times d} \mathbf{P}_{d \times h}$ , où  $\mathbf{P}_{d \times h}$  est la matrice de projection aléatoire et  $\mathbf{M}_{n \times h}$  est la matrice de données dans le sous-espace  $\mathbf{P}$ . L'IRP (*Iteratively Random Projection*) *K-means* permet de construire une solution en augmentant la dimension du sous-espace  $\mathbf{P}$ . L'algorithme commence par projeter les données de la matrice  $\mathbf{M}_{n \times d}$  dans un sous-espace  $\mathbf{P}_1$  de dimension  $h_1$  pour obtenir une matrice  $\mathbf{M}_{n \times h_1}$ . Dans cette étape, nous avons initialisé les centres des agrégats à l'aide de la procédure décrite par l'algorithme fourni par Arthur et Vassilvitskii [1]. Ensuite, nous avons appliqué l'algorithme *K-means* sur la matrice  $\mathbf{M}_{n \times h_1}$  pour obtenir un nouveau regroupement  $\mathbf{G}_1$ , qui sera utilisé pour initialiser les centres des agrégats dans le sous-espace  $\mathbf{P}_2$  de dimension  $h_2 > h_1$ . Puis ce processus se répète jusqu'à convergence.

#### 4.4.2.2 Factorisation multi-linéaire

Dans chaque agrégat  $C_i$ , il y a  $N_i$  BRDFs. Nous formulons la compression de ces  $N_i$  BRDFs comme un problème d'algèbre multi-linéaire. Ainsi, ces  $N_i$  BRDFs sont représentées comme un 3-tenseur  $\mathbf{A}_i$ . Le premier mode décrit la dimension des directions de vue, le second mode représente la dimension des directions de lumière, tandis que le troisième mode décrit la dimension spatiale. Le tenseur  $\mathbf{A}_i$  sera décomposé sous la forme

d'un produit d'un tenseur  $\mathbf{Z}_i$  de dimension inférieure et trois matrices  $\mathbf{U}_{view}^{(i)}$ ,  $\mathbf{U}_{light}^{(i)}$ ,  $\mathbf{U}_{tex}^{(i)}$ .

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{Z}_i \times \mathbf{U}_{view}^{(i)} \times \mathbf{U}_{light}^{(i)} \times \mathbf{U}_{tex}^{(i)} \quad (4.20)$$

Pour résoudre ce problème, nous avons appliqué l'algorithme NMF d'une manière hiérarchique. Ainsi, nous commençons par aplatir le tenseur  $\mathbf{A}_i$  selon le mode spatial  $\mathbf{A}_{i(tex)}$ . À l'aide de NMF, on construit deux matrices  $\mathbf{T}_1$  et  $\mathbf{U}_{tex}^{(i)}$ . La matrice  $\mathbf{T}_1$  sera aplatie selon le mode de lumière, puis nous appliquons le NMF, ce qui génère deux matrices  $\mathbf{T}_2$  et  $\mathbf{U}_{light}^{(i)}$ . Le même processus s'applique sur  $\mathbf{T}_2$  pour donner le tenseur  $\mathbf{Z}_i$  et la matrice  $\mathbf{U}_{view}^{(i)}$ . La figure 4.20 présente le rendu d'une BTF multi-échelles formée par des cônes. La résolution de la texture de base de cette BTF est de  $64 \times 64$ . Son temps de simulation est presque le même qu'une BTF simple, puisque nous calculons la BTF de base puis nous moyennons les quatre texels voisins pour produire les textures filtrées de résolutions inférieures. Le temps de calcul de cette hiérarchie est négligeable par rapport à celui de simulation de la BTF de base. Sa compression prend environ quatre heures en utilisant le GPU. Son taux de compression est entre 1 : 300 et 1 : 400. La taille finale de cette BTF multi-échelle est de 65 MO vs 50 MO pour une BTF simple.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales techniques d'illumination globale. Nous avons pu les classifier par rapport aux critères d'optimalité que nous avons définis. Puis nous avons présenté notre approche de simulation de la BTF basée sur l'algorithme du tracer de chemins bidirectionnels. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la description de notre approche d'ajout des silhouettes au rendu de la BTF. Dans la dernière section de ce chapitre, nous avons décrit notre méthode de rendu de BTF multi-échelle.

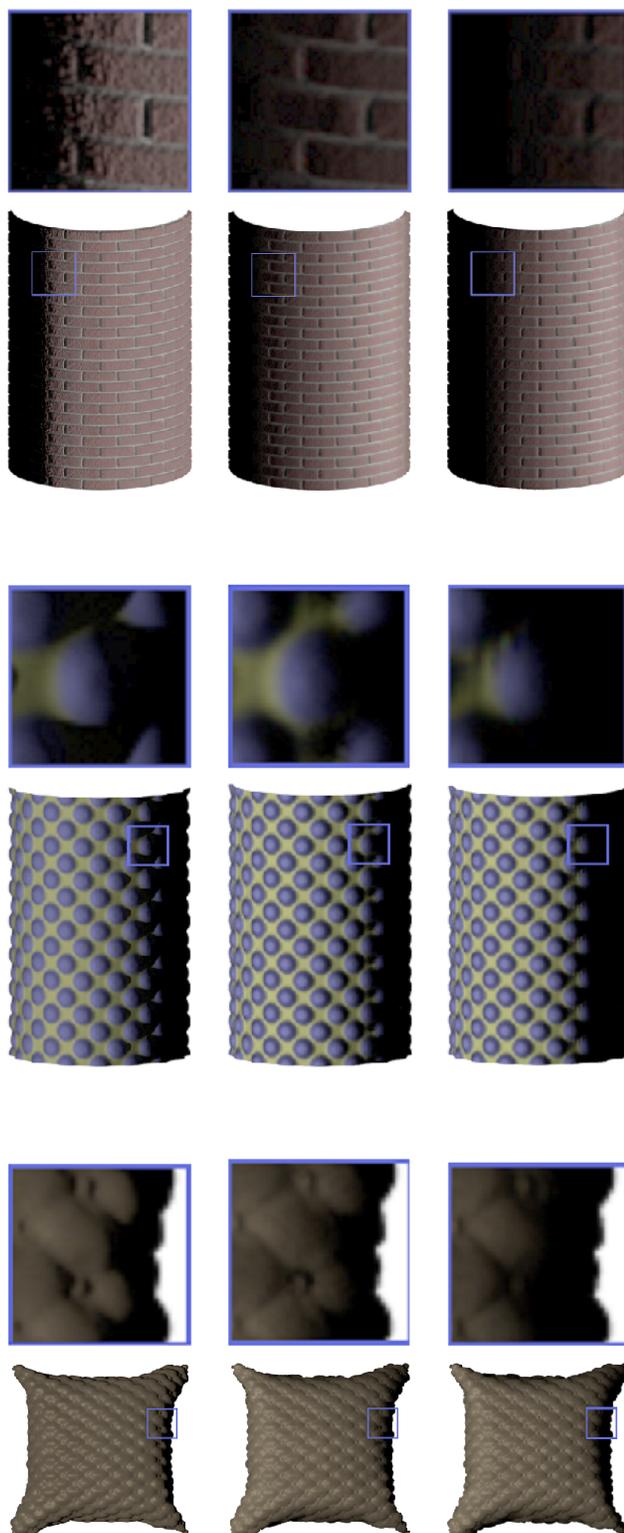


Figure 4.17 – Notre méthode approche la solution exacte calculée avec le *Monte Carlo Path Tracing*. Gauche : Solution exacte. Centre : BTF. Droite : BTF sans traverser les texels déformés.

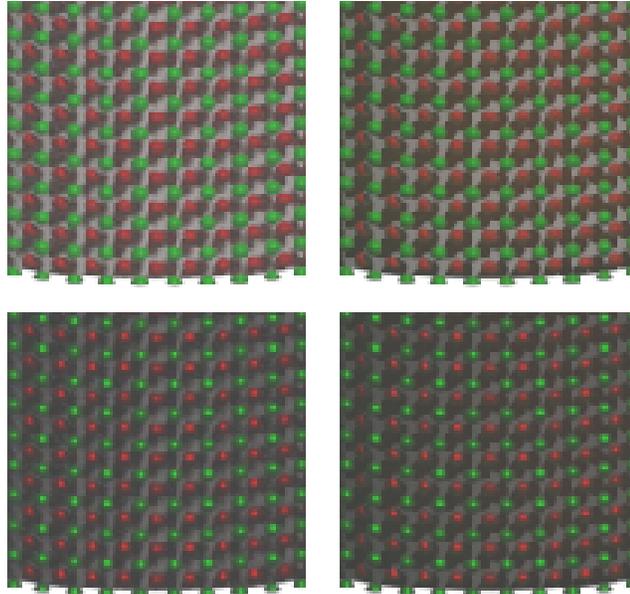


Figure 4.18 – Une surface légèrement courbe avec une BTF faite d'un ensemble de sphères. Gauche : BTFs simulées. Droite : solution exacte. Certaines petites différences sont essentiellement liées à la discrétisation et la compression de la VMF/BTF. Certaines différences d'intensités globales sont liées à notre *tone mapping* trop approximatif.

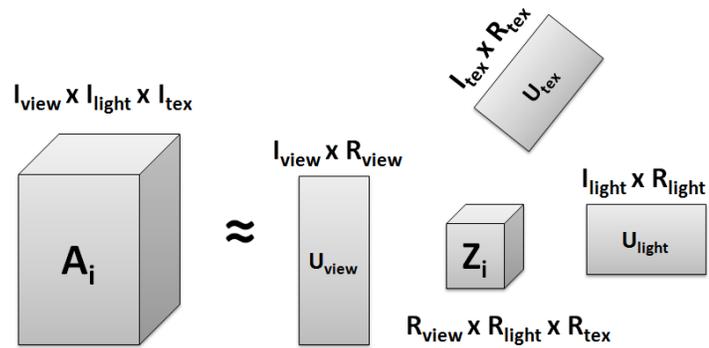


Figure 4.19 – Décomposition d'un tenseur d'ordre 3.

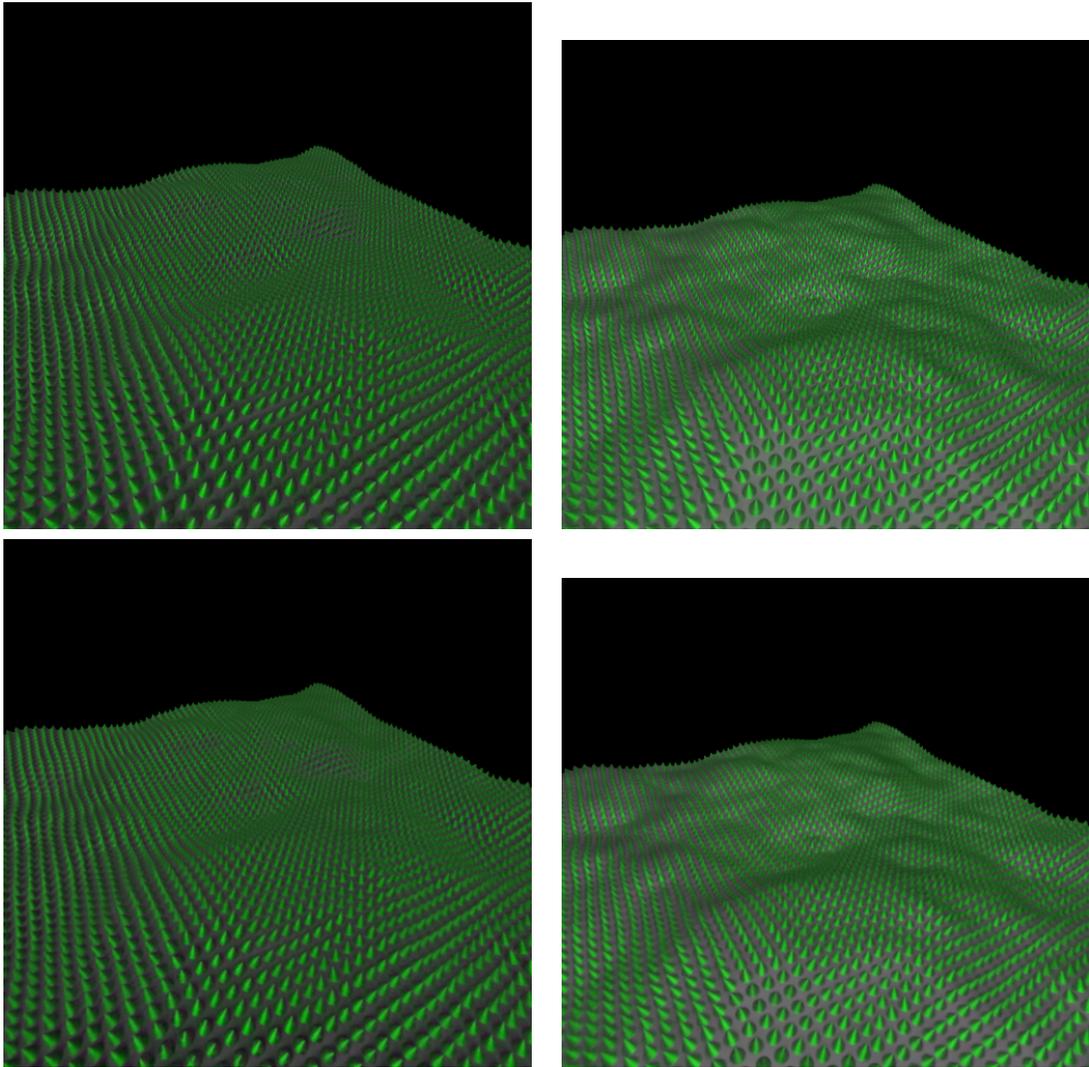


Figure 4.20 – Une surface vallonnée avec une BTF multi-échelle faite d'un ensemble de cônes. Haut : solution exacte. Bas : BTFs multi-échelles.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La modélisation de l'interaction entre la lumière et les matériaux, et la description géométrique des objets physiques sont omniprésentes dans tous les domaines de la synthèse d'images. Ces techniques sont combinées dans le but de générer des images synthétiques ayant une apparence aussi réaliste que possible. La réflectance de la surface d'un objet est décrite par une fonction multidimensionnelle qui dépend des propriétés de la surface, de son étendue et de la position d'observation. Pour une surface homogène et à une échelle macroscopique, la BRDF reste suffisante pour décrire ses propriétés de réflectance. Néanmoins, cette modélisation reste très simpliste et ne permet pas de décrire tous les phénomènes optiques qui se manifestent à la surface des matériaux.

Pour introduire plus de souplesse dans la mise à l'échelle de la modélisation de la réflectance des matériaux et pour tenir compte des effets optiques globaux, Dana et al. [10] ont défini la BTF. Les BTFs sont utilisées en synthèse d'images, mais d'une façon limitée en partie par la difficulté de les extraire, et en partie par leur taille considérable.

Dans ce mémoire de maîtrise, nous nous sommes intéressés à la simulation des BTFs afin de représenter des surfaces possédant des structures physiques potentiellement très complexes.

Nous avons présenté au cours des divers chapitres les différents domaines qui y interviennent. Ainsi, nous avons donné un aperçu sur les différents systèmes de mesure de BRDFs et BTFs existants. Nous avons pu les classer suivant des propriétés communes et nous avons décrit quelques exemples de systèmes de chaque classe pour bien expliquer leur principe de fonctionnement. Puis nous avons présenté notre système virtuel de

simulation de BTFs. Nous avons mis en évidence ses apports par rapport aux systèmes physiques existants.

Nous avons donné une étude détaillée sur quelques techniques d'illumination globale. Nous avons pu identifier les avantages et les inconvénients de chaque méthode par rapport aux critères d'optimalité que nous avons fixés. Puis nous avons présenté la solution adoptée basée sur l'algorithme du tracer de chemins bidirectionnels. Pour générer des rendus de meilleure qualité, nous avons ajouté à la BTF une structure 4D de carte de visibilité (VMF). Cette structure nous a permis d'inclure des effets d'occultations, d'ombres et de silhouettes dans le rendu final des BTFs. Une étude des diverses techniques de compression de BTFs a été présentée. Cette étude nous a permis de définir les stratégies de compression à adopter et les différentes possibilités actuellement disponibles. Finalement, nous avons étendu la méthode de mipmapping des textures couleurs aux BTFs, afin de produire des images de BTFs mieux filtrées à différentes échelles d'affichage.

A l'issue de ce travail, des travaux futurs sont à envisager. Nous pouvons citer :

- La dérivation d'un modèle analytique des BTFs simulées, incluant des phénomènes optiques individuels.
- L'augmentation de la dimension du problème en ajoutant des nouveaux paramètres tels que le mouvement, la déformation, l'usure (vêtements), la période de l'année (feuillage), etc.

Les BTFs forment une représentation puissante et flexible de l'apparence des surfaces. Nous espérons que nos contributions pourront servir à les rendre encore plus populaires en réduisant les freins technologiques qui nuisent à leur pleine exploitation.

Dans un deuxième volet, nous espérons promouvoir par nos efforts l'idée de la simulation de phénomènes complexes afin d'en extraire des modèles simplifiés bien adaptés aux divers besoins des applications en synthèse d'images.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] David Arthur et Sergei Vassilvitskii. K-means++ : the advantages of careful seeding. Dans *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, SODA '07, pages 1027–1035. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1283383.1283494>.
- [2] Michael Ashikhmin et Peter Shirley. An anisotropic phong BRDF model. *J. Graph. Tools*, 5(2):25–32, 2000.
- [3] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 11(2):192–198, 1977.
- [4] C. Boutsidis et E. Gallopoulos. SVD based initialization : A head start for nonnegative matrix factorization. *Pattern Recogn.*, 41(4):1350–1362, avril 2008. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2007.09.010>.
- [5] Jonathan Brouillat. *Illumination Globale par Monte Carlo Bayésien et cache d'éclairage généré à partir d'une carte de photons*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2009.
- [6] Brian Cabral, Nelson Max et Rebecca Springmeyer. Bidirectional reflection functions from surface bump maps. Dans *SIGGRAPH '87 : Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 273–281. ACM, 1987.
- [7] Ângelo Cardoso et Andreas Wichert. Iterative random projections for high-dimensional data clustering. *Pattern Recogn. Lett.*, 33(13):1749–1755, octobre 2012. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2012.06.007>.
- [8] F.J.J. Clarke et D.J. Parry. Helmholtz reciprocity : its validity and application to reflectometry. volume 17, pages 1–11. Lighting Research and Technology, 1985.

- [9] R. L. Cook et K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1):7–24, 1982.
- [10] Kristin J. Dana, Bram van Ginneken, Shree K. Nayar et Jan J. Koenderink. Reflectance and texture of real-world surfaces. *ACM Trans. Graph.*, 18(1):1–34, 1999.
- [11] J. Filip et M. Haindl. Efficient image based bidirectional texture function model. Dans M. Chantler et O. Drbohlav, éditeurs, *Texture 2005 : Proceedings of 4th International Workshop on Texture Analysis and Synthesis*, pages 7–12. Heriot-Watt University, October 2005. URL <http://staff.utia.cas.cz/filip/papers/filip05efficient.pdf>.
- [12] J. Filip et M. Haindl. Bidirectional texture function modeling : A state of the art survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(11):1921–1940, October 2009.
- [13] Adrià Forés, Sumanta N. Pattanaik, Carles Bosch et Xavier Pueyo. BRDFLab : A general system for designing BRDFs. Dans *Proceedings CEIG'09*. Eurographics, 2009.
- [14] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg et Bennett Bataille. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. Dans *Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '84, pages 213–222. ACM, 1984. URL <http://doi.acm.org/10.1145/800031.808601>.
- [15] Jefferson Y. Han et Ken Perlin. Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope. Dans *SIGGRAPH '03 : ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pages 741–748. ACM, 2003.
- [16] Vlastimil Havran, J. Filip et Karol Myszkowski. Bidirectional texture function compression based on multi-level vector quantization. *Comput. Graph. Forum*, 29(1):175–190, 2010.

- [17] Xiao D. He, Kenneth E. Torrance, François X. Sillion et Donald P. Greenberg. A comprehensive physical model for light reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 25(4):175–186, juillet 1991. URL <http://doi.acm.org/10.1145/127719.122738>.
- [18] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. Dans *Proceedings of the Eurographics workshop on Rendering '96*, pages 21–30. Springer-Verlag, 1996.
- [19] W. B. Johnson et J. Lindenstrauss. Extensions of Lipschitz maps into a Hilbert space. volume 26, pages 189–206. *Modern Analysis and Probability*, 1984.
- [20] James T. Kajiya. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4): 143–150, 1986.
- [21] Jan Kautz et Michael D. McCool. Interactive rendering with arbitrary BRDFs using separable approximations. Dans *SIGGRAPH '99 : ACM SIGGRAPH 99 Conference abstracts and applications*, page 253. ACM, 1999.
- [22] Jan Kautz, Peter-Pike Sloan et John Snyder. Fast, arbitrary BRDF shading for low-frequency lighting using spherical harmonics. Dans *EGWR '02 : Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 291–296. Eurographics Association, 2002.
- [23] Melissa L. Koudelka, Sebastian Magda, Peter N. Belhumeur et David J. Kriegman. Acquisition, compression, and synthesis of bidirectional texture functions. Dans *ICCV 03 Workshop on Texture Analysis and Synthesis*, 2003.
- [24] Eric P. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance et Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. Dans *Proc. SIGGRAPH '97*, volume 31, pages 117–126, 1997.
- [25] Eric P. Lafortune et Yves D. Willems. Bi-directional path tracing. Dans *Proceedings of third international conference on computational graphics and visualization techniques (Compugraphics '93)*, pages 145–153, 1993.

- [26] Eric P. F. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance et Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. Dans *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–126. ACM, 1997.
- [27] Paul Lalonde et Alain Fournier. A wavelet representation of reflectance functions. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(4):329–336, 1997.
- [28] Jason Lawrence, Szymon Rusinkiewicz et Ravi Ramamoorthi. Efficient BRDF importance sampling using a factored representation. Dans *SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pages 496–505. ACM, 2004.
- [29] Daniel D. Lee et H. Sebastian Seung. Algorithms for non-negative matrix factorization. Dans *Neural Information Processing Systems*, pages 556–562. MIT Press, 2000.
- [30] Jaakko Lehtinen et Jan Kautz. Matrix radiance transfer. Dans *I3D '03 : Proceedings of the 2003 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 59–64. ACM, 2003.
- [31] Hongsong Li, Sing Choong Foo, Kenneth E. Torrance et Stephen H. Westin. Automated three-axis gonireflectometer for computer graphics applications. Dans *Optical Engineering*, 2005.
- [32] Rong Lu et Jan J. Koenderink. Optical properties (bidirectional reflection distribution functions) of velvet. *Applied Optics*, 37:5974–5984, 1998.
- [33] Wan-Chun Ma, Sung-Hsiang Chao, Yu-Ting Tseng, Yung-Yu Chuang, Chun-Fa Chang, Bing-Yu Chen et Ming Ouhyoung. Level-of-detail representation of bidirectional texture functions for real-time rendering. Dans *Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games, I3D '05*, pages 187–194. ACM, 2005. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1053427.1053458>.

- [34] Sebastian Magda et David Kriegman. Reconstruction of volumetric surface textures for real-time rendering. Dans *Proceedings of the 17th Eurographics conference on Rendering Techniques*, EGSR'06, pages 19–29. Eurographics Association, 2006. URL <http://dx.doi.org/10.2312/EGWR/EGSR06/019-029>.
- [35] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune et Kenneth E. Torrance. Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement. *Applied Optics*, 39:2592–2600, 2000.
- [36] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand et Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. Dans *SIGGRAPH '03 : ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pages 759–769. ACM, 2003.
- [37] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matthew Brand et Leonard McMillan. Efficient isotropic BRDF measurement. Dans *EGWR '03 : Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 241–247. Eurographics Association, 2003.
- [38] Nelson L. Max. Horizon mapping : shadows for bump-mapped surfaces. *The Visual Computer*, 4(2):109–117, 1988.
- [39] Michael D. McCool, Jason Ang et Anis Ahmad. Homomorphic factorization of BRDFs for high-performance rendering. Dans *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 171–178. ACM, 2001.
- [40] G. Müller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette et R. Klein. Acquisition, synthesis and rendering of bidirectional texture functions. Dans Christophe Schlick et Werner Purgathofer, éditeurs, *Eurographics 2004, State of the Art Reports*, pages 69–94. INRIA and Eurographics Association, September 2004.
- [41] Gero Müller, Gerhard H. Bendels et Reinhard Klein. Rapid synchronous acquisition of geometry and BTF for cultural heritage artefacts. Dans *6th International*

- Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, pages 13–20. Eurographics Association, novembre 2005.
- [42] J. F. Murray-Coleman et A. M. Smith. The automated measurement of BRDFs and their application to luminaire modeling. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pages 87–99, 1990.
- [43] Diego Nehab et Philip Shilane. Stratified point sampling of 3D models. Dans *Eurographics Symposium on Point-Based Graphics*, pages 49–56, juin 2004.
- [44] Addy Ngan, Frédo Durand et Wojciech Matusik. Experimental analysis of BRDF models. Dans *Proceedings of the Sixteenth Eurographics Conference on Rendering Techniques*, EGSR'05, pages 117–126. Eurographics Association, 2005.
- [45] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg et T. Limperis. Radiometry. chapitre Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance, pages 94–145. Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1992. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=136913.136929>.
- [46] Pierre Poulin et Alain Fournier. A model for anisotropic reflection. Dans *SIGGRAPH*, pages 273–282, 1990.
- [47] J. E. Proctor et P. Y. Barnes. Nist high accuracy reference reflectometer-spectrophotometer. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, pages 619–627, 1996.
- [48] Tobias Ritschel, Thorsten Grosch, Jan Kautz et Hans-Peter Seidel. Interactive global illumination based on coherent surface shadow maps. Dans *GI '08 : Proceedings of Graphics Interface 2008*, pages 185–192. Canadian Information Processing Society, 2008.
- [49] Roland Ruiters et Reinhard Klein. BTF compression via sparse tensor decomposition. *Computer Graphics Forum*, 28(4):1181–1188, juillet 2009.

- [50] Szymon Rusinkiewicz. A new change of variables for efficient BRDF representation. Dans *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*. Springer-Verlag, juin 1998.
- [51] Mirko Sattler, Ralf Sarlette et Reinhard Klein. Efficient and realistic visualization of cloth. Dans *EGWR '03 : Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, pages 167–177. Eurographics Association, 2003.
- [52] Peter Schröder et Wim Sweldens. Spherical wavelets : efficiently representing functions on the sphere. Dans *SIGGRAPH '95 : Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 161–172. ACM, 1995.
- [53] François Sillion, James Arvo, Stephen Westin et Donald P. Greenberg. A global illumination solution for general reflectance distributions. Dans *SIGGRAPH'91 conference proceedings*, pages 187–196. ACM Press, 1991. URL <http://artis.imag.fr/Publications/1991/SAWG91>.
- [54] Peter-Pike Sloan, Jesse Hall, John Hart et John Snyder. Clustered principal components for precomputed radiance transfer. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):382–391, 2003.
- [55] Peter-Pike Sloan, Jan Kautz et John Snyder. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):527–536, juillet 2002.
- [56] Peter-Pike Sloan, Xinguo Liu, Heung-Yeung Shum et John Snyder. Bi-scale radiance transfer. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):370–375, 2003.
- [57] Marcos Paulo Berteli Slomp, Manuel M. Oliveira et Diego Inácio Patrício. A gentle introduction to precomputed radiance transfer. *RITA*, 13(2):131–160, 2006.
- [58] Frank Suykens, Karl Vom Berge, Ares Lagae et Philip Dutré. Interactive rendering with bidirectional texture functions. *Computer Graphics Forum*, 22:463–472, 2003.

- [59] K. Torrance et E. Sparrow. Theory for off-specular reflection from rough surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 1967.
- [60] E. Veach et L. J. Guibas. Bidirectional estimators for light transport. *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 147–162, June 1994.
- [61] Eric Veach et Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. Dans *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 65–76. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [62] Jiaping Wang, Xin Tong, John Snyder, Yanyun Chen, Baining Guo et Heung-Yeung Shum. Capturing and rendering geometry details for BTF-mapped surfaces. *The Visual Computer*, 21(8-10):559–568, 2005.
- [63] Lifeng Wang, Xi Wang, Xin Tong, Stephen Lin, Shimin Hu, Baining Guo et Heung-Yeung Shum. View-dependent displacement mapping. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):334–339, juillet 2003. URL <http://doi.acm.org/10.1145/882262.882272>.
- [64] Xi Wang, Xin Tong, Stephen Lin, Shimin Hu, Baining Guo et Heung-Yeung Shum. Generalized displacement maps. Dans *Proceedings of the Fifteenth Eurographics conference on Rendering Techniques, EGSR'04*, pages 227–233. Eurographics Association, 2004. URL <http://dx.doi.org/10.2312/EGWR/EGSR04/227-233>.
- [65] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2):265–272, 1992.
- [66] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein et Robert D. Clear. A ray tracing solution for diffuse interreflection. Dans *SIGGRAPH '88 : Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 85–92. ACM, 1988.

- [67] Stephen H. Westin, James R. Arvo et Kenneth E. Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2):255–264, 1992.
- [68] Lance Williams. Pyramidal parametrics. Dans *Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '83, pages 1–11. ACM, 1983. URL <http://doi.acm.org/10.1145/800059.801126>.