

**UNIVERSITÉ DE LIMOGES**  
ÉCOLE DOCTORALE « Science, Technologie, Santé »  
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Thèse N<sup>o</sup> : 47-2009

**THÈSE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES**

**Discipline / Spécialité : Informatique**

présentée et soutenue par

**Nadir BENMOUNAH**

le 22 octobre 2009

# Rendu temps-réel d'objets translucides

*Thèse dirigée par Djamchid Ghazanfarpour,*

*Co-encadrée par Vincent Jolivet*

**JURY**

Rapporteurs :

M. Jean-Michel DISCHLER

Professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg

M. Mateu SBERT

Professeur à l'Universitat de Girona

Examineurs :

M. Daniel MENEVEAUX

Maître de conférences à l'Université de Poitiers

M. Djamchid GHAZANFARPOUR

Professeur à l'Université de Limoges

M. Vincent JOLIVET

Maître de conférences à l'Université de Limoges



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Djamchid Ghazanfar-pour pour la confiance qu'il m'a accordée, ainsi que pour la liberté concédée quant à mes orientations de recherche. Je remercie également Vincent Jolivet avec qui, j'ai eu grand plaisir à travailler durant ces trois années de thèse.

J'adresse mes sincères remerciements aux professeurs Jean-Michel Dischler et Mateu Sbert d'avoir accepté d'être rapporteurs, ainsi que Monsieur Daniel Meneveaux pour son rôle d'examineur. Merci de me faire l'honneur d'évaluer mes travaux de recherche.

Je voudrais aussi remercier mes collègues sur le site de Jidé, à C. Burgod, E. Darles, C. Lam, A. Peyrat et M. Pouchol. Merci à tous les occupants des locaux de Jidé de m'avoir accueilli.

Je témoigne ma gratitude à mes parents, qui depuis l'Algérie ont toujours su trouver les mots et les moyens de me soutenir et de me reconforter, depuis ma présence en France.

À mon petit frère.

À Hamid, Zmorda et Laurent.



## Résumé

La reproduction du réel assistée par ordinateur connaît une avancée telle, que les travaux récents proposés dans ce domaine s'acharnent à produire des images rivalisant de réalisme. Il est un phénomène naturel sur lequel se porte un intérêt croissant, celui de la translucidité. Cet intérêt est justifié par l'omniprésence de matériaux translucides (tels que la peau humaine, le plastic, la céramique, la cire, les feuilles botaniques et le papier), dans le monde qui nous entoure. La simulation de l'absorption de la lumière par la matière a su profiter de l'abondance de la littérature scientifique en physique et en optique, ainsi que des dernières avancées technologiques que connaissent les cartes graphiques, afin de s'imposer comme une nouvelle branche de la recherche en synthèse d'images. La lumière qui entre en interaction avec les matériaux translucides se comporte d'une manière complexe, où les photons suivent au sein de la matière, des trajectoires très souvent imprévisibles, mais régies par des modèles différentiels exploitables sur nos machines.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons évidemment au phénomène de la translucidité, mais sous plusieurs aspects. Afin de cerner les différents aspects en rapport avec ce phénomène, ainsi que la théorie du comportement de la lumière dans les milieux absorbants, une étude préalable de la physique et de l'optique du rayonnement a été nécessaire. Cette étude est suivie par une présentation des travaux portant sur le rendu d'objets translucides. C'est à partir de cette première partie que nous avons réuni les éléments nécessaires à la mise en place de deux méthodes qui se distinguent par leur but et les modèles appliqués.

Le deuxième chapitre introduit la première méthode que nous avons proposée, permettant la simulation de la translucidité d'objets déformables. La déformabilité des objets translucides représente un défi en synthèse d'images, puisqu'il est nécessaire de se baser sur des modèles capables de produire des images, sous des temps de calculs peu élevés, afin d'estimer le transport de la lumière à chaque changement

dans la géométrie.

Dans le troisième chapitre, nous détaillons notre deuxième méthode, et qui concerne un matériau translucide particulier ; la porcelaine. Ce matériau est très souvent couvert d'une couche d'émail, translucide à son tour. Nous avons alors appliqué un modèle utilisé par les prothésistes dentaires, afin de prédire la couleur de dentiers constitués de porcelaine et de la faire coïncider avec la couleur naturelle des dents. Ce modèle nous a permis de développer un moteur de rendu d'objets en porcelaine émaillée (constitués de plusieurs couches), capable éventuellement de produire des images de matériaux céramiques et hétérogènes.

**Mots-clés :** synthèse d'images, rendu réaliste, rendu temps-réel, rendu sous-surfacique, phénomènes naturels, porcelaine.

# Abstract

The reproduction of nature in computer-aided applications knows a significant revolution, in a way that the most recent proposed work in this domain produces images showing more and more realism. The graphics community takes an increasing interest in the translucidity phenomenon. This interest is justified by the omnipresence of translucent materials (such as human skin, plastic, ceramics, wax, leaves and paper), in every day's life. Light absorption simulation has taken profits of the abundant scientific literature in physics and optics, and the last advancements in graphics cards, to establish itself as a new branch in image synthesis research. When light interacts with translucent materials, it behaves in a complex manner, where photons scatter within the matter, following unpredictable trajectories, but governed by differential models, that are machine readable.

In the scope of this thesis, we are obviously interesting in the translucency phenomenon, but under many aspects. In order to apprehend the essence of the different aspects in relation with this phenomenon, and the light behaviour theory in absorbing mediums, a preliminary study in radiation physics and optics has been necessary. This study is followed by a presentation of work dealing with translucent rendering. From this first part, we were able to gather the necessary information in order to implement two novel methods different in scope and used models.

The second chapter introduces the first method we proposed, dealing with the simulation of translucent and deformable objects. The deformability of translucent objects represents a real challenge in image synthesis, because it is necessary to use real-time models, to estimate the internal light transport at each geometry modification.

In the third chapter, we present our second method, that concerns a particular translucent material; porcelain. This material is often fired by enamel, which is also

translucent. We have then applied a model used by prosthodontists to predict dentures' colours, and to match it with the natural teeth colour. This model allowed us to develop a rendering engine dealing with enameled porcelain objects (constituted by many layers), that is eventually able to produce images of heterogeneous and ceramic objects.

**Keywords :** computer graphics, realistic rendering, real-time rendering, subsurface scattering, natural phenomena, porcelain.

---

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Rendu sous-surfacique</b>	<b>7</b>
1.1 Méthodes basées sur la BSSRDF . . . . .	10
1.1.1 Rendu sous-surfacique non temps-réel . . . . .	11
1.1.2 Rendu sous-surfacique temps-réel . . . . .	20
1.1.3 Rendu sous-surfacique multicouches . . . . .	29
1.1.4 Rendu sous-surfacique de matériaux hétérogènes . . . . .	33
1.1.5 Rendu sous-surfacique d'objets déformables . . . . .	37
1.2 Méthodes basées sur la BRDF . . . . .	39
1.2.1 Le modèle de Kubelka-Munk . . . . .	40
1.2.2 De la théorie de Kubelka-Munk au rendu de la porcelaine . . .	42
1.2.3 Acquisition de la réflectance et de la transmittance . . . . .	44
1.3 Conclusion . . . . .	50
<b>2 Rendu temps-réel d'objets translucides et déformables</b>	<b>53</b>
2.1 Introduction . . . . .	53
2.2 Algorithmes et techniques . . . . .	56
2.2.1 Création des ATF et calculs des radiances d'entrée . . . . .	57
2.2.2 Estimation de la diffusion sous-surfacique . . . . .	61
2.2.3 Déformabilité . . . . .	66
2.2.4 Implémentation . . . . .	67
2.3 Résultats . . . . .	69
2.4 Discussion et travaux futurs . . . . .	75

<b>3</b>	<b>Rendu temps-réel d'objets en porcelaine</b>	<b>77</b>
3.1	Introduction . . . . .	78
3.2	Phénoménologie de la diffusion . . . . .	80
3.3	Acquisition des spectres de réponse et estimation des propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail . . . . .	81
3.3.1	Mesure de la réflectance et de la transmittance . . . . .	81
3.3.2	Estimation des propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail	84
3.4	Algorithmes et rendu final . . . . .	87
3.4.1	Voxelisation des maillages polygonaux . . . . .	88
3.4.2	Calcul de l'épaisseur . . . . .	89
3.4.3	Caclul de la BRDF et rendu final . . . . .	90
3.5	Résultats . . . . .	91
3.5.1	Résumé de l'ensemble des méthodes et techniques . . . . .	91
3.5.2	Performances . . . . .	92
3.5.3	Rendu d'objets en porcelaine émaillée et matériaux translucides hétérogènes . . . . .	93
3.6	Discussion et travaux futurs . . . . .	97
	<b>Bibliographie</b>	<b>103</b>

# Table des figures

1	Objets divers en matériaux translucides : Une feuille de papier éclairée (a), une lithophanie en porcelaine éclairée de l'intérieur (b), une feuille d'arbre (c), une bougie en cire éclairée par sa flamme (d) et des veilleuses en plastic (e). . . . .	2
1.1	Comparaison de rendus obtenus à l'aide d'une BRDF et d'une BSSRDF.	9
1.2	Dispersion de la lumière : dans (a) à l'aide d'une BRDF et dans (b) à l'aide d'une BSSRDF. . . . .	10
1.3	Diffusion simple. . . . .	14
1.4	Schéma décrivant le modèle de la source dipôle pour la résolution de l'approximation de la diffusion. . . . .	17
1.5	Rendu de peau humaine. Images issues de [JMLH01]. . . . .	19
1.6	Résultats obtenus par des moteurs de rendu de la peau, proposés par <i>Nvidia</i> et <i>ATI</i> . . . . .	21
1.7	Résultats obtenus par des méthodes utilisant des atlas de textures. . .	23
1.8	Les deux parties de l'évaluation de la BSSRDF selon [DS03]. Composante locale, en haut. Composante globale, en bas. . . . .	25
1.9	À gauche, rendu d'un Père Noël translucide. À droite, rendu de peau.	26
1.10	Rendu translucide du Buddha illuminé par deux cartes d'environnement différentes. Images extraites de [SHHS03]. . . . .	27
1.11	Résultats extraits de [WTL05]. . . . .	28
1.12	Images extraites de modèles de rendu translucide paramétrables. . . .	30
1.13	Adaptation de l'approximation du dipôle, dans le cas d'un matériau en couches d'épaisseur finie. . . . .	34
1.14	Images extraites de [DJ06]. . . . .	34

1.15	Quelques résultats issus de méthodes de rendu translucide hétérogène, basées sur l'acquisition. . . . .	36
1.16	Quelques résultats issus de méthodes de rendu translucide hétérogène, basées sur l'équation de la diffusion. . . . .	37
1.17	Quelques résultats issus de méthodes de rendu d'objets translucides et déformables. . . . .	40
1.18	Coupe schématique d'une couche diffusante et absorbante. . . . .	41
1.19	Photo du dispositif utilisé dans [PBM <sup>+</sup> 06]. . . . .	45
1.20	À gauche, image représentant le système d'acquisition utilisé par Weyrich <i>et al.</i> . À droite, image extraite de [WMP <sup>+</sup> 06]. . . . .	48
1.21	Photo du dispositif utilisé dans [WSB <sup>+</sup> 98]. . . . .	49
1.22	À gauche, image représentant une robe en satin, où la réflectance est mesurée par Tsuchida <i>et al.</i> . À droite, image extraite de [LFTW05]. . . . .	51
2.1	Projection sur le cube englobant. . . . .	58
2.2	Définition des coordonnées de textures. . . . .	59
2.3	Le plan tangent définit deux sous-espaces. Seules les faces 1,2,4,6 sont en interaction avec le sous-espace supérieur sont choisies. . . . .	62
2.4	Tri de faces . . . . .	63
2.5	Le point M est projeté sur la face du haut et celle de droite. Seule la face du dessus est sélectionnée. . . . .	64
2.6	Sur la face gauche, l'inclinaison de la surface est moins importante par rapport à la face du haut. . . . .	65
2.7	Points proches projetés sur des positions éloignées. La distance d est assez petite pour considérer les points A et B comme proches. . . . .	66
2.8	Objet translucide en jade éclairé par-devant. Le résultat final est illustré sur l'image de droite. On peut remarquer que la profondeur de l'objet est plus perceptible, après introduction de la réponse globale. . . . .	67
2.9	Illustration de la mise à jour des cartes d'irradiances, lors de la déformation des objets. . . . .	68
2.10	De haut en bas, un objet translucide avec des tailles de noyau de 3x3, 4x4, 5x5, 6x6. Les deux dernières images possèdent le même histogramme d'intensités. . . . .	70
2.11	Vue d'ensemble des techniques proposées. . . . .	70

---

2.12	Bougie en cire. . . . .	72
2.13	Lithophanie : Les zones fines sont plus saturées en lumière qu'ailleurs dans l'objet. . . . .	72
2.14	Morphing d'un Buddha en jade, éclairé par-derrrière avec une source lumineuse ponctuelle. . . . .	73
2.15	Morphing d'un Buddha en porcelaine, éclairé à l'aide d'une carte d'environnement. . . . .	74
3.1	Photos prises du côté plat d'une assiette en porcelaine. . . . .	79
3.2	Photos prises du côté en nervures d'une assiette en porcelaine. . . . .	79
3.3	Schéma explicatif des différents modules composant le goniospectromètre, et les interactions qui les relie. . . . .	82
3.4	Photo prise du dispositif d'acquisition de la réflectance et de la transmittance. . . . .	83
3.5	Courbes représentant la réflectance de la porcelaine et de l'émail. . . . .	85
3.6	Courbes représentant la transmittance de la porcelaine et de l'émail. . . . .	86
3.7	Schéma explicatif du processus de voxelisation. . . . .	88
3.8	Schéma décrivant l'algorithme de calcul de l'épaisseur sur une grille 2D. . . . .	89
3.9	Résultats de rendu d'objets en porcelaine émaillée. . . . .	94
3.10	Résultats du modèle de Kubelka-Munk appliqué aux objets en porcelaine émaillée de géométrie fine. . . . .	95
3.11	Résultats de l'application de notre méthode aux matériaux translucides hétérogènes. . . . .	96



## Liste des tableaux

- 2.1 Cette table liste le nombre d'images par seconde, le nombre de triangles de chaque modèle, sur des maillages déformables et non déformables. . . . . 71
- 3.1 Résumé des coefficients optiques calculés de l'émail et de la porcelaine. Les coefficients sont donnés aux longueurs d'onde  $470nm$ ,  $530nm$  et  $650nm$  . . . . . 87
- 3.2 Vitesses d'exécution du rendu d'objets en porcelaine émaillée, pour différentes résolutions de maillage. . . . . 92



# Introduction

## Qu'est-ce que la translucidité ?

La lumière éblouit, éclaire et excite nos cellules oculaires. La lumière se disperse, se réfléchit, se réfracte et traverse bien des milieux. C'est sur cette dernière caractéristique que s'était portée notre attention, dans le cadre de cette thèse. Plus précisément, la diffusion de la lumière à travers des matériaux semi-transparents ou translucides. Un matériau translucide présente une certaine pénétration de la lumière, mais ne nous permet pas de voir à travers lui. La diffusion sous surfacique décrit ce phénomène, lorsque la lumière interagit avec un matériau translucide, elle pénètre à l'intérieur depuis sa surface. Ce phénomène apporte au matériau une apparence douce, inhibant ses petits détails géométriques.

Peut-être l'avez-vous déjà testé de votre enfance. Dans une pièce sombre, une lampe torche à la main pointée sur la paume de l'autre main. C'est avec étonnement et joie que vous avez dû faire cette étrange constatation : votre main semble comme saturée de lumière rouge, à croire que la lumière l'avait traversée, c'est à peine si les os ne sont pas visibles... On comprend alors que la peau humaine est translucide, mais elle n'est pas la seule à bénéficier de cette propriété. Dans le monde qui nous entoure, nous pouvons rencontrer une multitude d'objets translucides (voir Fig. 1), la cire des bougies, les plantes et leurs feuilles, le papier, le plastic, le caoutchouc, les céramiques... En réalité, la plupart des matériaux non métalliques sont translucides.

On peut s'interroger sur la façon dont la lumière se comporte, une fois en contact de matériaux translucides. La lumière interagissant avec ces matériaux est absorbée, diffusée, ou quitte l'objet. Au cours de ce phénomène sous-surfacique, les différentes longueurs d'onde de la lumière sont absorbées, diffusées ou transmises de manière distincte, selon la composition du matériau. De plus, la lumière se réfléchit à plu-



FIG. 1: Objets divers en matériaux translucides : Une feuille de papier éclairée (a), une lithophanie en porcelaine éclairée de l'intérieur (b), une feuille d'arbre (c), une bougie en cire éclairée par sa flamme (d) et des veilleuses en plastic (e).

sieurs reprises, elle devient isotropique, ainsi, les directions dans lesquelles les rayons quittent la surface sont essentiellement aléatoires. Il est donc clair qu'un modèle classique, tel que le modèle de Lambert ne sied guère à modéliser la diffusion sous-surfacique.

Au premier abord, nous pouvons penser qu'un matériau tel que la porcelaine n'est aucunement translucide. En plus de sa dureté et de son éclatante blancheur, la propriété de translucidité de ce matériau a pourtant, et depuis plusieurs siècles, justifié sa réputation luxueuse. Nul ne peut alors nier l'importante que peut apporter la translucidité à l'esthétique et à l'apparence d'un objet. La translucidité peut aussi trouver des applications autres qu'esthétiques. Le polyméthacrylate de méthyle, plus connu sous le nom de *Plexiglas*, est un matériau utilisé pour la construction de

carreaux. Le *Plexiglas* laisse passer la lumière, tout en préservant l'intimité de nos demeures.

## Comment perçoit-on la translucidité ?

Nous pouvons reformuler la question qui sert de titre autrement. En effet, nous pouvons nous interroger sur ce qui fait qu'un objet paraisse translucide ou opaque ? ou plus précisément, quels sont les facteurs qui déterminent la perception de la translucidité. De manière plus formelle, la translucidité est-elle une mesure quantifiable et estimable ?. Fleming *et al.* [FJH04] avaient essayé de répondre à ces questions. Ils établissent des études psychovisuelles concernant le processus de perception d'objets translucides, ainsi que des traitements d'images représentant ces mêmes objets.

### Facteurs physiques

On a absorbé que l'œil humain s'attend inconsciemment à apercevoir des reflets sur la surface d'objets présentant une certaine translucidité. Ces reflets sont le résultat de la différence entre les indices de réfraction entre deux couches de matériaux distincts, et ne sont donc pas une conséquence directe du transport interne de la lumière. Il est cependant évident que l'apparition de reflets n'est pas seule indicatrice de translucidité.

Intuitivement, on se rend compte que l'éclairage d'un objet depuis le coté opposé à l'observateur accentue la perception de la semitransparence des objets translucides. Une illumination frontale, même si elle peut suggérer la translucidité d'un matériau, fournit une information moindre sur ce phénomène. Ainsi, si nous désirons accentuer la translucidité d'un objet, nous devons faire en sorte que cet objet soit éclairé par derrière.

### Traitement d'images

Fleming *et al.* démontrent que le traitement et l'analyse des caractéristiques d'images représentant des objets translucides fournissent des indications sur l'estimation et la perception de la translucidité.

La couleur n'est pas nécessaire à la perception de la translucidité. Une image

d'un objet translucide en niveau de gris permet à notre cerveau de se rendre compte de sa semi-transparence. Par contre, la couleur modifie sensiblement le sens de la translucidité lorsqu'elle présente.

La répartition des intensités d'une image d'objets translucides est uniforme. Il paraît alors raisonnable d'avancer, que notre œil prend en compte le contraste pour estimer l'opacité d'un objet. En effet, plus le matériau est translucide, plus il est saturé de lumière, créant ainsi un léger dégradé dans les nuances des couleurs sur la surface de l'objet. Cependant, l'information de contraste n'est pas suffisante pour la perception de la translucidité. En effet, si l'on perturbe spatialement les intensités d'une image d'un objet translucide, tout en gardant la même distribution, la perception de la transparence est considérablement réduite.

Une formalisation concrète et standard de la translucidité est quasi impossible. En combinant l'ensemble des caractéristiques physiques et des informations extraites de l'analyse d'images, une estimation informelle de la translucidité est alors plausible.

Une quantification formelle de la translucidité existe dans la littérature scientifique. Cette mesure se définit par grandeur communément appelée *épaisseur optique*. L'épaisseur optique caractérise la transparence d'un milieu, plus la visibilité au sein du matériau est réduite. Plus l'épaisseur optique sera importante. En d'autres termes, l'épaisseur optique est la quantité de la lumière qui traverse un milieu. Formellement, l'épaisseur optique mesure la partie de l'énergie perdue par absorption et diffusion. Cette grandeur varie selon les longueurs d'onde de la lumière, et peut même être influencée par la température du matériau.

## Organisation du mémoire

Dans nos travaux de recherche, on s'intéresse au rendu d'objets translucides pour lequel deux pistes ont été explorées. Avant d'exposer dans les détails les méthodes et les techniques relatives à ces deux pistes, il est opportun de commencer par dresser un panorama des travaux ayant trait au rendu de matériaux translucides, suivis des travaux concernant le modèle de Kubelka-Munk utilisé dans la deuxième phase de nos travaux. À la fin de cette partie, nous évoquons la littérature consacrée aux méthodes d'acquisition de la réflectance. Nous avons fait le choix de fournir, tout au long de ce même chapitre, des détails théoriques et techniques concernant le phénomène de

translucidité, que nous estimons nécessaires à la bonne compréhension des méthodes proposées dans l'état de l'art.

Le chapitre 2 décrit les algorithmes que nous avons appliqués pour le rendu d'objets translucides. Dans un souci de généralité, nous nous sommes appliqués à définir un moteur de rendu paramétrable, où une liberté du choix des types de matériaux translucides, des conditions d'illumination, ainsi que des points de vue, est proposée à son utilisateur.

Dans le chapitre 3, nous expliquerons l'intérêt de l'utilisation de la théorie de Kubelka-Munk, pour le rendu d'objets en porcelaine émaillée. Ce modèle se prête à des performances temps-réel, tout en prenant en compte la phénoménologie de la diffusion de la lumière, au sein des deux couches constituant ces objets. Nous verrons également comment les équations de cette théorie peuvent gérer des matériaux translucides hétérogènes, où le comportement de la lumière interagissant avec ces matériaux peut varier d'un endroit à un autre, sur et à l'intérieur de ces objets.



# Chapitre 1

## Rendu sous-surfacique

### Sommaire

---

<b>1.1 Méthodes basées sur la BSSRDF . . . . .</b>	<b>10</b>
1.1.1 Rendu sous-surfacique non temps-réel . . . . .	11
1.1.2 Rendu sous-surfacique temps-réel . . . . .	20
1.1.3 Rendu sous-surfacique multicouches . . . . .	29
1.1.4 Rendu sous-surfacique de matériaux hétérogènes . . . . .	33
1.1.5 Rendu sous-surfacique d'objets déformables . . . . .	37
<b>1.2 Méthodes basées sur la BRDF . . . . .</b>	<b>39</b>
1.2.1 Le modèle de Kubelka-Munk . . . . .	40
1.2.2 De la théorie de Kubelka-Munk au rendu de la porcelaine	42
1.2.3 Acquisition de la réflectance et de la transmittance . . . . .	44
<b>1.3 Conclusion . . . . .</b>	<b>50</b>

---

Lorsque la lumière rencontre un obstacle sur son chemin, elle est absorbée ou diffusée. Cet obstacle peut être la surface d'un matériau ou milieu peu dense. Il peut également être une particule ou une molécule dans un milieu volumique tel que les nuages ou les tas de sable. Nous pouvons aisément appréhender la lourdeur des calculs pour toute simulation de l'interaction de la lumière avec les milieux volumiques. Bien que la diffusion sous-surfacique soit un phénomène volumique, traiter le problème au moyen d'un modèle volumique reste très contraignant. La fonction de distribution de la réflectance sous-surfacique bidirectionnelle est un modèle qui contourne ce problème, et qui a largement été appliqué pour le rendu translucide. Ce modèle est inspiré de la théorie du transport de la lumière dans les milieux

volumiques.

Les anciens Perses pensaient que la terre reposait sur un saphir dont l'éclat bleuté se reflétait dans la couleur du ciel. Bien après, l'homme, toujours intrigué par cette couleur bleue céleste, et la perception des couleurs des objets en général, l'explique par l'effet de la diffusion de la lumière.

Pour qu'un matériau soit visible par l'œil humain, il faut que chaque point diffuse de la lumière. L'œil aperçoit donc la lumière réémise ou diffusée en chaque point de l'objet, et interprète, selon les différentes intensités des longueurs d'onde de la lumière reçue, la couleur du matériau. Le phénomène de la perception de la couleur dépasse le sens véhiculé par les termes de cette explication hâtive et sommaire. Il sera nécessaire, afin de comprendre le mécanisme de la perception de la lumière, fournir de plus amples informations, selon les matériaux considérés et leur composition, les sources d'éclairage, la température ambiante, etc. Dans le cadre de ma thèse, il est question de l'interaction de la lumière avec des objets translucides, denses ou épars optiquement.

Dans la figure 1a, on peut voir une feuille de papier éclairée dans une chambre noire, avec une lampe torche à lumière collimatée. Au-delà du spectacle ordinaire qui se présente sur cette photo, il n'est pas difficile de distinguer deux zones, d'éclats nuancés. Une zone centrale, bien visible, une sorte de tache de lumière n'occupant qu'une petite surface de la feuille. Une seconde zone tout autour, étalée sur une surface bien plus importante avec un éclat moindre. La zone centrale est due à la lumière transmise, n'ayant subi qu'une seule diffusion à travers le papier ; ce phénomène est connu sous le nom de *diffusion simple*. La zone environnante est le résultat de plusieurs événements de diffusion à l'intérieur du matériau ; phénomène appelé *diffusion multiple*.

Les diffusions simple et multiple se produisent simultanément, à des degrés différents. Plus le matériau est dense, plus la diffusion multiple est présente et moins la diffusion simple est importante, et inversement. La diffusion simple apparaît dès que les distances entre les molécules ou les particules des matériaux sont grandes. La diffusion simple est donc le siège de milieux peu denses, tels que la fumée et l'atmosphère. De quoi désapprouver les anciens Perses. Selon Rayleigh, c'est l'atmosphère qui enveloppe notre terre qui serait à l'origine du bleu du ciel. Les molécules des gaz composant l'atmosphère diffusent plus fortement les courtes longueurs d'onde

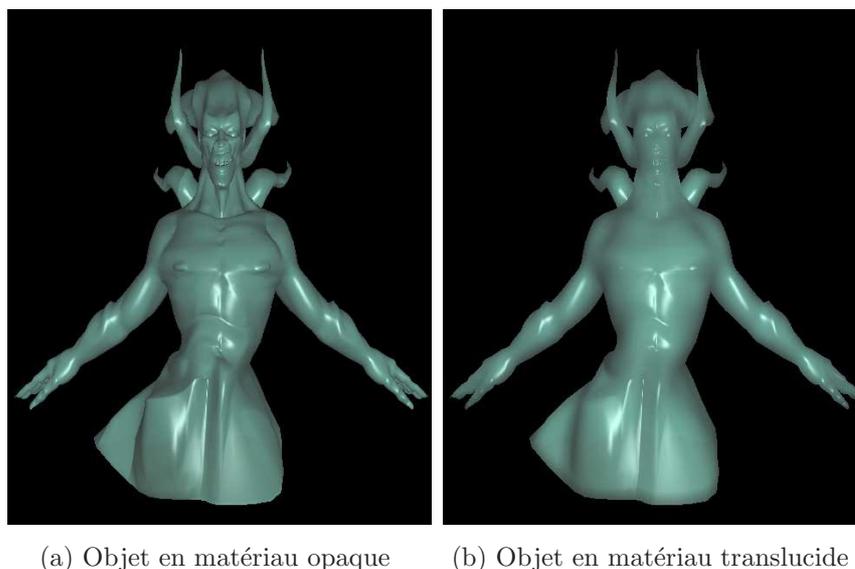


FIG. 1.1: À gauche, rendu obtenu à l'aide d'une BRDF. À droite, rendu obtenu à l'aide d'une BSSRF. (Résultats issus de notre moteur de rendu).

du rayonnement solaire qui interagit avec elles. Rayleigh stipule dans sa théorie que si la taille d'une molécule est suffisamment petite par rapport à la longueur d'onde, l'intensité de la lumière diffusée est d'autant plus grande que la longueur d'onde de la lumière est plus courte; c'est-à-dire dans les tons bleu-violet.

Pour un rendu correct de l'interaction de la lumière avec des objets translucides, la littérature a proposé deux fonctions calculant la réflectance. La fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF), où les points d'incidence et de sortie de la lumière se confondent, et la fonction de distribution de la réflectance sous-surfacique bidirectionnelle (BSSRDF) qui inclut la non-correspondance entre le point incident et celui de la réflexion. Ces deux fonctions de distribution de la réflectance ont comme but commun de définir avec précision la réflectance (le rapport entre la radiance sortante et l'irradiance entrante), certains modèles de la BRDF rendent le matériau translucide avec tous ses détails possibles et il en résulte un aspect granuleux. La BSSRDF fournit un aspect lisse et esthétiquement plus agréable, estompant les détails sur les surfaces. En définitive, la BSSRDF est une généralisation de la BRDF (voir Fig. 1.1).

Dans le reste de ce chapitre, nous allons détailler un grand nombre de méthodes et de modèles, basés sur ces deux fonctions de distribution de la réflectance.

## 1.1 Méthodes basées sur la BSSRDF

Nicodemus *et al.* [NRH<sup>+</sup>77] introduisent la fonction de distribution de la réflectance sous-surfacique bidirectionnelle (BSSRDF). Le rayon de la lumière pénètre le matériau et se propage à l'intérieur avant de le quitter à partir d'un autre point (voir Fig. 1.2). Ils ont réussi à proposer une équation pour le calcul de la diffusion sous-surfacique. Le modèle proposé est une équation différentielle de second ordre, et qui n'admet pas de solution analytique. L'approximation de l'équation de diffusion sous-surfacique nécessite l'application de méthodes de Monte-Carlo, ce qui est très coûteux en termes de temps de calcul.

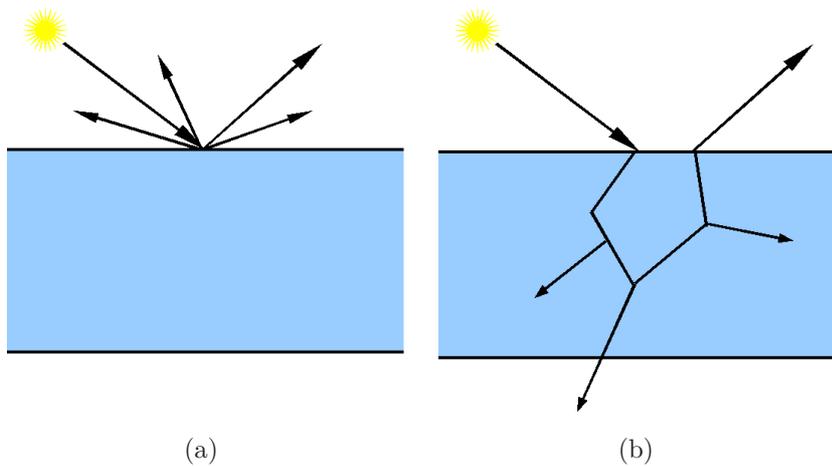


FIG. 1.2: Dispersion de la lumière : dans (a) à l'aide d'une BRDF et dans (b) à l'aide d'une BSSRDF.

Tel que nous le verrons plus loin dans ce chapitre, le rendu sous-surfacique d'un matériau translucide peut être calculé à l'aide de l'équation du rendu volumique. Ici, le matériau est considéré comme étant un milieu participant. La composante de la diffusion simple trouve une solution exacte dans l'équation du rendu volumique, alors que la composante de la diffusion multiple n'en trouve pas, et doit être approchée.

Les travaux consacrés au rendu translucide sont abondants. Les premiers ont commencé au début des années 80 et continuent jusqu'à nos jours. Ces travaux peuvent être évalués et classés selon plusieurs aspects. En effet, en raison de la diversité des méthodes et des techniques proposées, et à cause des intérêts techniques de chaque méthode, chaque travail de recherche trouve une place dans une catégorie précise. Les techniques qui existent dans la littérature sont pour la plupart non in-

teractives. Récemment, de plus en plus de travaux sont interactifs, voire temps-réel. Certaines méthodes s'intéressent au rendu de matériaux hétérogènes. La difficulté du rendu d'objets constitués de matériaux hétérogènes réside dans la variation spatiale des caractéristiques intrinsèques de ces milieux et de leur composition. Le rendu translucide trouve grandement son application dans le rendu de la peau humaine. La peau humaine est un organe constitué de plusieurs couches, toutes translucides, avec différents comportements d'interaction avec la lumière. Ceci permet de distinguer un autre aspect du rendu translucide ; le rendu translucide multicouche. Certaines techniques, dont la celle que nous présentons dans le chapitre suivant, s'intéressent au rendu d'objets translucides et déformables. Ici, le caractère interactif d'une méthode est nécessaire, mais n'en est pas suffisant. Plusieurs problèmes liés à la nature complexe de l'équation de la diffusion sous-surfacique se mettent en travers de la déformation des objets translucides en temps-réel.

### 1.1.1 Rendu sous-surfacique non temps-réel

Les précurseurs du rendu d'objets translucides avaient proposé différentes méthodes, généralement empiriques et non interactives.

#### Méthodes basées sur l'équation du rendu volumiques

Blinn [Bli78] a été l'un des premiers à modéliser la diffusion sous-surfacique de la lumière. Il a proposé un modèle pour la réflexion et la transmission de la lumière à travers des particules de nuages, dans le but de simuler les anneaux de Saturne. Son modèle souffre d'être empirique, se basant sur des lois probabilistes afin de simplifier l'équation du rendu volumique. De plus, le modèle de Blinn ne prend pas en argument les coefficients de réfraction de Fresnel, ce qui ne permet pas le rendu de matériaux consistants, avec une grande épaisseur optique. Blinn reconnaît dans son article les diverses limitations de sa méthode, telle que la gestion des diffusions multiples, mais il avance avoir apporté un pas initial au rendu translucide.

La diffusion sous-surfacique est un problème difficile de l'illumination globale, qui a pour but de résoudre la fameuse équation du rendu volumique pour des milieux participants. Lorsqu'un photon pénètre un milieu participant, il peut heurter une de ses composantes (molécules ou particules), ou le traverser sans aucune collision. Dans

le cas où un photon interagit avec le milieu, deux possibilités s'offrent à lui : le photon est absorbé ou diffusé. Ce sont les coefficients d'absorption  $\sigma_a$  et de diffusion  $\sigma_s$  qui donnent respectivement les probabilités d'absorption et de diffusion d'un photon. L'équation du rendu volumique décrit trois phénomènes (voir [Cha60]) : l'émission, la diffusion et l'absorption. Cette équation peut s'écrire de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
L(x, \vec{\omega}) = & \int_0^s e^{-\tau(x, x')} \sigma_a(x') L_e(x') dx' + \\
& \int_0^s e^{-\tau(x, x')} \sigma_s(x') \int_{\Omega_{4\pi}} p(x', \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i(x', \vec{\omega}') d\vec{\omega}' dx' + \\
& e^{-\tau(x, x+s\vec{\omega})} L(x + s\vec{\omega}, \vec{\omega})
\end{aligned} \tag{1.1}$$

Où l'épaisseur optique  $\tau(x, x')$  est donnée par :

$$\tau(x, x') = \int_x^{x'} (\sigma_s(t) + \sigma_a(t)) dt \tag{1.2}$$

Afin de calculer la radiance totale  $L(x, \omega)$  au point  $x$  vers la direction  $\omega$ , les contributions des radiances dues à l'émission, à la diffusion et à l'absorption doivent être additionnées. La première partie calcule le gain en radiance due à l'émission  $L_e$  depuis le milieu. La deuxième partie ajoute l'apport de la radiance après diffusion : ici, la radiance incidente  $L_i$ , au point  $x'$  et depuis la direction  $\omega'$  est intégrée sur toutes les directions de la sphère  $\Omega_{4\pi}$ . La fonction de phase  $p(x', \omega', \omega)$  est intrinsèquement liée au matériau et décrit la distribution de la lumière diffusée. La dernière partie de l'équation du rendu volumique estime la perte de la radiance  $L$  après absorption.

Dans le cas d'un matériau homogène, et si l'on intègre l'équation du rendu volumique tout au long du chemin  $s$  qui sépare le point incident  $x'$  et le centre de collision des photons, on peut l'écrire de la manière suivante [Cha60] :

$$(\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla}) L(x, \vec{\omega}) = -(\sigma_a + \sigma_s) L(x, \vec{\omega}) + \sigma_s \int_{\Omega_{4\pi}} p(\vec{\omega}', \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}') d\omega' + Z(x, \vec{\omega}) \tag{1.3}$$

Ici, le terme source  $Z(x, \vec{\omega})$  désigne la distribution volumique de la source lumineuse, et est donné par :

$$Z(x, \vec{\omega}) = \sigma_s \int_{\Omega_{4\pi}} p(\vec{\omega}', \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}') d\omega' \tag{1.4}$$

La BSSRDF  $S$  proposée par Nicodemus *et al.* [NRH<sup>+</sup>77] peut s'écrire comme étant le rapport entre le différentiel entre la radiance de sortie  $dL_s(x, \vec{\omega})$  au point  $x$  vers  $\omega$ , et le flux d'entrée (incident)  $\Phi_e(x', \vec{\omega}')$  au point  $x'$  depuis la direction  $\omega'$  :

$$S(x, \vec{\omega}, x', \vec{\omega}') = \frac{dL_s(x, \vec{\omega})}{d\Phi_e(x', \vec{\omega}')} \quad (1.5)$$

Durant les années 90, la diffusion sous-surfacique a été simulée par un grand nombre d'algorithmes et de méthodes prévus initialement pour le calcul de l'illumination globale, mais en présence de milieux participants. En effet, ceci revient donc à considérer les objets translucides comme des milieux participants. Blasi *et al.* [BSS93] proposent une technique pour le rendu des objets translucides peu denses, tels que le brouillard ou les nuages. Le milieu participant est modélisé par une grille de voxels distribués sur un espace discret, sans restriction de densité pour chaque voxel. Le rendu est effectué à l'aide d'un algorithme de tracé de rayons à deux passes, en employant la méthode des éléments finis. La technique de Blinn *et al.* ne prend pas en considération la diffusion multiple, ce qui limite son application aux matériaux avec une petite épaisseur optique. Dans [LLL<sup>+</sup>96], Lafortune *et al.* décrivent une méthode qui permet d'appliquer le *path-tracing* bidirectionnel à l'illumination globale, en présence de milieux participants. Leur méthode manipule des matériaux translucides peu denses, mais éventuellement hétérogènes avec la prise en compte de la diffusion multiple. Le *photon mapping* a également été utilisé pour le calcul de l'illumination globale en présence de milieux participants par Jensen *et al.* [JC98]. En réalité, ici, le *photon mapping* est combiné au *path-tracing* bidirectionnel afin d'augmenter le réalisme des rendus, et réduire les erreurs des approximations. Leur méthode leur permet d'intégrer plusieurs effets tels que, la diffusion multiple et les caustiques.

### Méthodes basées sur l'équation de diffusion

La modélisation de la diffusion sous-surfacique à l'aide de méthodes de l'illumination globale, peut produire des résultats satisfaisants. Cependant, ces méthodes nécessitent des temps de calculs très importants. Jensen *et al.* [JMLH01] basent leurs travaux sur l'observation que la diffusion sous-surfacique de la lumière est formée de deux composantes, et exposent un modèle en deux composantes : La diffusion simple et la diffusion multiple.

Lorsqu'un seul évènement de diffusion survient à l'intérieur du matériau, on parle de diffusion simple. Autrement dit, il existe un seul et unique centre de diffusion de la lumière, dans lequel, se rejoignent les rayons d'entrée (après réfraction) et de sortie (voir Fig. 1.3). La diffusion simple possède une solution exacte. Mathématiquement, la radiance de sortie  $L(x, \omega)^{(s)}$  après diffusion simple, est la solution du premier ordre de l'équation du rendu volumique (Eq. 1.1) :

$$L(x, \vec{\omega})^{(s)} = \sigma_s(x) \int_{\Omega_{4\pi}} F \cdot p(x', \vec{\omega}', \vec{\omega}) \int_0^\infty e^{-\sigma_{tc}s} L_i(x', \vec{\omega}') ds d\omega' \quad (1.6)$$

Deux intégrations imbriquées s'opèrent. La première concerne chaque particule se trouvant tout au long du chemin  $s$ , séparant le centre de diffusion et le point de sortie  $x$ . La seconde calcule la radiance incidente après accumulation et multiplication par la fonction de phase  $p(x', \omega', \omega)$ , et ce dans toutes les directions d'entrée. La fonction  $F$  est le produit de deux termes de transmission de Fresnel aux points d'entrée  $x'$  et de sortie  $x$ , avec  $\eta$  le facteur de réfraction du matériau :

$$F = F_t(\eta, \vec{\omega}) F_t(\eta, \vec{\omega}') \quad (1.7)$$

Le coefficient d'extinction combiné  $\sigma_{tc}$  mesure la perte de la radiance traversant le milieu entre  $x$  et  $x'$ , après diffusion et absorption :

$$\sigma_{tc} = \sigma_a(x) + \sigma_s(x) + \frac{|\vec{n}' \cdot \vec{\omega}|}{|\vec{n}' \cdot \vec{\omega}'|} (\sigma_a(x') + \sigma_s(x')) \quad (1.8)$$

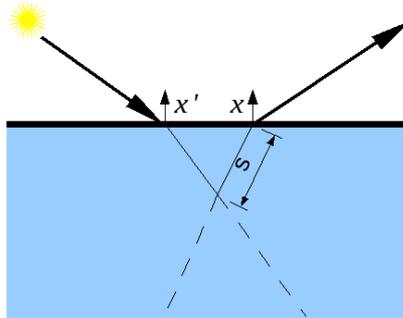


FIG. 1.3: Diffusion simple.

Le terme de la diffusion simple est rarement calculé pour le rendu translucide. Sa contribution est négligeable pour la majorité des matériaux translucides optiquement épais.

Les photons ont tendance à se disperser autour de plusieurs centres, lorsqu'ils pénètrent un milieu hautement diffus et absorbant (grande épaisseur optique). Il s'agit donc de la diffusion multiple [Sta95]. La solution de la diffusion multiple ne peut pas être exacte et doit être approchée. La formulation de l'approximation de la diffusion multiple est basée sur l'observation que la distribution de la lumière dans des matériaux optiquement denses est isotropique. Cette observation est vraie, même si la lumière incidente et la fonction de phases sont anisotropiques. Ceci implique que la radiance de sortie, causée par un nombre important de collisions, ne dépend que faiblement de la direction. Dans cette situation, la radiance  $L(x, \vec{\omega})$  peut être approchée par les deux premiers termes du développement de Taylor, selon la variable de direction  $\vec{\omega}$  :

$$L(x, \vec{\omega}) = \frac{1}{4\pi}\phi(x) + \frac{3}{4\pi}\vec{\omega} \cdot \vec{E}(x) \quad (1.9)$$

Ici,  $\phi(x)$  et  $E(x)$  décrivent respectivement, le flux radiant et le vecteur de la radiance d'entrée :

$$\begin{cases} \phi(x) = \int_{\Omega_{4\pi}} L(x, \vec{\omega}) d\omega \\ E(x) = \int_{\Omega_{4\pi}} L(x, \vec{\omega}) \cdot \vec{\omega} d\omega \end{cases} \quad (1.10)$$

Ainsi, en combinant l'équation 1.9 et l'équation du rendu volumique 1.3, on forme l'équation de diffusion :

$$\nabla^2 \phi(x) = 3\sigma_t \sigma_a \phi(x) - 3\sigma_t Z_0(x) + 3\vec{\nabla} \cdot \vec{Z}_1(x) \quad (1.11)$$

Dans l'équation ci-dessus, les fonctions  $Z_0$  et  $Z_1$  sont respectivement, les termes du 0ème et du 1er ordre du développement du source terme  $Z$ . Dans cette équation, le coefficient d'extinction,  $\sigma_t$ , est la somme des coefficients d'absorption et de diffusion :  $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$ .

L'équation de diffusion ne possède pas de solution exacte pour un milieu translucide fini, ou semi-infini, aux limites bien définies. Dans le cas d'un milieu semi-fini, résoudre cette équation doit s'effectuer sous des conditions aux bords bien appropriées. La condition retenue stipule que le flux de diffusion interne doit valoir zéro, pour chaque point  $x_s$  de la surface :

$$\int_{2\pi} L(x_s, \vec{\omega})(\vec{\omega} \cdot \vec{n}(x_s)) d\omega = 0 \quad (1.12)$$

En retenant deux termes après un développement de Taylor, la condition aux bords s'écrit désormais comme suit :

$$3\sigma_t\phi(x_s) - 2(\vec{n} \cdot \vec{\nabla})\phi(x_s) = 0 \quad (1.13)$$

La condition aux bords 1.13 est valide si la surface ne réfracte pas les rayons incidents et en sortie. Lorsque la surface interfère entre deux milieux ayant différents indices de réfraction, le phénomène de la réfraction doit donc être pris en compte. L'exemple le plus trivial est la surface d'un matériau en contact avec l'air ambiant. Si l'on assume que  $F_r$  est la fameuse formule de Fresnel, la réflectance diffuse moyenne de Fresnel après réfraction, peut être mesurée :

$$F_{dr} = \int_{2\pi} F_r(\eta, \vec{n} \cdot \vec{\omega}') (\vec{n} \cdot \vec{\omega}') d\omega' \quad (1.14)$$

Le facteur de réfraction du milieu est désigné ici par  $\eta$ . La réflectance diffuse moyenne de Fresnel peut être approchée, afin de lui attribuer une valeur analytique :

$$F_{dr} = \frac{-1.44}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \quad (1.15)$$

Il est donc désormais possible d'établir la condition aux bords résultant de l'interaction entre deux milieux caractérisés par deux facteurs de réfraction distincts :

$$3\sigma_t\phi(x_s) - 2(\vec{n} \cdot \vec{\nabla})\phi(x_s) = F_{dr}[3\sigma_t\phi(x_s) + 2(\vec{n} \cdot \vec{\nabla})\phi(x_s)] \quad (1.16)$$

La condition aux bords peut encore être écrite de cette manière :

$$3\sigma_t\phi(x_s) - 2D(\vec{n} \cdot \vec{\nabla})\phi(x_s) \quad (1.17)$$

Où :

$$A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}} \quad (1.18)$$

Au final, il est possible de déduire la BSSRDF, noté par  $S_d$ .  $S_d$  est, tel qu'il est allégué dans l'équation 1.5, égale à la radiance de sortie divisée par le flux incident :

$$S_d(r) = -3\sigma_t \frac{\vec{n} \cdot \vec{E}(x_s)}{d\Phi_i(x_e)} = -3\sigma_t \frac{(\vec{n} \cdot \vec{\nabla})\phi(x_s)}{d\Phi_i(x_e)} \quad (1.19)$$

Avec  $r = \|x_s - x_e\|$  la distance séparant le point d'incident  $x_e$  et le point de sortie  $x_s$  sur la surface.

Jensen *et al.* [JMLH01] suggèrent une solution analytique en se basant sur la méthode de Eason *et al.* [EWNT78]. Dans cette méthode, chaque rayon incident est transformé en une source dipôle. Une source dipôle dispose de deux sources de lumière placées non loin de la surface, de manière à satisfaire les conditions aux bords. Une source lumineuse, positive, réelle, positionnée à une distance  $z_r$  sous la surface, et une seconde, négative, virtuelle et fixée à une distance  $z_v$  sur la surface. Voir Fig.1.4.

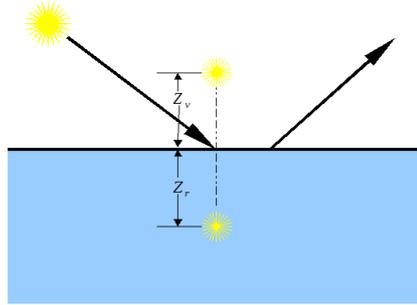


FIG. 1.4: Schéma décrivant le modèle de la source dipôle pour la résolution de l'approximation de la diffusion.

La distance  $z_r$  correspond à la distance moyenne qu'un photon traverse, à l'intérieur d'un matériau. Cette distance est plus connue sous le nom de *libre parcours moyen* et est donnée par l'inverse du coefficient d'extinction :  $\frac{1}{\sigma_t}$ . La distance entre la source virtuelle et la surface du matériau,  $z_v$ , peut être calculée selon les équations suivantes :

$$z_v = z_r + \frac{4A}{3\sigma_t} \quad (1.20)$$

Le flux radiant peut alors être calculé comme suit :

$$\phi(x_e) = \frac{3\sigma_t\Phi}{4\pi} \left( \frac{e^{-\sigma_{tr}d_r}}{d_r} - \frac{e^{-\sigma_{tr}d_v}}{d_v} \right) \quad (1.21)$$

Ici, les distances entre chaque point  $x$  et les sources lumineuses réelle et virtuelle sont données respectivement par  $d_r = \|x_e - x_r\|$  et  $d_v = \|x_e - x_v\|$ .

Une solution analytique et directe, de la réflectance diffuse, ou de la fonction du transport de la lumière, est dès lors possible. Il suffit d'injecter l'équation 1.21 dans l'équation 1.19, pour la voir apparaître sous cette forme :

$$R_d(r) = \frac{\alpha}{4\pi} \left[ z_r(\sigma_{tr}d_r + 1) \frac{e^{-\sigma_{tr}d_r}}{d_r^3} + z_v(\sigma_{tr}d_v + 1) \frac{e^{-\sigma_{tr}d_v}}{d_v^3} \right] \quad (1.22)$$

Ici,  $\alpha$  désigne l'albédo du matériau. Le coefficient  $\sigma_{tr}$  est donné par :  $\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma_t}$ . La réflectance diffuse est le cœur du modèle du dipôle, elle indique la proportion de la lumière transportée en  $x_e$  et  $x_s$ . Afin d'obtenir le terme final de diffusion multiple de la BSSRDF, il faut prendre en considération les réflectances de Fresnel aux bords de la lumière incidente et de la radiance de sortie :

$$S_d(x_e, \vec{\omega}_e; x_s, \vec{\omega}_s) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_e) R_d(r) F_t(\eta, \vec{\omega}_s) \quad (1.23)$$

Nous avons sciemment abordé la méthode de Jensen *et al.* [JMLH01] en profondeur. Cette considération particulière qu'on lui a prêtée est motivée par sa pertinence et son originalité. Cette originalité apparaît dans la proposition d'une solution analytique à la diffusion multiple. Ceci revient à traiter le problème des dispersions multiples à l'échelle macroscopique, sur la surface, se dispensant ainsi de toute estimation de la diffusion issue de chaque rebond interne des photons. Cette dispense permet de diviser les temps de calculs par un facteur de 250, par rapport aux méthodes s'inspirant de la théorie des milieux participants. La pertinence de cette méthode se manifeste par l'étendue de son application et des modifications ultérieures qu'elle a pu subir. Sur la figure 1.5, on peut apprécier une comparaison issue de l'article de Jensen et de ses collègues, entre les rendus obtenus de la peau humaine avec une BRDF classique, et leur modèle de BSSRDF. Leur technique présente bien des limitations, victime de ses suppositions et simplifications. L'introduction de la méthode de la source dipôle suppose que le point incident et sortant se trouvent sur le même plan, et échoue donc à rendre toute surface ou objet présentant une forte courbure, entraînant des problèmes de visibilité. De plus, le modèle est dépourvu de toute gestion possible de milieux hétérogènes ou matières en multicouches.

L'approximation de la BSSRDF de Jensen *et al.* de 2001, est basée sur un échantillonnage uniforme de la surface, ainsi, plus un matériau est diffus, plus l'échantillonnage est massif, ce qui augmente le coût en temps de calculs. Le calcul du rendu translucide peut être décomposée en séparant le calcul des irradiances sur la surface, de l'évaluation de la diffusion à l'intérieur des matériaux, en utilisant des techniques d'échantillonnage plus adaptées. Cette séparation a permis à Jensen et Bühler dans [JB02] de réduire considérablement les temps de calculs par rapport au travail de Jensen *et al.* [JMLH01]. Le découplage en ces deux étapes peut être défini formellement à l'aide des équations suivantes :



(a) Rendu obtenu à l'aide d'une BRDF. (b) Rendu obtenu à l'aide d'une BSSRDF.

FIG. 1.5: Rendu de peau humaine. Images issues de [JMLH01].

$$L_s(x_s, \vec{\omega}_s) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_s) B(x_s) \quad (1.24)$$

$$B(x_s) = \int_S E(x_e) R_d(r) d(x_e) \quad (1.25)$$

Ici,  $B(x_s)$  est la radiosité au point  $x_s$  due à l'approximation dipôle.

$$E(x_e) = \int_{\Omega} L_e(x_e, \vec{\omega}_e) F_t(\eta, \vec{\omega}_e) |\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_e| d\omega_e \quad (1.26)$$

Dans l'équation 1.26,  $E(x_e)$  est la fonction d'irradiance, qui accumule la lumière incidente au point  $x_e$  multipliée par la transmittance de Fresnel. Le rendu est effectué en deux passes : dans une première passe (Eq. 1.26), l'irradiance est calculée à partir de quelques points sélectionnés sur la surface. Ces points sont définis selon l'algorithme de Turk [Tur92] permettant une efficace distribution des points sur un maillage. Les points une fois connectés, deviennent des sommets, et recréent un nouveau pavage du maillage afin d'augmenter ou de diminuer sa résolution, et ce, en un temps de calcul réduit. Jensen et Böhler exploitent cette méthode, sans faire de re-pavage. Le choix des positions des points, ainsi que leur nombre, est conditionné par des facteurs géométriques, la variation de la lumière, les propriétés optiques du matériau et la technique d'intégration. Pour chaque point, on garde sa position, l'aire qui lui est associée et bien sûr son irradiance. Dans la deuxième passe (Eq. 1.25), au lieu de collecter toutes les irradiances en chaque point, les auteurs choisissent une technique hiérarchique, à l'aide d'une *otree*, afin d'évaluer la réflectance qui tient

compte de la contribution de tous les échantillons en regroupant les plus distants, rendant l'estimation plus rapide. La diffusion multiple en chaque point est calculée en traversant l'arbre depuis sa racine jusqu'à ses feuilles. Leur méthode fournit des gains de temps considérables sans pour autant permettre l'interaction. Dans leur article, les auteurs font état de 7 secondes par image, pour le rendu d'un maillage de 150k sommets, avec une méthode de tracé de rayon.

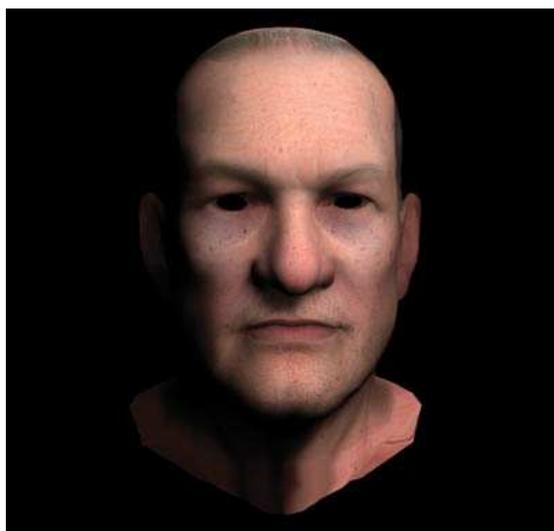
L'approximation à l'aide du dipôle est proscrite, lorsque les points d'entrée et de sortie des rayons lumineux ne se trouvent pas sur le même plan, ou pour des matériaux semi-transparents, de faible épaisseur optique. Dans un même objet, l'épaisseur optique peut sensiblement varier, incitant une fluctuation notable dans l'apparence de l'objet entre translucide et semi-transparente, à des endroits différents. Li *et al.* dans [LPT05] proposent une technique pour le rendu d'objet avec une large gamme de matériaux qui manifestent un transport sous-surfacique de la lumière : matériaux translucides et matériaux semi-transparents. Leur technique, présentée comme hybride, concilie techniques de Monte-Carlo et approximation dipôle. Un algorithme de *path-tracing* est utilisé afin de capturer de manière correcte, la diffusion provoquée par les quelques premières dispersions, dès que les photons rencontrent des zones optiquement fines. Lorsque la lumière entre en interaction avec des zones optiquement épaisses, pénétrant de manière plus profonde à l'intérieur de l'objet, l'approximation dipôle peut alors être appliquée. Cette méthode tire profit des avantages des méthodes de Monte-Carlo et de l'approximation de la diffusion à l'aide du dipôle, en les appliquant sélectivement, selon la géométrie des objets. Ceci permet principalement, de réduire l'apparition d'artéfacts liée à l'emploi de l'approximation dipôle pour le rendu de matériaux semi-transparents. La méthode hybride présentée par Li *et al.* demande des temps de calculs considérables, bien plus importants que les méthodes utilisant uniquement l'approximation de la diffusion à l'aide du dipôle.

### 1.1.2 Rendu sous-surfacique temps-réel

Actuellement, les concepteurs de jeux vidéos s'affairent à introduire des effets de translucidité, aux matériaux des objets en action. Les personnages que nous manipulons tels des pantins, avec nos manettes de jeux, sont très souvent des entités humaines ou mi-humaines mi-animales. Peu importe leurs identités, la peau est l'élément qui les constitue, au grand désespoir des concepteurs. Désespoir ou presque ;

le rendu de la peau ne peut paraître réaliste, si la diffusion sous-surfacique n'est pas gérée. Il fallait donc implémenter des moteurs de rendu temps-réel adaptés à la gestion des matériaux translucides. Récemment, les développeurs d'*Epic Games* ajoutent des effets de translucidité à leur jeu *Gears of War*.

Les moteurs de rendu translucide doivent leur apparition, aux hautes performances de calculs, proposées par les constructeurs de cartes graphiques. L'architecture massivement parallélisée des processeurs des cartes graphiques modernes, a permis de porter de plus en plus de calculs sur ces monstres graphiques. Les deux géants de la construction de cartes graphiques, *Nvidia* et *ATI* se font concurrence, même pour la proposition de moteurs de rendu de la peau (voir Fig. 1.6). En 2004, des chercheurs de la firme *Nvidia* expliquent [Gre04], comment implémenter un modèle empirique de rendu translucide sur GPU. Toujours en 2004, Sander *et al.* [SGM04] de la firme canadienne *ATI*, proposent un moteur de rendu de la peau, empirique à son tour, et dont l'efficacité a servi à produire quelques images du film *Matrix Reloaded*. De par les performances importantes des cartes graphiques modernes, il est possible de les exploiter pour des calculs à vocation non graphique, au moyen de textures considérées comme des matrices de données. Le concept d'applications GPGPU (*General-Purpose Computation Using Graphics Hardware*) voit alors le jour.



(a) Rendu de peau par *Nvidia*.



(b) Rendu de peau par *ATI*.

FIG. 1.6: Résultats obtenus par des moteurs de rendu de la peau, proposés par *Nvidia* et *ATI*.

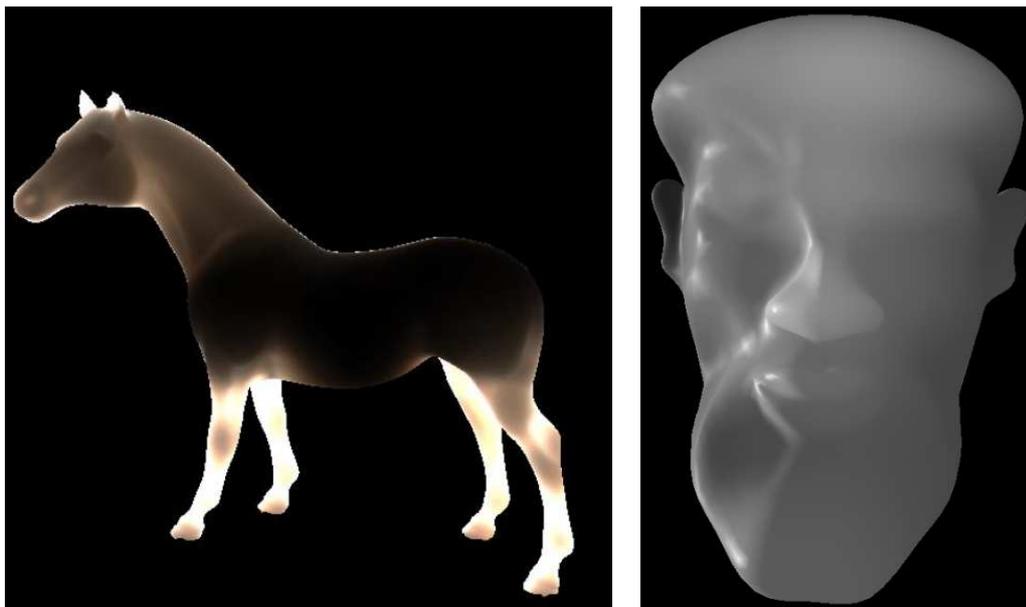
Lorsqu'un moteur de rendu permet à son utilisateur de modifier l'illumination et les points de vue selon son gré, le moteur est qualifié d'interactif. De nombreuses méthodes [CON99, KM99, KS00] proposent pour le rendu temps-réel d'objets, avec des BRDFs. Ces méthodes, aidées par le caractère local de la BRDF, offrent des temps interactifs. L'influence non locale de la lumière incidente représente un obstacle de taille, à l'obtention d'un rendu translucide interactif.

La communauté graphique n'a de cesse d'exposer des modèles interactifs de rendu translucide, depuis 2002. Kniss *et al.* décrivent dans [KPHE02] un modèle interactif qui simule ou du moins, qui imite la dispersion sous-surfacique. Le modèle proposé est empirique et n'inclut que peu de considérations physiques. Il est basé sur l'observation de l'apparence des matériaux volumiques, due à l'atténuation de la lumière une fois en contact avec le matériau. La diffusion est modélisée en appliquant du flou, à l'aide de fonctions gaussiennes. Bien que leur technique reproduit plusieurs effets de translucidité, elle reste très empirique, ne laissant nullement la possibilité, d'appréhender les rendus résultants.

### Méthodes basées sur les atlas de textures

Toujours en 2002, Lensch *et al.* décrivent dans [LGB<sup>+</sup>02] le premier modèle interactif de rendu translucide, utilisant le modèle de la diffusion du dipôle. Leur travail est basé sur le modèle de Jensen *et al.* [JMLH01], toutefois en factorisant la diffusion multiple en deux composantes : une composante locale qui rassemble les contributions de la diffusion, dans le voisinage proche de chaque point, et une composante globale qui ajoute les contributions des points se trouvant à des distances importantes. Pour chacune de ces deux composantes, l'équation 1.26 est discrétisée en projetant l'irradiance  $E(x_e)$  sur deux bases orthogonales distinctes ; une base de fonctions définies par morceaux pour la réponse locale, et une base de fonctions *hat* pour la réponse globale. Par la suite, la radiosité en chaque fragment  $B(x_s)$  (voir Eq. 1.25), est restituée après une simple somme des produits vecteurs/matrices entre les coefficients obtenus, une fois l'irradiance projetée, et la réflectance diffuse. Il ne reste alors qu'à convertir la radiosité calculée en la radiance de sortie  $L_s(x_s, \vec{\omega}_s)$ . Dans une phase de précalculs, un atlas de textures décrivant la surface de l'objet est généré. À l'aide de cet atlas, les réflectances diffuses  $R_d(r)$  sont extraites pour chaque texel. Les auteurs proposent de calculer la réflectance diffuse pour la réponse locale en

utilisant un filtrage bidimensionnel sur l’atlas. Pour la réponse globale, seules les contributions des trois sommets du triangle contenant chaque texel sont retenues afin de calculer  $R_d(r)$ . Dans la phase de rendu, Lensch et ses collègues exploitent les performances des cartes graphiques, en portant l’accumulation des irradiances en chaque texel de l’atlas de texture sur GPU.



(a) Résultat extrait de [LGB<sup>+</sup>02].

(b) Résultat extrait de [CHH03].

FIG. 1.7: Résultats obtenus par des méthodes utilisant des atlas de textures.

Les travaux de Lensch *et al.* sont complétés, un an plus tard, en introduisant un atlas de textures hiérarchique pour le calcul de l’accumulation de la radiosité dans [CHH03](voir Fig. 1.7). La hiérarchisation de l’atlas de textures a permis de porter plus de calculs sur GPU. En effet, Carr *et al.* montrent une solution efficace, pour la parallélisation du calcul de la radiosité en chaque point de sortie. Le portage du calcul de la radiosité sur GPU, donne la possibilité d’effectuer le rendu directement par les cartes graphiques (rastérisation). L’utilisation des atlas de textures bien qu’elle ait permis d’atteindre des temps de rendu interactifs, est très contraignante. Outre la difficulté de la création de ces textures due à la projection d’un objet volumique, sur un plan, les atlas de textures imposent le précalcul de la réflectance diffuse. Il serait plus intéressant de paralléliser l’estimation de la réflectance diffuse, étant le noyau et la composante la plus importante et la plus coûteuse pour tout rendu sous-surfacique.

## Méthodes basées sur les cartes d'ombres

Les cartes d'ombres ou les *shadow maps* (voir [Lan78]), peuvent être détournées de leur vocation, et utilisées pour le calcul du rendu translucide. Dachsbacher et Stamminger [DS03] introduisent une extension de ces cartes, qu'ils appellent abusivement : *Translucent Shadow Maps (TSM)*. Les cartes d'ombres classiques sont rendues depuis la source de lumière, et conservent la profondeur des objets les plus proches dans chaque texel. Les TSMs se voient attribuer une tâche supplémentaire, celle de stocker les irradiances et les normales. L'évaluation de la diffusion sous-surfacique est divisée en deux parties, telle que dans [LGB<sup>+</sup>02] : une composante locale et une autre globale (voir Fig. 1.8). La diffusion locale est estimée dans le voisinage proche du point de sortie, sur la TSM. L'estimation (accumulation des irradiances) se fait au moyen d'un filtrage hiérarchique basé sur le *MIP mapping* sur la TSM. La diffusion globale est déterminée, puis stockée dans la TSM, après application de l'approximation de la diffusion dipôle, entre chaque point d'entrée et de sortie, des rayons lumineux. Le filtrage par le biais du *MIP mapping* est aisément parallélisable, ce qui lui a valu une implémentation sur GPU, au profit des temps de calculs. L'avantage principal de l'utilisation des TSMs s'inscrit dans la possibilité d'accumuler les irradiances, *à la volée*, au moment du rendu. De plus, et en raison de la définition même des cartes d'ombres, les calculs ne se concentrent que sur la partie visible de l'objet, accélérant ainsi, l'estimation de la composante locale de la BSSRDF.

Dans un milieu translucide dense, la diffusion tend à chuter très rapidement, de manière exponentielle. Cette observation suppose que la contribution de la composante globale, est négligeable devant celle de la composante locale. Quelques travaux proposent des approches basées sur cette observation, où seule la composante de la diffusion locale est prise en compte.

## Méthodes exploitant des bases de projection

Dans [HV04] les auteurs adoptent le modèle de source dipôle, où les irradiances sont précalculées, après projection de l'illumination sur des bases d'harmoniques sphériques pour chaque sommet du maillage. La diffusion sous-surfacique est alors calculée, en effectuant une accumulation des irradiances des sommets constituant le

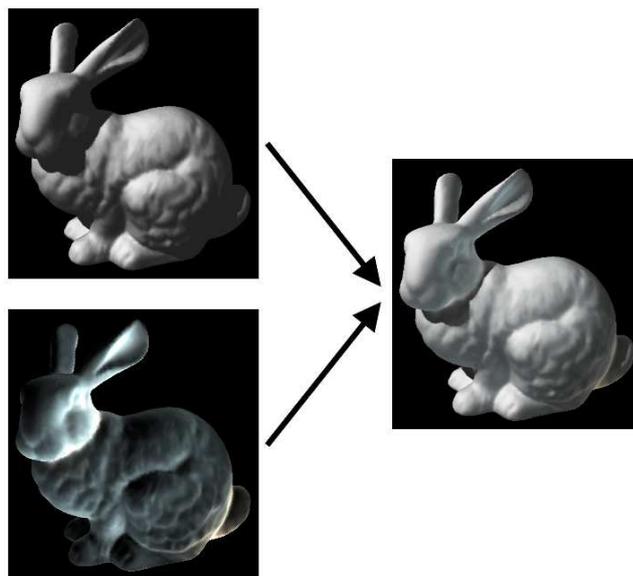
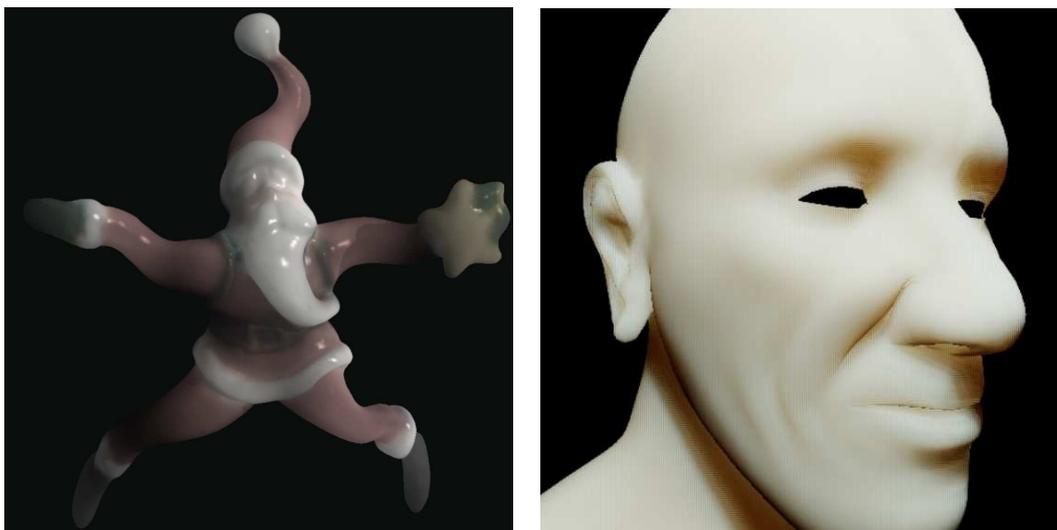


FIG. 1.8: Les deux parties de l'évaluation de la BSSRDF selon [DS03]. Composante locale, en haut. Composante globale, en bas.

voisinage, après interpolation. La projection de l'illumination sur des bases d'harmoniques sphériques ne permet pas d'estimer convenablement une illumination contenant des hautes fréquences. Hao *et al.* compensent les erreurs de compression, en additionnant la différence entre les valeurs effectives obtenues à partir de points de référence, et les valeurs obtenues après compression. La compression de l'illumination, à l'aide des bases d'harmoniques sphériques réduit considérablement la taille des données à stocker, et par conséquent, le volume de données à exploiter. C'est cette réduction qui permet d'atteindre des temps de rendu interactifs. En revanche, cette méthode ne considère que les sommets des maillages, ce qui peut entraîner l'apparition d'artéfacts et de discontinuités d'ombrage. Ces artéfacts sont à l'image de l'effet indésirable des bandes de Mach, causées par l'ombrage de Gouraud.

En 2003, Mertens et Kautz dans [MKB<sup>+</sup>03a] s'intéressent au rendu de la peau. Ils choisissent pour le calcul de la BSSRDF, d'intégrer sur l'espace image au lieu d'intégrer de manière hiérarchique sur la surface de l'objet, comme dans les travaux de Jensen *et al.* [JB02]. Une intégration est effectuée sur le plan tangent à la surface en chaque pixel. L'intégration ne se fait que sur quelques points du plan tangent, appelés *échantillons importants*. Ces points sont choisis avec un algorithme simple,



(a) Résultat extrait de [HV04].

(b) Résultat extrait de [MKB<sup>+</sup>03a].

FIG. 1.9: À gauche, rendu d'un Père Noël translucide. À droite, rendu de peau.

basé sur le seuillage. Par la suite, ces échantillons importants sont projetés sur la surface de l'objet, où s'opère le calcul des irradiances. Dans une dernière étape, les irradiances sont accumulées, et le rendu final est effectué. En implémentant leur algorithme sur GPU, des taux interactifs sont facilement atteints. Les méthodes qui se focalisent sur l'unique dispersion locale de la lumière, à l'intérieur des matériaux translucides, profitent de cette supposition, pour accélérer leurs calculs. Il n'en demeure pas moins que négliger la contribution de la réponse globale, altère la qualité des rendus translucides (voir la Fig. 1.9).

Sloan *et al.* [SHHS03] adaptent leur modèle de rendu d'objets diffus présenté dans [SKS02], aux objets translucides. En effet, dans [SKS02], Sloan *et al.* introduisent un modèle temps-réel basé sur le précalcul du transfert radiatif sur la surface d'objet opaque. Pour chaque sommet du maillage, la radiance de sortie est estimée après compression du calcul de l'irradiance, suite à une projection sur des bases d'harmoniques sphériques, et calcul du transfert radiatif. Ce modèle est capable de rendre plusieurs effets tels que les ombres douces, les interrélaxions et les caustiques, sous une illumination basse fréquence. Un an plus tard, Sloan *et al.* [SHHS03], incluent la composante de la diffusion sous-surfacique multiple, dans leur modèle du précalcul du transfert radiatif. La composante de la diffusion sous-surfacique simple est approchée par le biais d'une BRDF, ce qui reste empirique. Les rendus obte-

mus représentent des objets translucides illuminés avec des cartes d'environnement, représentant une illumination basse fréquence (voir Fig. 1.10).



FIG. 1.10: Rendu translucide du Buddha illuminé par deux cartes d'environnement différentes. Images extraites de [SHHS03].

L'approximation de l'illumination par projection sur des bases d'harmoniques sphériques a longtemps été appliquée. Les bases d'harmoniques sphériques souffrent de leur caractère non localisé et linéaire. Ces bases ne dépendent que des coordonnées sphériques, et ne peuvent donc pas compresser une fonction sphérique peu uniforme. En d'autres termes, plus la fréquence du signal sphérique augmente, plus les erreurs de compression en harmoniques sphériques croissent. Afin de compresser une illumination d'une fréquence arbitraire, il est nécessaire de projeter le signal sur une base non linéaire et localisée. Le choix de la communauté scientifique s'est rapidement porté sur les bases d'ondelettes. Contrairement aux harmoniques sphériques, les ondelettes sont des fonctions translatoires, et possèdent une composante spatiale, en plus de leur dépendance angulaire. Les ondelettes sont par nature capables de compresser des cartes d'illumination haute fréquence, et ont été employées dans de nombreux travaux consacrés au rendu d'objets non translucides [NRH03, WTL04, LSSS04].

D'autres travaux encore se sont intéressés au rendu translucide d'objets illuminés à l'aide d'une carte d'environnement, de fréquence arbitraire. Dans [WTL05], Wang

*et al.* proposent la première méthode interactive, capable de précalculer le transport interne de la lumière au sein d'objets translucides, sous une illumination multifréquentielle, en utilisant des cartes d'environnements. Ils considèrent les deux composantes de la BSSRDF, à savoir les diffusions multiple et simple. La diffusion multiple est estimée selon la technique hiérarchique à deux passes, présentée par Jensen *et al.* [JB02]. Dans une première passe, les irradiances sont calculées puis comprimées de manière non-linéaire, en utilisant une base d'ondelettes. Dans la deuxième passe, les coefficients d'ondelettes issus de la première passe sont multipliés par la réflectance diffuse, et ce, sur un *kd tree* afin d'obtenir la radiance de sortie en chaque point. L'évaluation de la diffusion simple est assurée par une approximation de la formule calculant la diffusion simple proposée dans [JMLH01] : Une modification est apportée au chemin d'intégration (Eq. 1.6), qui devient désormais, la direction négative par rapport à la normale en un sommet du maillage. Ainsi, le chemin d'intégration ne dépend plus de la position de l'observateur. Cette modification enregistre des gains importants dans les temps de précalcul. La Fig. 1.11 montre deux objets translucides rendus avec la méthode de Wang *et al.*. Les cartes d'illumination utilisées sont assez complexes pour laisser apparaître des ombres douces sur le sol.

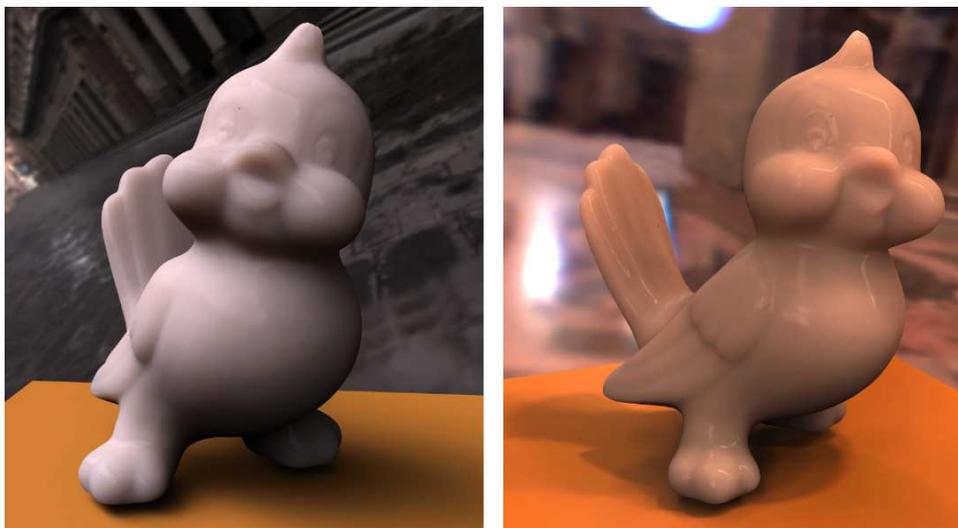


FIG. 1.11: Résultats extraits de [WTL05].

En 2008, Wang *et al.* dans [WCPW<sup>+</sup>08] reprennent les mêmes algorithmes qu'ils ont proposés dans [WTL05] avec quelques modifications notables. Ces modifications permettent la paramétrisation en temps-réel des propriétés optiques des matériaux

(voir Fig. 1.12). Le changement en temps-réel des coefficients d'absorption et de diffusion des matériaux n'était pas possible, de par la nécessité du précalcul de la réflectance diffuse pour la projection sur des bases d'harmoniques sphériques ou d'ondelettes. Les auteurs de [WCPW<sup>+</sup>08] séparent la réflectance diffuse  $R_r$  (voir Eq. 1.22) en deux parties : une partie géométrique et une autre matérielle. La partie géométrique englobe  $d_r$  et  $d_v$  qui représentent respectivement les distances entre chaque point et les sources réelle et virtuelle. La partie matérielle rassemble les paramètres optiques du matériau. La partie géométrique est projetée sur des bases ondelettes comme dans leurs travaux précédents, tandis que la partie matérielle est traitée à l'aide d'une analyse en composantes principales. L'application d'une ACP permet de dégager un ensemble compact d'un nombre réduit de fonctions, constituant une base de projection. La taille réduite de cette base permet de porter la projection de la partie matérielle sur carte graphique, et de changer *à la volée*, les paramètres optiques des objets. Le modèle de rendu translucide présenté dans [WCPW<sup>+</sup>08] n'est pas le seul à permettre la paramétrisation des coefficients d'absorption et de diffusion. Xu *et al.* [XGL<sup>+</sup>07] publient un modèle autorisant la paramétrisation en temps-réel des coefficients relatifs aux matériaux translucides (voir Fig. 1.12). Le modèle proposé ressemble dans sa construction au modèle de Wang *et al.* [WCPW<sup>+</sup>08], avec cependant quelques différences. En effet, ici, la réflectance diffuse ainsi que les irradiances sont projetées sur une base des fonctions définies par morceaux par des polynômes. Un petit nombre de coefficients résultant de la projection est nécessaire pour reconstituer la réflectance diffuse et l'irradiance, avec très peu d'erreurs. La reconstitution est effectuée sur GPU, afin d'accélérer les temps de rendu.

### 1.1.3 Rendu sous-surfacique multicouches

La peau humaine est certainement le matériau translucide le plus traité, dans la littérature consacrée au rendu translucide. La dermatologie est cette branche médicale, qui s'occupe entre autres de la peau, et qui enseigne bien des choses sur cet organe. Macroscopiquement, la peau humaine peut paraître un matériau homogène constitué d'une fine couche recouvrant nos muscles et notre corps, mais il n'en est rien. Notre enveloppe charnelle se compose de plusieurs couches, dont les trois principales sont : l'épiderme, le derme et l'hypoderme. Physiquement, le comportement sous-surfacique de la lumière diffère d'une couche à l'autre. Chacune se distingue



(a) Résultats tirés de [WCPW+08]. (b) Résultats tirés de [XGL+07]. De la gauche vers la droite, les rendus sont obtenus en augmentant le coefficient de diffusion. Les rendus sont obtenus avec diverses propriétés optiques.

FIG. 1.12: Images extraites de modèles de rendu translucide paramétrables.

par ses propres propriétés optiques et physiques. Il est donc évident que pour un rendu correct de la peau, les modèles proposés doivent être à même de prendre en considération l'aspect multicouches. Cependant, la peau n'est sûrement pas le seul matériau translucide qui nous entoure. Bien d'autres objets ou matériaux disposent d'une structure en multicouches, telles que les feuilles des arbres, les fruits, les nuages, la porcelaine émaillée, etc. Deux grandes familles de méthodes existent dans la littérature, traitant du rendu translucide : les méthodes numériques et les méthodes analytiques.

### Modèles numériques

Les méthodes analytiques tentent de modéliser le transport interne de la lumière, traversant un certain nombre de couches translucides. Le recours aux méthodes de Monte-Carlo est indispensable afin d'estimer ce transport, aux dépens des temps de calculs qui peuvent être très importants, et l'apparition d'artéfacts suite à un échantillonnage peu adéquat. Hanrahan *et al.* [HK93] adaptent un modèle longtemps utilisé et basé sur la théorie du transport linéaire unidimensionnel (par opposition au rendu volumique), au rendu de peau et de feuilles botaniques. Une méthode de

Monte-Carlo est appliquée afin de résoudre la diffusion sous-surfacique. Pour cela, chaque photon traversant le matériau est caractérisé par sa position, sa direction et son poids. Lorsqu'il rencontre les molécules du milieu, ses caractéristiques sont assujetties à des fonctions de probabilités précises, selon la couche traversée. Ces fonctions altèrent le poids et la direction du photon, où ces dernières sont mises à jour, tandis que la direction est changée suivant la fonction de phase de la couche. Après l'émergence du photon, son nouveau poids servira à l'estimation de la BRDF. La fonction de probabilité de chaque couche dépend de ses paramètres optiques, sauf que, ces paramètres sont indépendants de la longueur d'onde de la lumière, ce qui n'est pas physiquement correct. De plus, les frontières entre les couches sont supposées planes, au détriment de la réalité biologique de la peau et des feuilles. L'utilisation de la BRDF n'est évidemment pas d'une grande efficacité, mais son utilisation est moins coûteuse en temps de calculs, que la BSSRDF. Les diverses limitations du modèle de Hanrahan *et al.* ne l'ont pas empêché d'être réutilisé dans des travaux ultérieurs, avec toutefois certaines modifications. Dans [NL01], Ng *et al.* présentent un modèle similaire à celui de Hanrahan *et al.*, mais en ajoutant une couche supplémentaire au rendu de la peau, le Sébum. C'est la partie qui se trouve juste sous la peau, et qui contient les glandes sébacées responsables de la sécrétion de la sueur. Le Sebum donne à la peau, une apparence brillante et spéculaire. De plus, le modèle est plus valide physiquement, puisque les propriétés optiques dépendent de la longueur d'onde de la lumière. En 2003, une autre extension du modèle dans [HK93] a été présentée. Meglinsky et Matcher [MM03] se sont investis à introduire toutes les couches de la peau dans leur modèle, de la couche cornée à la couche du réseau de veines. Ils utilisent une simulation de Monte-Carlo pour modéliser la propagation de la radiation au sein du matériau.

François *et al.* dans [FPBB06] présentent un modèle multicouche pour le rendu translucide. Les auteurs avancent que le modèle est capable de gérer des matériaux translucides, constitués de couches d'épaisseurs variables. La méthode est organisée en deux étapes. Dans la première étape, les différentes couches des objets sont modélisées à l'aide d'une *carte translucide*. Il s'agit d'une texture qui décrit les épaisseurs de plusieurs couches, en chaque texel. Dans une seconde étape, cette texture sert à localiser les centres de diffusion simple de la lumière, à l'intérieur du matériau. La localisation de ces centres est utile pour l'estimation de l'intensité réduite, due à

l'atténuation de la lumière subie par les différentes collisions, à l'intérieur des matériaux. La méthode de François *et al.* profite de la simplicité de la localisation des centres de diffusion, ainsi que de l'exactitude du calcul de la diffusion simple, pour porter le rendu sur GPU. La méthode dans [FPBB06] est interactive, mais ignore la diffusion multiple, ce qui aurait certainement augmenté le réalisme des résultats.

### Modèles analytiques

Les méthodes numériques pour le rendu sous-surfacique multicouches sont très gourmandes en temps de calculs. Elles ont souvent été abandonnées au profit des méthodes analytiques. Ces dernières, sont basées sur des suppositions et des simplifications, qui ne les ont pas empêchés de produire des rendus acceptables. Claridge et Precec [CP03] décrivent un modèle pour le rendu de la peau à deux couches : le derme et l'épiderme. La couleur du derme est définie grâce à la quantité de sang qu'elle contient. Dans cette couche, le transport interne de la lumière est calculé selon la théorie de *Kubelka et Munk* (voir [KM31]). La couleur de l'épiderme est déterminée par la quantité de mélanine contenue. Les auteurs observent que la diffusion au sein de cette couche est négligeable, et retiennent un simple modèle de Beer pour la modéliser. Les résultats obtenus sont destinés à la communauté médicale, afin d'aider les cliniciens à détecter les mélanomes.

L'approximation dipôle proposée dans [JMLH01] n'est conçue que pour l'estimation du transport de la lumière, à l'intérieur d'un milieu semi-infini. Cette restriction suppose que la lumière pénétrant un matériau translucide ne peut qu'être absorbée ou re-diffusée au-delà de la surface. Lorsque la lumière interagit avec une couche translucide et fine, elle peut être transmise à travers l'objet, ce qui réduit la quantité de lumière diffusée. L'application de l'approximation dipôle risque donc de surestimer la réflectance des milieux finis, et échoue à prédire la transmittance. Donner et Jensen étendent l'approche de la diffusion à l'aide du dipôle, pour le rendu multicouche, dans un article paru en 2005 [DJ05]. Les auteurs reformulent le même modèle proposé dans [JMLH01], en réécrivant les conditions aux bords (voir Eq. 1.16) à chaque frontière séparant deux couches voisines. Le nouveau modèle se nomme : diffusion multipôle (voir Fig. 1.13). La méthode consiste donc à placer un dipôle aux surfaces délimitant deux couches, afin de calculer les indices de réfraction et de transmission de chaque couche, et ce, en utilisant la transformée de Fourier. Cette technique a

été appliquée pour le rendu de feuille, peau et parchemin. Elle peut gérer plusieurs couches, de différents paramètres optiques, en des temps de calculs raisonnables. Un an plus tard, les mêmes auteurs avaient présenté un travail [DJ06] consacré au rendu de la peau. Ils adaptent le modèle de diffusion multipôle, au rendu de deux couches superposées de la peau humaine. Le modèle exploite plusieurs données biologiques relatives à la peau, ce qui leur a permis d'obtenir un rendu de la peau, d'un réalisme saisissant (voir Fig. 1.14). Le modèle est facilement paramétrable, où l'utilisateur peut faire varier à gré, la couleur, le type et le taux d'hydratation de la peau. D'Eon *et al.* [dLE07] présentent un algorithme de rendu de peau humaine basé sur des multiplications et des additions de polynômes gaussiens. La convolution des irradiances ne se fait désormais plus dans l'espace de texture en employant un filtrage spatial, mais est remplacée par une somme de gaussiennes, générant plusieurs textures de convolution. Le résultat final de la convolution des irradiances est approché en additionnant ces textures. L'approximation qui utilise des fonctions gaussiennes produit un rendu temps-réel de la peau humaine, mais leur technique souffre de quelques limitations : l'approximation proposée est empirique, et n'a pas été formellement validée. Le calcul de la diffusion globale se fait au moyen de *shadow maps* afin de capturer les irradiances des zones occultées, mais reste imprécis pour des géométries hautement concaves. De plus, la méthode est inutilisable sous une illumination par le biais d'une carte d'environnement.

#### 1.1.4 Rendu sous-surfacique de matériaux hétérogènes

Un nombre important d'objets translucides sont constitués de matériaux hétérogènes, à l'instar du marbre ou des feuilles d'arbres. Sur un même objet hétérogène, la lumière peut interagir différemment, d'un endroit à un autre. Ceci ajoute une complexité supplémentaire au calcul de la BSSRDF. Physiquement, cela revient à expliquer l'hétérogénéité, par une variation spatiale des paramètres optiques du matériau. La variation spatiale des propriétés optiques est bannie des suppositions du modèle de dipôle proposé dans [JMLH01]. Si l'on observe la formule de la réflectance diffuse due à l'approximation à l'aide du dipôle (voir Eq. 1.22), on peut remarquer qu'elle n'est fonction que de la distance entre le point incident et le point de sortie de la lumière. Elle ne peut donc pas prendre en compte les variations du coefficient  $\sigma_{tr}$ , le long de cette distance. Il devient alors nécessaire d'abandonner ce modèle,

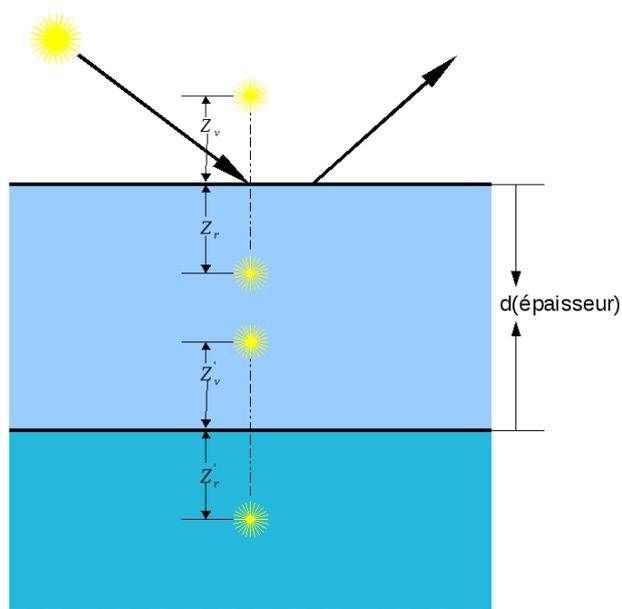


FIG. 1.13: Adaptation de l'approximation du dipôle, dans le cas d'un matériau en couches d'épaisseur finie.

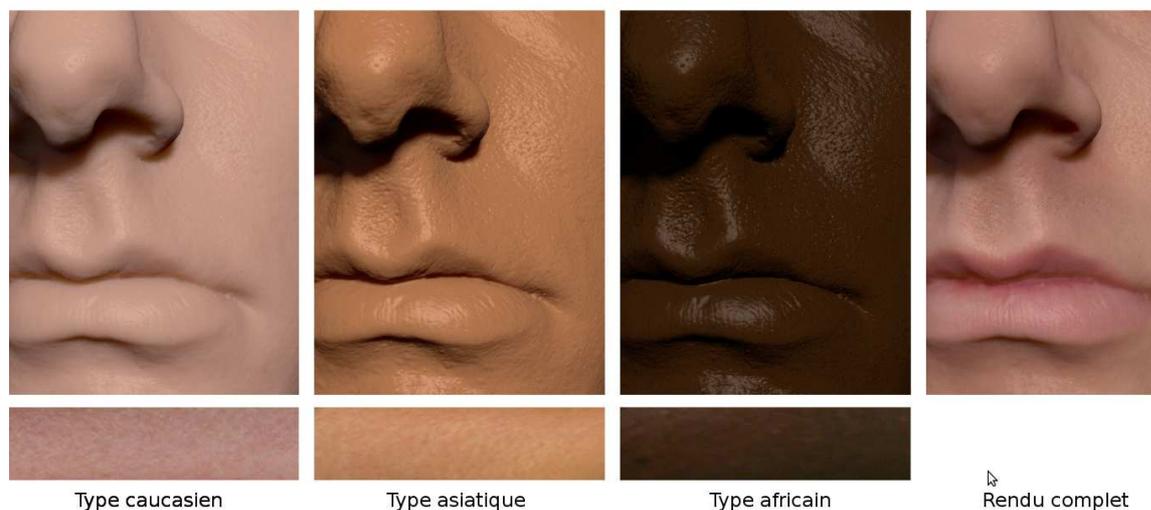


FIG. 1.14: Les trois premières images, et de gauche à droite, présentent des rendus de différents types de peau. L'image de droite, montre un rendu complet de peau de type caucasien. Images extraites de [DJ06].

pour le rendu d'objets translucides et hétérogènes.

Dans la littérature, deux approches ont été exposées : une approche basée sur

l'acquisition, et une seconde basée sur l'approximation de la diffusion.

### Approches basées sur l'acquisition

Les approches basées sur l'acquisition ont l'avantage de fournir une certaine quantité de données, qui peuvent être exploitées, afin de rendre des objets de formes différentes. Néanmoins, elles ne sont limitées qu'aux matériaux homogènes. En 2004, Goesle *et al.* proposent dans [GLL<sup>+</sup>04] une technique appelée DISCO (Digital Imaging of Subsurface sCattering Objects) autorisant le rendu sous-surfacique de matériaux hétérogènes et optiquement denses. Derrière ce jeu de mots se cache un système capable d'acquérir la réflectance en chaque point de l'objet, après un échantillonnage dense effectué sur la surface. Les objets translucides à reconstruire sont mis en rotation sur un socle tournant. Par la suite un laser dont la radiance est connue balaye la surface de l'objet, et une caméra enregistre la réponse impulsionnelle dans des vidéos à grande gamme dynamique. Les vidéos sont traitées afin de calculer les réflectances en chaque point. Bien que la méthode DISCO reste la première méthode, à proposer une modélisation des matériaux translucides non homogènes, elle accuse certains problèmes. La quantité de données issues de cette manipulation est particulièrement volumineuse, et les acquérir nécessite des temps très importants. Afin de pallier ces inconvénients, Peers *et al.* [PBM<sup>+</sup>06] reprennent le même principe d'acquisition de la réflectance dans [GLL<sup>+</sup>04], en comprimant les réflectances enregistrées et en accélérant le fonctionnement du système. La compression des matrices représentant les différentes réflectances est réalisée par le biais d'une factorisation en matrices non négatives. Plusieurs faisceaux laser sont émis en parallèle, et les réponses impulsionnelles sont collectées individuellement, à posteriori, depuis les vidéos acquises. Les méthodes basées sur l'acquisition souffrent principalement de problèmes projectifs classiques, tels que les occlusions et les distorsions qui peuvent apparaître dans les vidéos. Sur la Fig. 1.15, sont présentées deux images d'objets translucides hétérogènes issues des méthodes décrites ci-dessus.

### Approches basées sur l'approximation de la diffusion

Les adeptes de cette approche remontent à l'équation de diffusion, mais dans le cas de matériaux translucides non homogènes [Ish78]. Cette équation ressemble à l'équation 1.11 détaillée en haut, avec pour seules différences, la dépendance spa-



(a) Une carambole reconstruite selon la méthode de [GLL<sup>+</sup>04].

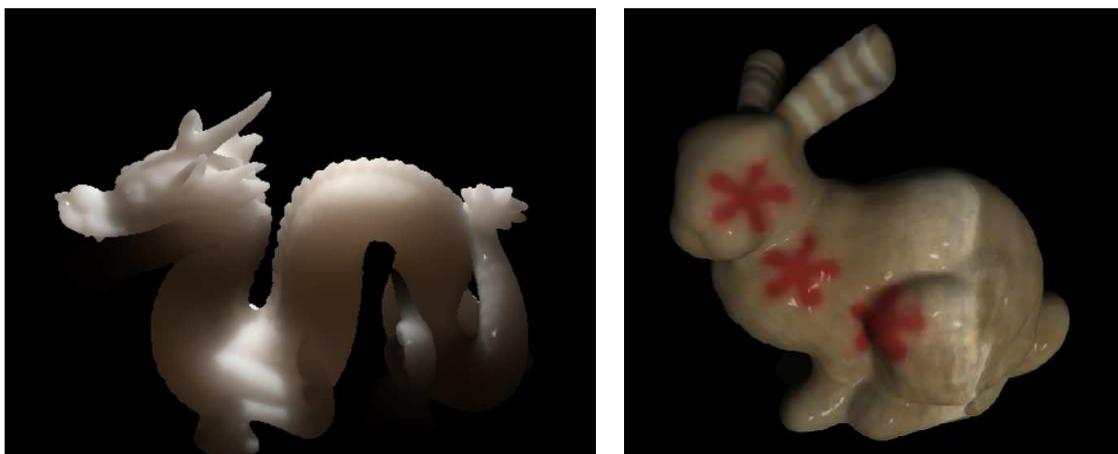


(b) Le dragon de Stanford en cire. Image extraite de [PBM<sup>+</sup>06].

FIG. 1.15: Quelques résultats issus de méthodes de rendu translucide hétérogène, basées sur l'acquisition.

tiale des coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction. L'application directe de l'équation de diffusion serait plus judicieuse et plus convenable, puisqu'elle est dépourvue de toutes les suppositions et les approximations apportées par la méthode du dipôle. En revanche, résoudre cette équation relève du défi, étant donné que c'est une équation aux dérivées partielles n'admettant pas de solution analytique. Il convient alors de faire appel à des méthodes de résolution numérique, afin d'approcher la solution.

Haber *et al.* décrivent dans [HMBR05] une solution numérique pour l'équation de diffusion. Les auteurs introduisent une discrétisation en *octree* et un solveur multi-grilles, et réussissent à résoudre numériquement l'équation de diffusion sur des objets à topologie complexe. En réalité, dans ce travail, les auteurs se sont plus intéressés au problème de visibilité lié aux géométries complexes, qu'à l'aspect hétérogène des matériaux rendus, même s'ils avancent que leur modèle est capable de gérer ce phénomène. En effet, une autre restriction du modèle du dipôle stipule que les objets traités doivent posséder des surfaces peu courbes et ne détenir aucun trou à l'intérieur. Leur méthode est très robuste quant à la complexité de la géométrie des objets, mais est inexploitable en temps-réel.



(a) Objet translucide rendu selon la méthode décrite dans [HMBR05]. (b) Objet en marbre avec un motif ajouté lors du rendu [WZT<sup>+</sup>08].

FIG. 1.16: Quelques résultats issus de méthodes de rendu translucide hétérogène, basées sur l'équation de la diffusion.

Une méthode temps-réel permettant la paramétrisation interactive d'objets translucides et hétérogènes a été présentée dans [WZT<sup>+</sup>08]. Dans ce travail, Wang *et al.* proposent de modéliser les objets dont les paramètres optiques sont connus, au moyen d'un algorithme appelé *polygrid diffusion algorithm*. Cet algorithme permet de mieux gérer les problèmes aux bords, même en présence de surfaces peu régulières. Les maillages sont représentés par des *polygrid*, une grille avec une connectivité nodale régulière et une forme irrégulière, ce qui facilite l'approximation numérique dans le cas de volumes aux formes arbitraires. C'est la connectivité nodale régulière qui autorise la parallélisation du processus de rendu et son implémentation sur cartes graphiques. L'utilisateur peut interagir directement avec les matériaux, au moment du rendu, et faire varier les paramètres optiques aux endroits voulus. Les résultats obtenus font preuve d'un réalisme captivant tel que le montre la Fig. 1.16.

### 1.1.5 Rendu sous-surfacique d'objets déformables

La peau est certainement le matériau le plus étudié dans la littérature consacrée au rendu sous-surfacique. Le rendu réaliste de la peau est une aubaine pour l'industrie cinématographique, cependant l'animation faciale des êtres virtuels ou semi virtuels est nécessaire. Il est alors vital de proposer des algorithmes et des mé-

thodes de rendu translucide, capables de calculer le transport de la lumière, dans des géométries déformables.

Le rendu translucide d'objets déformables a été peu exploré, à cause de la complexité du calcul interne de la surface. Théoriquement, la déformation des objets translucides impose aux modèles utilisés de permettre des calculs en temps-réel, et d'éradiquer au maximum toute phase de précalculs. On est même tenté d'avancer que mettre les termes *temps-réel* et *modèle déformable* dans une même phrase, serait un pléonasme. C'est ce qui explique le timide intérêt qu'a porté la communauté graphique au rendu déformable.

Le calcul du transport interne de la lumière, ressemble à une étape du calcul de la radiosité pour l'illumination globale. C'est dans cet esprit que Mertens *et al.* [MKB<sup>+</sup>03b] proposent une méthode de rendu déformable, s'inspirant du calcul de la radiosité hiérarchique avec partitionnement [HSA91]. Mertens *et al.* dans [MKB<sup>+</sup>03b] adoptent l'approximation du dipôle [JMLH01] et essaient de calculer la radiosité diffuse (voir Eq. 1.25) en partitionnant la géométrie. La géométrie des objets est partitionnée de manière hiérarchique et la radiosité diffuse est calculée au centre de chaque partition, par le biais de la méthode des moments. La radiance incidente est supposée constante en chaque point se trouvant dans la même partition. Profitant de toutes ces suppositions, le calcul de la radiosité diffuse est porté sur une carte graphique, ce qui rend la méthode interactive. Cependant, cette accélération matérielle ne concerne pas le partitionnement hiérarchique de la géométrie, qui est précalculée. Ceci rend le modèle incapable de gérer les hiérarchies non fixes, et échoue pour la manipulation des maillages adaptatifs et les déformations fines *displacement mapping*. Les résultats obtenus manquent de réalisme (voir Fig. 1.17), puisque chaque partition est considérée comme un seul bloc où tous les points interagissent avec la lumière, de la même manière.

Banterle et Chalmers décrivent une méthode temps-réel et empirique pour le rendu translucide dans [BC06]. La méthode est simplement basée sur l'observation que les objets translucides paraissent contrastés [FJH04]. Dans ce travail, la diffusion multiple est simplifiée par la supposition que la lumière incidente traverse la surface, et vient se focaliser en un seul point, à l'intérieur de l'objet. Par la suite, la lumière est transmise depuis ce centre de convergence, vers la surface du côté opposé, selon l'indice de réfraction. Cette simplification leur a permis de reprendre le modèle du

dipôle, mais en supprimant l'étape du calcul de la dispersion (voir Eq. 1.25). Le modèle du dipôle peut alors s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} L_s(x_s, \vec{\omega}_s) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_s) R'_d(a) B(x_s) \\ B(x_s) = \int_S E(x_e) dx_e \end{cases} \quad (1.27)$$

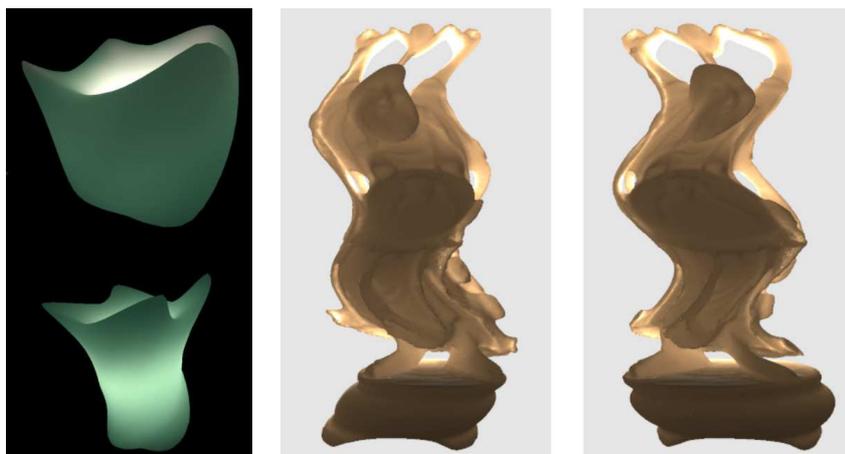
Les auteurs de [BC06] modifient la réflectance diffusion qui donne désormais le transport de la lumière entre le point de sortie  $x_s$ , et le point d'entrée  $x_e$ . Ici, le point d'entrée est défini comme étant le point d'intersection entre le vecteur de réfraction et la surface se trouvant sur le côté d'incidence de la lumière. La réflectance diffuse selon Banterle et Chalmers est donnée par :

$$R'_d(a) = (\sigma_{tr} a + 1) \frac{e^{-\sigma_{tr} a}}{\sigma_{tr} a^3} \quad (1.28)$$

Avec  $a$  la distance entre les points d'entrée et de sortie. L'accumulation des irradiances s'effectue après projection sur une base d'harmoniques sphériques. Les irradiances sont collectées sur une carte d'environnement particulière. En effet, au départ, les six faces d'un cube englobant l'objet illuminé sont rendues après projection de ce dernier, à l'aide de *render textures*. Ensuite, lors de la phase du rendu, les radiances de sortie sont calculées, *à la volée*. Il est vrai que de telles simplifications permettent facilement d'accélérer les calculs sur cartes graphiques, et autorisent la déformation des objets. Cependant, l'empirisme du modèle proposé est tel, que les images produites sont peu réalistes (voir Fig. 1.17).

## 1.2 Méthodes basées sur la BRDF

La fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle trouve une timide utilisation, dans le domaine du rendu translucide. Nous avons expliqué que leur application induit un aspect peu convaincant des matériaux translucides. La BRDF dispose de plusieurs modèles, des plus simples aux plus complexes. Ce sont principalement des modèles simplifiés, tels que ceux de Gouraud, Phong et Blinn-Phong qui échouent à estimer le transport interne de la lumière. D'autres modèles donnent des résultats satisfaisants, et ont été exploités pour l'évaluation de l'aspect translucide de certains matériaux. Ces modèles phénoménologiques tels que ceux de Hanrahan-Krueger [HK93], Ward [War92], Cook-Torrance [CT82] ou encore Kubelka-Munk



(a) Deux images d'une animation d'un objet translucide selon la méthode décrite dans [MKB<sup>+</sup>03b]. (b) Deux images d'une animation d'un objet translucide selon la méthode décrite dans [BC06].

FIG. 1.17: Quelques résultats issus de méthodes de rendu d'objets translucides et déformables.

[KM31], peuvent fournir des résultats exploitables. Dans cette partie de l'état de l'art, nous nous intéressons particulièrement, au modèle de Kubelka-Munk. Ce modèle a retenu notre attention pour son efficacité et la légèreté de ses calculs. Nous l'avons utilisé afin d'établir un moteur de rendu translucide et temps-réel dédié à la porcelaine (voir chapitre 3).

### 1.2.1 Le modèle de Kubelka-Munk

Kubelka et Munk introduisent leur théorie dans [KM31], afin d'analyser les propriétés optiques des milieux troubles. Ces milieux ont une grande teneur en matières troublantes, appelées particules colloïdales. Le niveau d'impureté ou de pollution d'un matériau se mesure par la turbidité. On parle même de milieux turbides, pour désigner des matériaux tels que le lait, les nuages, les eaux polluées, etc. La théorie de Kubelka-Munk stipule que pour déterminer le flux émergent qu'il soit réfléchi ou transmis, on découpe la couche diffusante en lamelles très fines d'épaisseur différentielle  $dx$  parallèlement aux interfaces et l'on évalue le bilan radiatif pour chacune de ces tranches (voir Fig. 1.18). Dans un milieu diffusant, on peut considérer le

rayonnement incident comme complètement diffus et isotrope, il sera alors nécessaire d'évaluer efficacement l'épaisseur de la couche élémentaire, puis de résoudre le système obtenu à partir des équations différentielles couplées.

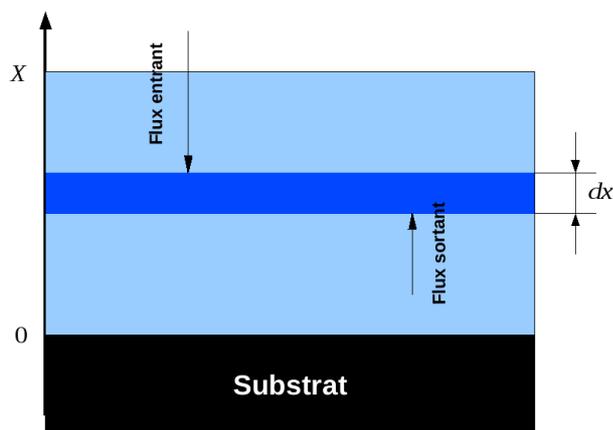


FIG. 1.18: Coupe schématique d'une couche diffusante et absorbante.

La théorie de Kubelka-Munk ou théorie des deux flux, regroupe un ensemble d'équations capables de prédire les couleurs de matériaux translucides, car elle fournit des modèles pour la réflectance et la transmittance d'un matériau placé sur un substrat de réflectance connue. La théorie considère deux flux de lumière; La réflectance  $R(X)$  et la transmittance  $T(X)$  pénétrant à l'intérieur d'un objet diffus et absorbant, dans deux directions opposées. Les rayons sont projetés depuis la position de l'observateur à travers le matériau, et sont par la suite échantillonnés en des intervalles réguliers. Ces intervalles définissent d'infinies couches du matériau. En effectuant une intégration le long de l'épaisseur  $X$ , la réflectance et la transmittance totales peuvent être évaluées.

La théorie de Kubelka-Munk permet de recouvrir la réflectance et la transmittance totales, d'un matériau constitué de plusieurs couches translucides superposées. Les valeurs de la réflectance et de la transmittance totales peuvent être calculées à partir des différentes réflectances et transmittances de toutes les couches. Pour plus de détails mathématiques, se référer à l'annexe à la fin de ce document.

### 1.2.2 De la théorie de Kubelka-Munk au rendu de la porcelaine

La porcelaine est certainement le matériau pour lequel, le modèle de Kubelka-Munk a largement été appliqué. La porcelaine en tant que matériau translucide, pur et d'une blancheur éclatante a longtemps servi à la fabrication des prothèses dentaires. La porcelaine entre désormais dans la composition des couronnes et des plaques dentaires, et nous évite tout sourire jaune. En revanche, la porcelaine dispose d'une infinité de nuances de blancheur, de translucidité et d'éclat. Plusieurs facteurs peuvent influencer ces paramètres : les températures et les temps de cuisson, la composition de la porcelaine ou encore, le pourcentage de cette dernière dans la fabrication des prothèses dentaires. Les prothésistes s'affairaient à assortir la couleur et l'apparence des dents avec celles de la porcelaine, en changeant la composition du matériau, et le processus de sa fabrication. L'apparence des dents telle qu'elle est perçue par l'œil humain est un phénomène psychovisuel complexe et est influencée par l'illumination et les caractéristiques optiques de la dentine.

Dans [Din76], les auteurs introduisent la première application du modèle de Kubelka-Munk, dans le but d'établir une étude optique de la porcelaine. Ce travail avait été complété par Hogg dans [Hog79]. Ces deux travaux étaient purement théoriques, et ne cherchaient aucune application pratique. Ils ont ultérieurement inspiré bon nombre de prothésistes et autres chercheurs en optique des céramiques. Brodbelt *et al.* comparent dans [RHBF80] les teintes de cinq échantillons de porcelaine dentaire. Dans ce travail, l'information de translucidité est estimée en apportant une modification dans la formulation de transmittance, telle qu'elle est décrite dans le modèle de Kubelka-Munk. Cependant, le modèle proposé est empirique, et n'est adapté qu'à des échantillons minces de porcelaine. O'Brien *et al.* dans [WOF85] présentent une étude spectrale de la porcelaine émaillée. La couche d'émail translucide appliquée sur la porcelaine doit être prise en compte lors de toute estimation de la réflectance. L'émail possède ses propres propriétés optiques, et influence la couleur de la porcelaine, lui donnant plus d'éclat et de spécularité. O'Brien *et al.* mesurent la réflectance de chacune de ces deux couches, afin d'étudier l'influence de l'émail sur la couleur finale. Les résultats obtenus sont expliqués sur la base de la théorie de Kubelka-Munk. Ce travail démontre la capacité de la théorie de Kubelka-Munk

à prédire la réflectance de matériaux en multicouches.

La théorie de Kubelka-Munk ne gère pas les interréflections qui peuvent engendrer des erreurs tangibles, dans l'estimation des propriétés optiques de la porcelaine. Johnston *et al.* [WJT86] incorporent des corrections en prenant en compte les interréflections. Les auteurs entament une étude comparative entre les résultats obtenus avec et sans considération des interréflections, et concluent en mettant l'accent sur l'écart important qui existe entre les coefficients de diffusion et d'absorption calculés dans les deux cas.

Sugiyama *et al.* présentent [TSO96] une étude intéressante, démontrant l'efficacité de la théorie de Kubelka-Munk, à comprendre les propriétés optiques de la porcelaine. Dans cette étude, les auteurs effectuent des études optiques sur trois échantillons de types différents de porcelaine. L'extraction des propriétés optiques des trois échantillons est effectuée selon deux lois, la loi de Lambert et celle de Kubelka-Munk. Le choix de la loi de Lambert, bien qu'elle soit empirique, est justifié par sa simplicité, et la quantité réduite de données dont elle a besoin. En revanche, la loi de Lambert ne permet de calculer que le coefficient d'absorption apparente (voir Eq. 3.6 de l'annexe). Cette grandeur s'avère plus appropriée à l'évaluation de la translucidité de la porcelaine à l'aide de la loi de Lambert, à cause du faible risque d'erreurs de mesures, dû à sa simplicité. Cependant, la théorie de Kubelka-Munk donne le moyen de calculer directement les coefficients d'absorption et de diffusion du matériau, qui fournissent une caractérisation plus adéquate de sa translucidité. Dans un autre travail [TSS03], Sugiyama *et al.* se sont intéressés une fois de plus aux caractéristiques de la porcelaine, mais plus particulièrement à la porcelaine japonaise préparée à base d'argile plastique. La porcelaine japonaise se caractérise par sa souplesse, contrairement aux porcelaines européennes réputées pour leur consistance. Le but de leurs études est d'améliorer les caractéristiques optiques de la porcelaine japonaise, ou en d'autres termes, d'accentuer la translucidité et la blancheur de ce matériau. La translucidité et la blancheur des matériaux sont respectivement liées aux coefficients d'absorption et de diffusion de la lumière. Les études se sont portées sur sept échantillons de porcelaine japonaise, avec différentes compositions : essentiellement des composantes métalliques et argileuses. Les auteurs estiment les propriétés optiques de tous ces échantillons, à l'aide de la théorie de Kubelka-Munk, et s'aperçoivent que les composantes métalliques décroissent les valeurs des coeffi-

cients d'absorption de la lumière, tandis que les composantes argileuses accroissent les coefficients de diffusion. Cette constatation permet d'affirmer qu'un bon moyen d'améliorer les propriétés esthétiques de la porcelaine japonaise serait de réduire la quantité des composantes métalliques, et d'augmenter celle des composantes argileuses lors du processus de fabrication.

Les propriétés optiques des dents et de l'émail dentaire sont des constantes connues dans le domaine de la médecine dentaire. La théorie de Kubelka-Munk avait servi aux prothésistes, afin de mieux appréhender les propriétés optiques des matériaux nécessaires à la construction des prothèses dentaires, dans le but d'atteindre des apparences semblables à celles des dents réelles. Il serait intéressant de tester l'efficacité de cette théorie prédictive, en effectuant des études optiques sur des dents humaines. Ragain *et al.* dans [JR01] soumettent des échantillons de dents et d'émail dentaire à des études spectrales. Par la suite, ils comparent les réflectances mesurées, issues de leur manipulation, aux valeurs théoriques obtenues après application directe de la théorie de Kubelka-Munk. Ils constatent que les résultats donnés par les études spectrales réalisées sont très proches des valeurs théoriques. Ils concluent en avançant que la théorie des deux flux peut efficacement être exploitée, lors de la fabrication des prothèses dentaires.

La théorie de Kubelka-Munk est un puissant formalisme physique, à même de prédire la réflectance et la transmittance de n'importe quel matériau translucide, soumis à une illumination arbitraire. Cette théorie autorise également le calcul des propriétés optiques des matériaux, pourvu qu'un système adéquat d'acquisition de la réflectance et la transmittance soit mis en place. La littérature ne désemplit pas de techniques et de systèmes d'acquisition de la réflectance ou de la transmittance. Dans la section suivante, nous décrirons différentes méthodes d'acquisition, en expliquant les avantages et les contraintes de leur utilisation. À la fin de la section, nous justifierons le choix de la technique la mieux adaptée à l'acquisition des données nécessaires au calcul des propriétés optiques de la porcelaine, dans le cadre de l'application de la théorie de Kubelka-Munk.

### 1.2.3 Acquisition de la réflectance et de la transmittance

Le rendu réaliste est cette partie de la synthèse d'images, qui s'efforce de simuler l'apparence d'un objet et d'une scène du monde réel qui nous entoure. Ceci implique

la réplique de l'apparence d'une scène grâce à une simulation physique efficace. Face au défi de la caractérisation de la couleur des matériaux, sont apparus des instruments qui permettent de la quantifier. Ce sont des capteurs de couleur qui mesurent la part de lumière réfléchiée par un objet donné. Ces dispositifs peuvent être classés suivant le type de capteurs utilisés. Le capteur peut être une simple caméra capturant des images d'un objet illuminé, on parle alors d'acquisition basée images. Éventuellement, la réflectance peut être capturée par le biais d'un spectromètre. Les spectromètres mesurent le spectre de réflexion ou de transmission d'un objet. Ce dernier est éclairé par une source à spectre préalablement connu.

### Acquisition basée images

Les caméras contiennent des millions d'éléments capteurs photosensibles. En utilisant des miroirs et des lentilles, ces éléments peuvent être utilisés pour collecter simultanément la radiance de sortie d'un grand nombre d'échantillons. Ce parallélisme permet d'estimer la réflectance sur une surface quasi-plane, en peu de temps. Le dispositif est constitué d'une caméra haute résolution, d'un flash puissant et d'un laser à faisceau collimaté (voir Fig. 1.19). Selon les besoins, la liberté de mouvement autour de l'objet peut être donnée à la caméra, ou bien à la source lumineuse.



FIG. 1.19: Photo du dispositif utilisé dans [PBM<sup>+</sup>06].

Ward propose un des premiers systèmes de mesures bases images [War92]. Dans ce système, la radiance émise par un échantillon plat est capturée par une caméra œil-de-poisson (*fisheye camera*). L'intérêt de l'utilisation de ce type de lentilles réside dans la possibilité de capturer la totalité de l'hémisphère de sortie, sur une seule

image. Les gains de temps sont considérables lors du processus de mesure, et le système ne compte plus que deux degrés de liberté attribués à la source lumineuse. L'utilisation de ce système ne nécessite qu'une dizaine de minutes, afin de mesurer la BRDF d'un matériau anisotropique. L'utilisation de lentilles œil-de-poisson est très contraignante, les images prises montrent des distorsions significatives sur les bords, de plus, il est difficile de mesurer la radiance de sortie émise par des surfaces courbes. Lu *et al.* [RLK98] proposent d'utiliser des caméras à lentilles ordinaires, afin de mesurer la BRDF de tissus en velours. Un objet de forme cylindrique est enveloppé d'un morceau de tissu. Cette forme cylindrique facilite l'acquisition de la radiance émise, en plaçant une caméra en rotation autour de la partie latérale du cylindre. Leur système révèle une estimation satisfaisante de la BRDF, même si les temps de mesures sont plus importants que dans [War92]. Dans un autre travail, l'objet soumis aux mesures de la BRDF, est de forme sphérique, ceci élimine les problèmes d'acquisition sur les bords d'un cylindre [RLK98]. Matusik *et al.* [Mat03] proposent de mesurer la BRDF d'objets de forme grossièrement sphérique, et les objets sont rendus à l'aide des données acquises, au lieu d'appliquer des modèles analytiques de réflectance.

Les méthodes discutées ci-dessus sont limitées aux échantillons de formes plates, cylindriques ou sphériques. Ce sont des formes de géométrie connue, et leur projection sur les capteurs CCD ne peut induire que quelques aberrations négligeables. La reconstruction de la BRDF à partir d'images acquises d'objets de formes arbitraires représente un problème épineux, et continue à faire l'objet de recherches. Dans un travail proposé par Marschner *et al.* [MG99], la géométrie de l'objet est reconstruite à l'aide d'un scanner laser 3D, et est par la suite alignée sur les images de la BRDF acquises avec une caméra tournant autour de l'objet. Ce procédé introduit des sources d'erreurs additionnelles, résultant du recalage entre les images acquises et la forme reconstruite.

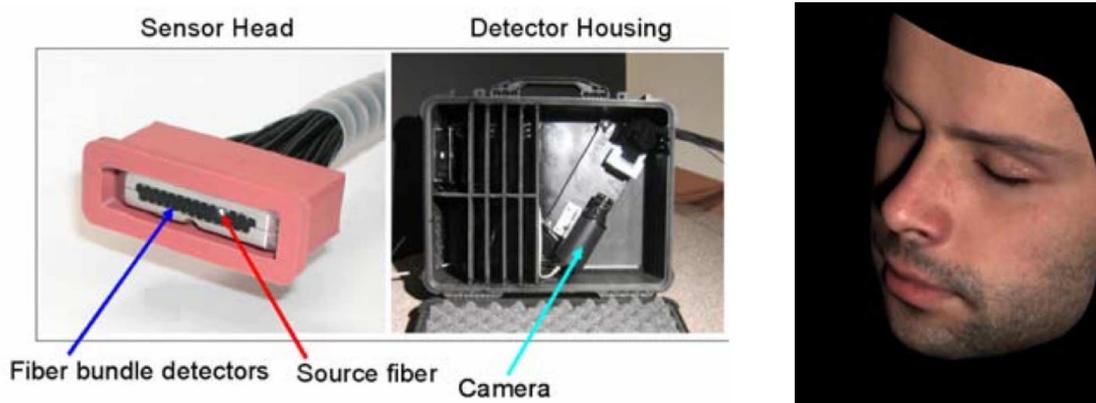
Le rendu d'objets translucides n'a pas échappé à l'utilisation de techniques d'acquisition, dans le but de mesurer les propriétés optiques des matériaux. Les quelques travaux proposés en ce sens, sont basés sur des systèmes d'acquisition basés images. Jensen *et al.* [JMLH01] exploitent la réflectance analytique obtenue après application de l'approximation dipôle, afin de la mesurer et d'en extraire les coefficients d'absorption et de diffusion de la lumière de matériaux homogènes. Un simple méca-

nisme d'acquisition est introduit, constitué d'une caméra et de deux lentilles servant à collimater la lumière incidente. Les méthodes [GLL<sup>+</sup>04, PBM<sup>+</sup>06] citées dans la section 1.1.4 reposent toutes les deux sur des systèmes basés images, mais sont dédiées aux matériaux hétérogènes. Weyrich *et al.* avaient imaginé un système bien élaboré d'acquisition de la géométrie de visages humains, et de la réflectance de la peau dans [WMP<sup>+</sup>06]. Les données acquises sont décomposées en plusieurs catégories : la géométrie des visages, une BRDF pour une réponse non locale à l'illumination et une BSSRDF pour une réponse locale due à la diffusion sous-surfacique. Les deux premières catégories sont mesurées en plaçant des sujets humains à l'intérieur d'un dôme géodésique orné de caméras et de LEDs assurant un éclairage uniforme. La BSSRDF est mesurée en utilisant une tête flexible composée d'un grand nombre de fibres optiques de détection, et d'une fibre source reliée à une LED. Les fibres de détection se rejoignent dans une boîte où se trouve une caméra numérique (voir Fig. 1.20a). C'est la caméra qui s'occupe de l'enregistrement de la réponse locale. Les images obtenues sont très fidèles à la réalité, tel qu'on peut le voir sur la Fig. 1.20b. Dans un autre travail [ZERB05], Zickler *et al.* avaient tenté de reconstruire des visages humains à partir d'images prises par quatre caméras. Les auteurs calculent la réflectance de la peau à partir des images, mais ne basent le rendu sur aucun modèle physique. Ils négligent dans leur travail le transport interne de la lumière, et produisent des images manquant de réalisme.

Les systèmes d'acquisition basés images permettent de reconstituer la réflectance de matériaux éclairés avec efficacité, et ce, en des temps raisonnables. Cependant, leur emploi n'est pas dépourvu de contraintes ; une calibration minutieuse des caméras doit être effectuée, avant le début de chaque procédure d'acquisition, de plus, il est impératif de reconstruire la géométrie des objets avant de procéder aux mesures.

### Acquisition spectrale

Le spectromètre est l'instrument essentiel pour toute construction d'un système d'acquisition spectrale. Il permet de décomposer une quantité de radiance captée, en un large éventail de longueurs d'onde qui constituent le spectre de la lumière. Le spectromètre est relié à un détecteur qui autorise l'enregistrement des données spectrales, pour chaque combinaison spatiale de la source lumineuse et du détecteur. L'ensemble est synchronisé à l'aide de moteurs, afin de positionner la source et le



(a) Mécanisme utilisé dans [WMP+06] pour l'acquisition de la BSSRDF.

(b) Image résultant après le processus d'acquisition décrit dans [WMP+06].

FIG. 1.20: À gauche, image représentant le système d'acquisition utilisé par Weyrich *et al.*. À droite, image extraite de [WMP+06].

capteur à différents endroits, sur l'hémisphère au-dessus de l'échantillon du matériau à analyser. L'appareillage complet porte le nom de goniospectromètre, et ses applications sont tout aussi variées que ses caractéristiques techniques et matérielles.

Traditionnellement, en synthèse d'images, le spectre lumineux ne sert pas en sa totalité. Le rendu des images repose sur des systèmes colorimétriques simplifiés, à faible dimensionnalité. Ceci réduit considérablement la taille des données à analyser, et compense les temps de mesures considérables, qui peuvent durer des journées entières. Les mesures spectrales, pour des positions angulaires données, conduisent à la quantification de la couleur. La mesure directe des flux lumineux diffusés, à une longueur d'onde donnée, en fonction des angles d'incidence ou d'observation conduira à la répartition angulaire du facteur de réflexion diffuse et à la BRDF des matériaux étudiés. Ces grandeurs expérimentales représentent un outil important pour décrire les propriétés optiques des matériaux, et l'origine de leurs couleurs. Dans ce qui suit, nous décrivons quelques appareillages de mesure à différentes vocations.

Afin de rendre les systèmes de mesures plus portables, et réalisables sur place et en temps-réel, les appareillages peuvent être fabriqués de manière à ce que les directions de la lumière incidente et la lumière de sortie soient identiques. Ces systèmes appelés goniospectromètres en rétrodiffusion servent essentiellement à la restauration archéologique, et à la reconstitution en images de synthèse d'objets antiques

[EM01].

Lorsque les directions incidente et recueillie de la lumière sont découplées et modifiables, on parle de goniospectromètres bi-directionnelle. Ces appareillages sont certainement les plus adaptés à toute acquisition efficace de la BRDF. La conduction de la lumière est assurée par une fibre optique et une lentille est introduite dans le cas d'un éclairage avec une source lumineuse non collimatée. Autrement, il est d'usage d'utiliser des lasers, pour leur puissance et le faible angle de dispersion de la lumière. Cependant, les lasers balayent un nombre réduit de longueurs d'onde, et leur utilisation peut entraîner des temps de mesures considérables, puisqu'il est obligatoire de reprendre le processus d'acquisition pour chaque longueur d'onde voulue. La lumière réfléchie est détectée puis numérisée par un ordinateur. La machine permet, de plus, de coupler la mesure du flux de sortie à la position angulaire du bras détecteur et de régler le temps d'intégration de la mesure. Les échantillons sont placés sur un plateau muni d'un réglage de translation rotation, afin d'ajouter un degré de liberté supplémentaire. White *et al.* dans [WSB<sup>+</sup>98] présentent un système de mesures de la BRDF (voir Fig. 1.21). Les auteurs mesurent la réflectance de métaux lourds utilisés dans l'industrie métallurgique, en essayant de mesurer l'impact de la thermométrie radiative sur leur résistance.

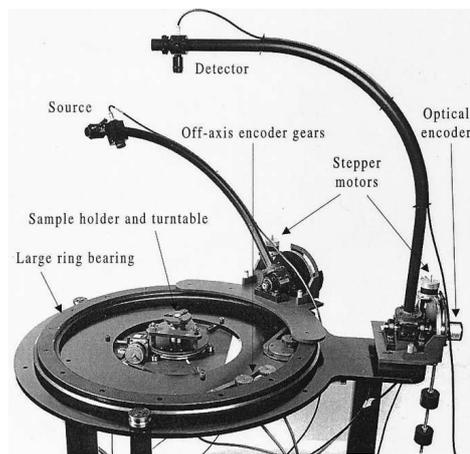


FIG. 1.21: Photo du dispositif utilisé dans [WSB<sup>+</sup>98].

Les spectroradiomètres sont une variante des spectromètres, et se distinguent par leur limitation au spectre visible. Cette limitation leur attribue une meilleure précision de mesure dans cette plage de longueurs d'onde, et confère à l'appareil un rôle de calibration des écrans LCD et CRT par les constructeurs, ou plus simple-

ment par les consommateurs afin de tester les caractéristiques des lampes dans le commerce. Tsuchida *et al.* [TUA<sup>+</sup>05] présentent un dispositif qui permet de mesurer les BRDFs et les BTFs (Bidirectional Texture Function) d'objets opaques, et d'exploiter les résultats à l'aide de logiciels de conception assistée par ordinateur. L'équipement d'acquisition spectrale consiste en un spectroradiomètre et d'un goniomètre, tous deux coordonnés par un ordinateur. Dans leur article, les auteurs effectuent des études spectrales sur des tissus en satin (voir Fig. 1.22a). Les temps d'acquisition et les coûts des équipements peuvent être revus à la baisse, si l'on s'intéresse à l'enregistrement de BRDFs isotropiques. Dans ce cas, la fonction à analyser ne possède que trois dimensions angulaires, donc autant de degrés de liberté attribués au système. Li *et al.* [LFTW05] construisent un système d'acquisition sur le modèle des goniospectromètres classiques, en léguant deux degrés de liberté au plateau supportant l'échantillon, et un autre à la source de lumière. C'est donc l'angle d'observation (position sphérique du capteur) qui est fixe. Les auteurs effectuent des études spectrales sur des échantillons de métaux utilisés en industrie automobile, et exploitent les données obtenues pour le rendu de voitures (voir Fig. 1.22b).

La spectrométrie n'a pas été largement explorée dans l'acquisition de la BRDF appliquée à la synthèse d'images de matériaux opaques. Elle n'a d'ailleurs trouvé aucune application pour le rendu d'objets translucides, certainement à cause de la dimensionnalité octale de la BSSRDF induisant des temps de mesures considérables, lorsque'une grande résolution angulaire est recherchée. En effet, chaque mesure unitaire après ajustement du goniomètre prend quelques secondes, selon le temps d'intégration choisie. La mesure de la BRDF dure donc typiquement quelques heures, si l'influence de l'angle d'incidence de la lumière n'est pas nécessaire, autrement, une caractérisation complète peut donc durer plusieurs jours. Ceci est vrai dans le cas de l'application de modèles complexes de BRDFs et de BSSRDF, disposant d'un grand nombre de dimensions. L'avantage du modèle de Kubelka-Munk est sa faible dimensionnalité, de sa dépendance spatiale à la seule information de l'épaisseur.

### 1.3 Conclusion

Dans la première partie de ce survol des techniques de rendu translucide, nous avons abordé les différents aspects théoriques des phénomènes du rayonnement au



(a) Image tirée de [TUA<sup>+</sup>05]. Les réflectances de chaque matériau constituant la voiture sont acquises à l'aide d'un goniospectromètre.

(b) Image tirée de [LFTW05]. Les réflectances de chaque matériau constituant la voiture sont acquises à l'aide de gonio-spectroradiomètre.

FIG. 1.22: À gauche, image représentant une robe en satin, où la réflectance est mesurée par Tsuchida *et al.*. À droite, image extraite de [LFTW05].

sein des milieux semi-transparents. De la théorie de Rayleigh, jusqu'aux prouesses esthétiques des derniers modèles de rendu translucide, en passant par les travaux de Jensen en 2001. Cette année avait marqué un tournant dans l'accélération des calculs du transport interne de la lumière. Plusieurs travaux fondateurs avaient par la suite vu le jour, et contribué à leur façon à l'amélioration des temps de calculs et la qualité des images obtenues.

Auparavant, les travaux se heurtaient à l'inexistence de solutions exactes et analytiques au problème du rendu translucide. Le recours aux méthodes de Monte-Carlo était inévitable, mais la faible vitesse de convergence de ces méthodes entravait les temps de calculs, et la qualité des résultats. De plus, la puissance des machines de l'époque avait de quoi envier celle de nos jours, et ne contribuait aucunement à l'efficacité des techniques proposées.

L'évolution exponentielle de la puissance des cartes graphiques, que nos machines ont connue depuis le début des années 2000, a été d'un très grand secours à la communauté graphique. Cette évolution a ouvert bien des perspectives de recherche,

et a surtout permis de mettre en œuvre, des résultats fonctionnant en temps-réel.

La cohabitation des modèles analytiques pour le rendu translucide avec les progrès technologiques apportés au matériel graphique, a généré des résultats de plus en plus réalistes et interactifs.

C'est dans ce contexte favorable que les travaux que nous proposons dans le chapitre 2, profitent des avancées théoriques dans le domaine de l'interaction de la lumière avec les objets translucides, et de la puissance des processeurs graphiques, afin proposer un modèle à même de produire des résultats convaincants.

La deuxième partie de ce chapitre nous renseigne sur un modèle d'estimation de la réflectance et de la transmittance, dans des milieux translucides, ainsi que sur les appareillages et les techniques de mesures des radiances de sortie. Nous avons également vu l'application de la théorie de Kubelka-Munk pour le calcul des données spectrales de la porcelaine.

Dans le chapitre 3, on s'intéresse aux objets constitués de porcelaine, un matériau qui n'a jamais fait l'objet de recherche par la communauté graphique. Nous étendons nos recherches aux objets en porcelaine émaillée, où il est nécessaire de tenir compte des deux couches de l'émail et de la porcelaine. La théorie de Kubelka-Munk permet de gérer des matériaux multicouches, si on lui injecte les propriétés optiques de chaque couche. Ces propriétés peuvent être recouvertes suite à un processus de mesure spectrale, et l'application de la théorie des deux flux.

---

## Chapitre 2

# Rendu temps-réel d'objets translucides et déformables

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>53</b>
<b>2.2</b>	<b>Algorithmes et techniques</b>	<b>56</b>
2.2.1	Création des ATF et calculs des radiances d'entrée	57
2.2.2	Estimation de la diffusion sous-surfacique	61
2.2.3	Déformabilité	66
2.2.4	Implémentation	67
<b>2.3</b>	<b>Résultats</b>	<b>69</b>
<b>2.4</b>	<b>Discussion et travaux futurs</b>	<b>75</b>

---

## 2.1 Introduction

L'étude que nous avons établi de la littérature abondante consacrée aux modèles de rendu translucide (chapitre 1), nous a permis de constater que très peu de travaux s'intéressent au calcul du transport de la lumière, à l'intérieur d'objets déformables. Un manque de considération ou d'intérêt n'explique en aucun cas cette mise à l'écart de cet aspect du rendu translucide. Ce sont la complexité du phénomène et la lourdeur des calculs qui en sont à l'origine. Néanmoins, le rendu d'objets translucides et déformables mériterait d'être exploré, pour les diverses applications auxquelles il pourra accéder; des applications tant médicales, physiques que de di-

vertissement. L'utilisateur d'un simulateur de chirurgie ne peut avoir l'impression d'une réelle immersion à l'intérieur du corps humain, si les différents organes vitaux, majoritairement translucides, ne changent pas de forme en temps-réel, sous ses yeux. Le spectateur d'un film d'animation ne peut admirer une bougie translucide qui se consume, si aucune gestion du changement de sa forme n'est prise en compte.

Nous avons vu que le rendu de l'interaction de la lumière avec des objets translucides nécessite l'utilisation d'un modèle plus global que la Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). Dans le cas de matériaux opaques, les rayons de la lumière pénètrent le matériau et le quittent depuis un même point, dans ce cas, la déformation des objets est plus simple à effectuer. Puisque les valeurs des réflectances ne dépendent que du gradient d'un seul et unique point. Ainsi, lorsque la géométrie de l'objet est altérée, le gradient l'est à son tour, et la nouvelle valeur de la réflectance en ce point est simplement mise à jour. La situation est toute autre, plus complexe, dans le cas d'une modélisation à l'aide d'une BSSRDF. La radiance de sortie en chaque point n'est estimée qu'après calcul de la dispersion. Le calcul de la dispersion est une lourde étape durant laquelle, la radiance en un point est somme des radiances d'un certain nombre de points contribuant. Il est donc évident que l'étape du calcul de la dispersion doit être re-effectuée au moindre changement dans la géométrie de l'objet. C'est la mise à jour de l'estimation de la dispersion sous-surfacique qui s'impose comme un véritable défi.

Le premier objectif de cette thèse a été de mettre en œuvre une méthode pour le rendu d'objets translucides et déformables. La méthode devait permettre la modification du point de vue, de la géométrie de l'objet et des conditions d'illumination, en gardant des temps de calculs interactifs.

Nous avons fait le choix d'adopter le modèle du dipôle [JMLH01], qui, tel que nous avons exposé dans le chapitre 1, a largement été utilisé. La majorité des différentes techniques temps-réel existantes n'autorisent pas la déformation des objets translucides. Ceci s'explique très souvent, par l'existence d'une phase de précalculs, utile à l'estimation du transport interne de la lumière. Les techniques qui utilisent les atlas de textures [LGB<sup>+</sup>02, CHH03] afin d'y conserver la géométrie des objets, ne peuvent servir à nos attentes. La formation de ces atlas de textures se fait par le biais d'une paramétrisation manuelle, après une projection spécifique, des surfaces des objets sur un plan. Elle est établie préalablement, avant même le début du calcul du transport

de la lumière. Il aurait donc fallu les recréer à chaque déformation de la géométrie, ce qui est invraisemblable. Les modèles qui exploitent les projections sur des bases de compression [HV04,MKB<sup>+</sup>03a, SHHS03, WTL05, WCPW<sup>+</sup>08, XGL<sup>+</sup>07] afin de comprimer l’illumination, ou autres modules de calculs relatifs au rendu translucide, ne sont que très peu adaptés à la possibilité de déformer les objets. La projection de l’illumination sur des bases nécessite le parcours de la totalité des points échantillons des objets, en vue de récolter les coefficients fréquentiels. La déformation des objets impliquerait donc une nouvelle projection, de manière à obtenir les coefficients fréquentiels, à chaque nouvelle configuration géométrique. Cette tâche coûterait très lourd aux temps de calculs, et interdirait l’interactivité avec les objets translucides.

Dans nos travaux, nous choisissons d’employer des *atlas de textures flexibles* (ATF), dans le but d’enregistrer l’information de géométrie des objets à rendre. Le choix de ce néologisme n’est pas anodin, au-delà de sa sémantique, ces textures aspirent à pallier les inconvénients de l’utilisation des atlas de textures classiques. Outre la capacité des *atlas de textures flexibles* à gérer les objets déformables, ils réduisent les différentes aberrations géométriques que peut générer la création des atlas de textures classiques. La paramétrisation manuelle et préalable des atlas de textures entraîne l’apparition de distorsions et d’auto-occlusions. Ces aberrations peuvent invalider le calcul de la BSSRDF, et mettre en péril la cohérence physique des rendus obtenus.

La méthode que nous proposons simule le transport de la lumière à l’intérieur d’objets translucides. Elle n’exige aucune phase de précalculs, tout en atteignant des taux de rendu interactifs. Pour le calcul de la réponse locale, la méthode reprend dans sa conception l’idée de l’utilisation des atlas de textures, mais en change complètement la structure, et le mode de leur création. Les atlas de texture flexibles se présentent sous la forme de cubemaps générés en projetant le maillage sur les six faces du cube englobant. La projection donne un accès intuitif et direct au texel qui correspond à chaque point du maillage ainsi qu’à son voisinage. La projection et la génération des coordonnées de textures sont implémentées sous GPU afin de permettre l’interactivité. Ainsi, la paramétrisation *à la volée* de ces atlas rend possible leur régénération à chaque déformation des objets. De plus, le recouvrement de l’information du voisinage devient intuitif et formel. Pour l’estimation de la réponse globale, nous proposons une technique basée sur l’observation que cette dernière

peut être modélisée à l'aide du modèle du dipôle, si l'effet de la source virtuelle est annulé.

## 2.2 Algorithmes et techniques

Nous considérons dans ce travail les matériaux optiquement denses, où la contribution de la composante de diffusion simple est faible, et peut donc être facilement négligée. La composante de diffusion multiple est séparée en deux parties : la réponse locale et la réponse globale.

Deux techniques ont influencé notre travail. La première est décrite par Dachsbacher *et al.* [DS03] où une carte d'ombres pré-calculée est utilisée pour stocker les irradiances de chaque point du maillage. Cependant, le précalcul de la carte d'ombres ne permet pas de déformer les objets. Mais l'accumulation *à la volée* des irradiances a retenu notre attention. La seconde technique est présentée par Banterle *et al.* [BC06]. Les auteurs implémentent une carte d'illumination particulière. Ces cartes sont créées après projection sur les six faces du cube englobant d'un objet, après illumination. La méthode rend possible la déformation des objets translucides, mais n'est malheureusement pas correcte physiquement (voir chapitre 1). La projection de la géométrie des objets sur des cubemaps a retenu notre attention, et nous avons essayé de l'adopter et l'adapter pour le calcul des réponses locale et globale.

Notre méthode ne nécessite pas de pré-calculs, les radiances incidentes seront calculées et stockées *à la volée* dans un cubemap. Tous les calculs sont effectués sous GPU afin d'autoriser une illumination dynamique et la déformation des géométries.

Nous reprenons le schéma théorique proposé dans [JB02], le calcul de la dispersion sous-surfacique est découpé en deux phases, et est régi par les équations 2.1, 2.2 et 2.3. Dans les sections suivantes, nous présentons dans un premier temps, les deux phases que nous avons établies pour le calcul de la BSSRDF. Dans la première phase, nous décrivons nos algorithmes de création des atlas de textures flexibles, et l'estimation de l'irradiance en chaque point. Dans la seconde phase, nous exposons les différentes méthodes utilisées pour l'accumulation des irradiances, et le calcul de la radiance de sortie (estimation de la translucidité), tout en évitant les problèmes de distorsions et d'auto-occlusion. Chacune de ces deux phases est réalisée à l'aide d'une paire de shaders : un vertex shader et un pixel shader.

$$L_s(x_s, \vec{\omega}_s) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_s) B(x_s) \quad (2.1)$$

$$B(x_s) = \int_S E(x_e) R_d(r) d(x_e) \quad (2.2)$$

$$E(x_e) = \int_{\Omega} L_e(x_e, \vec{\omega}_e) F_t(\eta, \vec{\omega}_e) |\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_e| d\omega_e \quad (2.3)$$

Dans le reste de ce chapitre, nous démontrons la flexibilité de notre méthode quant aux modèles déformables, et sa robustesse face aux erreurs de projection. Ensuite, nous détaillons plusieurs points ayant trait à l'implémentation de nos méthodes, avant d'aboutir à la présentation des résultats en chiffres et en images.

### 2.2.1 Création des ATF et calculs des radiances d'entrée

Dans le but de développer un support de stockage des différentes radiances d'entrée en chaque point, nous avons retenu l'utilisation de ATF. Ces atlas particuliers servent à stocker de manière dynamique, les irradiances des points de la surface, qui peuvent évoluer avec le temps. Dans ce qui suit, nous introduisons le mode de création de ces ATFs, et le calcul des irradiances.

#### Projection et accès aux ATF

La projection qu'implique la création des atlas de textures classiques induit bien des inconvénients. La projection d'un maillage sur un seul plan entraîne d'éventuelles apparitions de distorsions et d'auto-occlusions. De plus, la prédéfinition des coordonnées de textures n'autorise pas la déformation des objets interactivement. L'algorithme de création des atlas de textures flexibles que nous proposons réduit significativement les distorsions et les auto-occlusions, et se soustrait à la nécessité de précalculer les coordonnées de textures.

Après le calcul de l'irradiance en chaque point du maillage que nous allons voir dans la section suivante. Les irradiances estimées sont rastérisées sur les six faces du cube englobant l'objet, après projection de ce dernier (voir Fig. 2.1). Un pixel shader s'occupe de l'estimation des irradiances et de la projection sur le cube englobant. Six caméras regardant le centre de chaque face du cube sont utilisées dans le but de stocker le cubemap dans des textures. Le stockage de ces textures est assuré par des

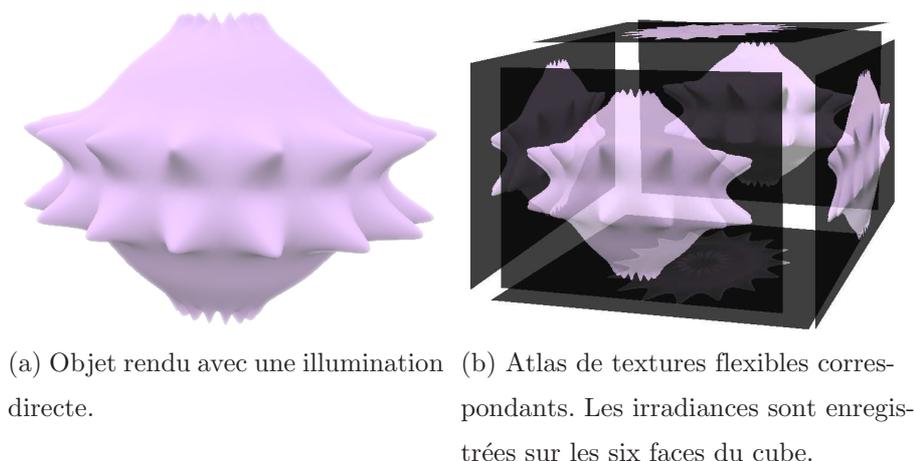


FIG. 2.1: Projection sur le cube englobant.

*rendus vers les textures*. Les rendus vers les textures (render to textures) sont une extension prévue par OpenGL, ils permettent la rasterisation des images envoyées par une caméra, sur une texture, au lieu de les afficher directement sur l'écran. Ce sont les rendus vers les textures qui nous garantissent la prise en compte de chaque changement, dans la géométrie des objets rendus.

La projection est effectuée de manière orthogonale, afin de simplifier la localisation de chaque point du maillage, sur le cube englobant. On peut donc imaginer une droite qui passe par le point projeté, et qui est perpendiculaire à la face sur laquelle il s'est projeté. Dans ce cas, les coordonnées de textures de chaque point correspondent aux coordonnées du texel qui se trouve à l'intersection de cette droite avec cette face (voir Fig. 2.2). Cette procédure d'adressage est à la fois simple et peu coûteuse, rendant la localisation de chaque point du maillage sur les faces du cubemap intuitive et rapide. Il est désormais possible de définir les coordonnées de textures de chaque point, de manière flexible et instantanée à chaque déformation que peuvent subir les objets.

### Calcul des irradiances

Cette partie détaille les différentes catégories d'illuminations que nous considérons. Les objets peuvent être éclairés à l'aide d'une ou plusieurs sources lumineuses ponctuelles, ou encore, avec une carte d'environnement.

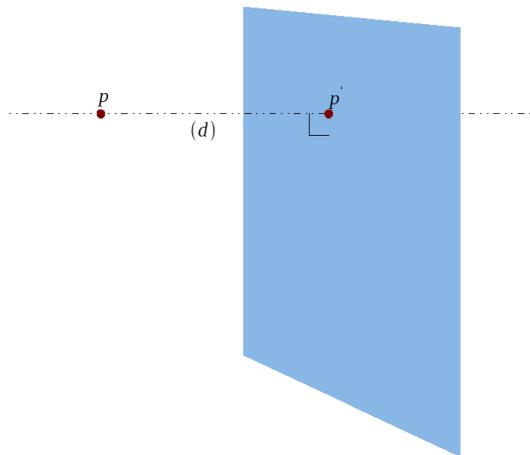


FIG. 2.2: Définition des coordonnées de textures : la droite  $d$  relie les points  $p$  et  $p'$  ; les coordonnées de textures correspondent aux coordonnées du point  $p'$  dans la face.

- **Objets illuminés avec une ou quelques sources lumineuses ponctuelles :**

Nous utilisons le modèle de Phong afin de calculer l'irradiance en provenance de chaque source ponctuelle. Le modèle de Phong nécessite la position et la normale de chaque point du maillage. Ces deux informations sont disponibles dans le pixel shader, qui s'occupe d'estimer ces irradiances. Le modèle de Phong est adapté aux cartes graphiques, puisque le pixel shader interpole automatiquement les normales et les positions en chaque pixel. Cette accommodation autorise un éclairage dynamique et temps-réel, même sous une dizaine de sources lumineuses.

- **Objets illuminés avec une carte d'environnement :**

Définir l'illumination de manière exhaustive, à partir d'une carte d'environnement, revient à parcourir tous les texels de la carte, et à estimer la part de radiance reçue pour chaque point de l'objet. La part de radiance reçue est déterminée par le *terme géométrique*, connu aussi sous le nom de *terme de cosinus*. Ce terme est défini par le cosinus de l'angle entre la normale de chaque point, et la direction vers chaque texel de la carte (direction de la lumière). Manifestement, une estimation exhaustive serait inadaptée pour toute application de rendu interactive. Le recours à des techniques de compression, telles que la projection sur des bases orthogonales, est indéniable.

Traditionnellement, dans une scène éclairée à l'aide de cartes d'environnement, les radiances incidentes sont précalculées après projection de l'illumination sur des bases de compression [Gre03]. L'estimation des coefficients issus de la projection sur des bases d'harmoniques sphériques se fait avant l'étape de rendu. Ceci entravait cruellement la déformation des objets, notamment dans le cas d'objets translucides.

Nous présentons une technique de compression à l'aide d'une base d'harmoniques sphériques, qui permet le calcul des irradiances, tout en modifiant la géométrie des objets. La technique, bien que basée sur certains précalculs, autorise la mise à jour des nouvelles valeurs des radiances d'entrée, à chaque changement géométrique.

La compression avec une base d'harmoniques sphériques permet de réduire l'intégration de l'équation 2.3, en un simple produit scalaire entre les vecteurs des coefficients issus des différentes fonctions projetées. Dans le cas de l'irradiance, trois fonctions doivent être projetées sur cette base : la fonction des intensités issues de la carte d'environnement, la fonction de la transmittance de Fresnel et le terme géométrique. Notre méthode est fondée sur la constatation que la fonction des intensités d'entrée  $L_e(x_e, \vec{\omega}_e)$ , et la transmittance de Fresnel  $F_t(\eta, \vec{\omega}_i)$  ne dépendent pas de la géométrie. Seul le terme de cosinus en dépend, cette dépendance est imposée par la présence de la normale. Ce constat permet de pré-calculer la projection de  $L_e(x_e, \vec{\omega}_e)$  et de  $F_t(\eta, \vec{\omega}_i)$ , sans que ceci n'empêche la déformation des objets.

La projection préalable des intensités d'entrée  $L_{face}(i, j)$  stockées dans la carte d'environnement est effectuée en additionnant toutes ces intensités, modulées par la base d'harmoniques sphériques  $Y_l^m(\vec{\omega}_e)$  et l'angle solide  $A(\omega_{i,j})$  sous-tendue par chaque texel :

$$L_{l,m} = \sum_{face} \sum_{i=1}^{taille_i} \sum_{j=1}^{taille_j} L_{face}(i, j) Y_l^m(\omega_{i,j}) A(\omega_{i,j}) \quad (2.4)$$

Dans l'équation 2.4,  $m$  correspond au nombre de coefficients retenu. La transmittance de Fresnel est projetée selon l'équation suivante :

$$F_{l,m} = \int_{\omega_{i,j}} F_t(\eta, \vec{\omega}_{i,j}) Y_l^m(\omega_{i,j}) \sin \omega_{i,j} d\omega_{i,j} \quad (2.5)$$

Les coefficients après projection de  $L_{face}(i, j)$  et de  $F_t(\eta, \vec{\omega}_i)$  sont stockés dans des textures, qui alimenteront par la suite le pixel shader, afin de reconstruire les irradiances.

Le terme cosinus dépend de la géométrie, et devrait idéalement être projeté à *la volée*, sur la carte graphique. Cependant, le processus de projection est difficilement parallélisable, et serait très lourd en temps de calculs. Nous contournons ce problème en se basant sur une autre constatation ; une même normale retourne toujours les mêmes valeurs des coefficients, issus de la projection. De plus, la plage de variation des normales est très limitée où, les coordonnées de la normale oscillent entre  $-1$  et  $1$ , et peuvent être interpolées en un nombre restreint. Nous proposons de précalculer les coefficients après projection, pour chaque valeur interpolée des normales, et les enregistrer dans  $m$  textures 3D. Les dimensions de ces textures volumiques correspondent aux nombres de normales interpolées, en  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

Une fois les différentes textures précalculées sont présentes dans le pixel shader, la reconstruction des irradiances peut commencer, elle sera effectuée selon la formule suivante :

$$E(x_e) = \sum_{l,m} G_{l,m}(\vec{n}_{x_e}) F_{l,m} L_{l,m} Y_{lm} \quad (2.6)$$

Les coefficients  $Y_{lm}$  sont obtenus après projection de la base d'harmoniques sphériques, et qui sont enregistrées à leur tour, dans une texture.

### 2.2.2 Estimation de la diffusion sous-surfacique

Dans la section précédente, nous avons expliqué les différentes techniques que nous proposons, dans le but de calculer les irradiances aux points de l'objet. Ces irradiances sont calculées dans une première paire de shaders, et sont stockées après projection sur des cubemaps, sous la forme de *rendus vers les textures*. Ces textures dynamiques sont par la suite envoyées vers la seconde paire de shaders, afin de lui fournir les différentes irradiances, utiles à l'estimation de la diffusion sous-surfacique.

C'est le pixel shader de la seconde paire de shaders qui s'occupe de déterminer les radiances de sortie, et est donc le responsable du rendu final. Pour chaque image rendue, ce shader reçoit le cubemap des irradiances, mis à jour à *la volée*. Lorsque le pixel shader est en train de traiter un pixel, il doit le localiser sur le cubemap, afin d'acquérir son irradiance ainsi que celles de son voisinage. En revanche, et dans un premier temps, il convient de détecter la face sur laquelle ce pixel (point) a été projeté, parmi les six faces du cube englobant.

Le choix de la face du cube se fait de la manière suivante : la normale du pixel à rendre définit un plan tangent à la surface du maillage (voir Fig. 2.3). La tangente plane divise l'espace en deux sous-espaces. Nous assumons que le pixel à rendre est projeté sur une des faces, dont au moins un sommet appartient au sous-espace supérieur. Seules ces faces sont susceptibles de contenir l'irradiance du pixel et celles de son voisinage. Pour chacune de ces faces, nous calculons le produit scalaire de sa normale et de la normale de chaque pixel à rendre. Les faces sont classées selon le produit scalaire qui leur est associé, du plus grand au plus petit. La face ayant le plus grand produit scalaire est sélectionnée. Le choix est porté sur cette face, puisque plus le produit scalaire est grand, plus la projection est fidèle.

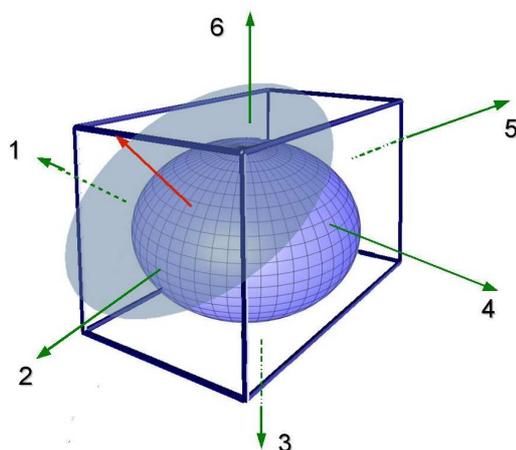


FIG. 2.3: Le plan tangent définit deux sous-espaces. Seules les faces 1,2,4,6 sont en interaction avec le sous-espace supérieur sont choisies.

L'estimation de la diffusion (multiple) est décomposée en deux parties [LGB<sup>+</sup>02] : la diffusion locale et la diffusion globale. Dans ce qui suit, nous détaillons les algorithmes qui servent au calcul de ces deux composantes.

### Calcul de la réponse locale

Cette partie concerne la résolution de l'équation 2.2, elle s'occupe de rassembler les contributions en énergie de tous les points de l'objet, et ce, pour chaque pixel du maillage. Cependant, les grandeurs qui concernent la propagation sous-surfacique chutent de manière exponentielle, et sont négligeables entre deux points distants. Pour cette raison, nous ne considérons que le voisinage immédiat pour chaque point rendu sur un maillage ; la couleur de ce point est calculée en accumulant les intensités

des points voisins après diffusion interne. Afin de calculer la radiance en un point de la surface, nous effectuons une convolution des irradiances de son voisinage (radiance incidentes) modulées avec le terme de dispersion. Cette convolution sera effectuée au moyen d'un filtrage bidimensionnel dans l'espace de textures.

À la différence de la plupart des récents moteurs de rendu translucide, nous proposons de calculer les irradiances dans le pixel shader. La radiance de chaque point du maillage est donnée par l'accumulation des irradiances du voisinage contribuant. Ces irradiances sont désormais dans le présent pixel shader, sous forme de textures. Les reflectances diffuses  $R_d(r)$  est évaluée directement sur le pixel shader, profitant de sa reformulation analytique, permise par le modèle du dipôle. La réflectance diffuse englobe tous les paramètres intrinsèquement liés aux matériaux.

La projection de la géométrie des objets sur un cube englobant réduit l'apparition de distorsions et d'auto-occlusions, par rapport à une projection sur un atlas de textures. Nonobstant cette projection, quelques problèmes de distorsions et d'auto-occlusions persistent. Nous proposons de traiter ces problèmes, dans les deux sous parties suivantes.

- **Gestion des auto-occlusions :**

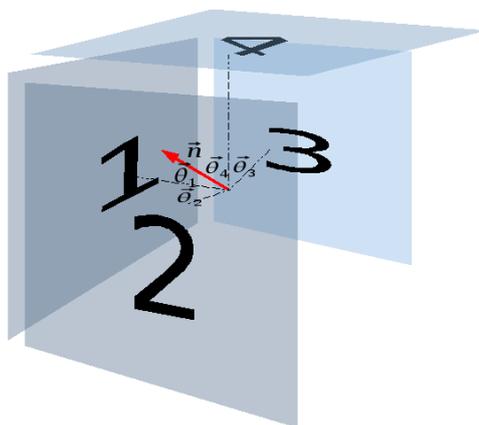


FIG. 2.4: Tri de faces : sur ce schéma  $\Theta_1 < \Theta_2 < \Theta_3 < \Theta_4$ .

Nous avons expliqué que les faces retenues sont classées en fonction des produits scalaires associés, du plus grand au plus petit, comme le montre la Fig. 2.4. Les auto-occlusions se produisent lorsqu'un point du maillage n'est pas visible sur la face sélectionnée, parmi les faces retenues. La Fig. 2.5 illustre ce cas. Si l'on veut trouver la face qui correspond au point M, la face préalablement sélectionnée serait

le point  $C'$ , or, le point  $C$  occulte  $M$ . En réalité, durant l'étape de création de l'ATF, nous enregistrons en parallèle dans les ATF, et pour chaque point du maillage, la somme de toutes les coordonnées de sa position et de sa normale. La somme est enregistrée dans le canal alpha de la texture, et sert à identifier de manière unique, chaque point de l'objet.

L'auto-occlusion est détectée en effectuant une comparaison entre l'identifiant réel et celui stocké dans la face sélectionnée. Si les valeurs ne sont pas identiques, on considère la face représentant le plus grand produit scalaire suivant. Le processus est répété itérativement, jusqu'à la sélection de la face adéquate.

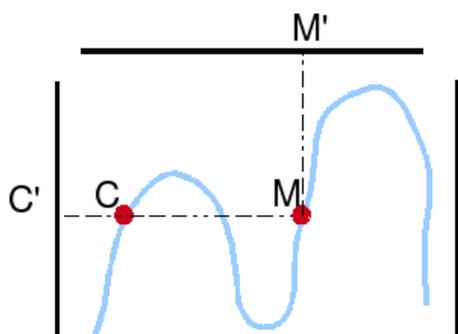


FIG. 2.5: Le point  $M$  est projeté sur la face du haut et celle de droite. Seule la face du dessus est sélectionnée.

- **Gestion des distorsions :**

La préparamétrisation des atlas de textures n'est pas une tâche triviale, et peut générer des distorsions dues à la projection d'une géométrie 3D, sur un espace planaire. La projection sur le cubemap englobant réduit significativement les distorsions, puisque la face sélectionnée représente l'inclinaison la plus faible par rapport à la surface projetée. Ainsi, chaque point et son voisinage se projettent de la manière la plus fidèle possible (voir Fig. 2.6).

Il peut arriver que le produit scalaire de la face sélectionné soit faible, dans le cas de la sélection d'une autre face, après l'apparition d'une auto-occlusion, par exemple. Dans [JB02] les auteurs montrent que la distance maximale qu'un photon traverse à l'intérieur d'un matériau est le libre parcours moyen  $l_d$  (*mean free path*) donné par  $l_d = 1/\sigma_t$ . Le libre parcours moyen correspond au rayon du noyau de

filtrage. Afin d'écartier les texels inutiles qui peuvent devenir proches, suite à une projection inclinée, lorsque la face sélectionnée a un petit produit scalaire associé, nous proposons d'utiliser un noyau de filtrage de taille adaptative. Au lieu de garder une taille fixe prédéfinie  $k_{max}$ , donnée par  $k_{max} = l_d$ , la taille du noyau sera obtenue en modulant la taille fixe par le produit scalaire associé  $k = sp.l_d$ . Ici, la taille du noyau est corrigée par le produit scalaire  $sp$  de chaque point.

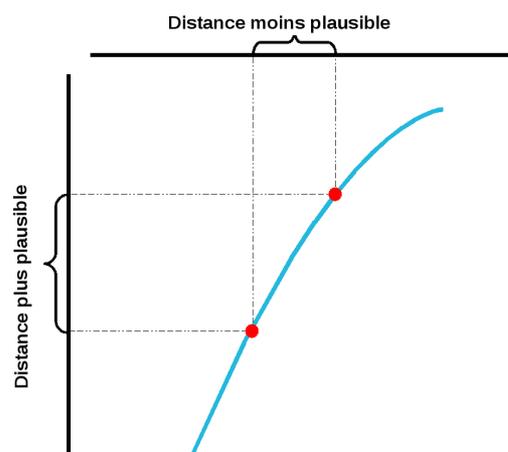


FIG. 2.6: Sur la face gauche, l'inclinaison de la surface est moins importante par rapport à la face du haut.

### Calcul de la réponse globale

Les points situés sur deux surfaces opposées d'une région fine du maillage, bien que proches, peuvent se retrouver projetés sur deux faces distinctes. La contribution des points de l'autre côté des régions fines doit être prise en compte. La Fig. 2.7 décrit ce cas. La contribution de la dispersion globale est moins importante que la dispersion locale. Cependant, la négliger tel que dans [HV04, MKB<sup>+</sup>03a] inhibe la perception de la profondeur, principalement pour les matériaux hautement translucides tels que la cire. Nous proposons une approximation de la dispersion globale qui ne nécessite aucun processus de convolution.

L'approximation du dipôle [JMLH01] remplace la source de lumière avec deux sources distinctes, une source réelle et une autre virtuelle non loin de la surface. Dans notre méthode, nous modifions la réflectance diffuse  $R_d$  due à la source dipôle et ce, en ne considérant que la source réelle. L'effet de la source virtuelle est annulé. La formule de la réflectance diffuse globale  $R_g$  sera donnée par :

$$R_g(x_l, x_s) = \frac{\alpha}{4\pi} [z_s(\sigma_{tr}d_{ls} + 1) \frac{e^{-\sigma_{tr}d_{ls}}}{d_{ls}^3}] \quad (2.7)$$

Où  $x_l$  est la position de la source. Ici,  $d_{ls}$  est la distance entre  $x_l$  et  $x_s$ . Nous considérons que pour le calcul de la réponse globale, la radiosité diffuse est estimée entre la source de lumière et chaque point à rendre  $x_s$ .

Pour estimer la radiosité  $B(x_s)$  un simple produit entre l'irradiance  $E(x_s)$  au point  $x_s$  et  $R_g$  est effectué :

$$B(x_s) = E(x_s)R_g(x_l, x_s) \quad (2.8)$$

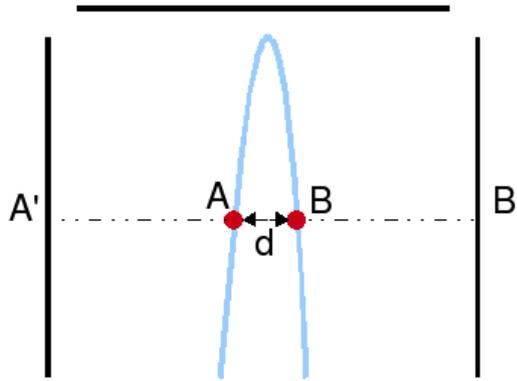


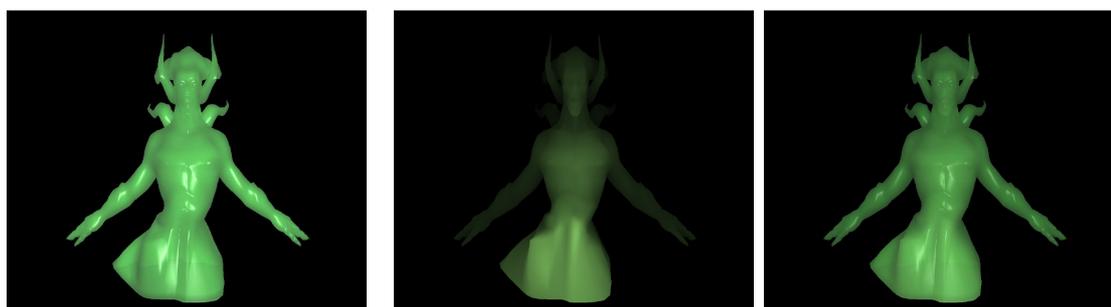
FIG. 2.7: Points proches projetés sur des positions éloignées. La distance  $d$  est assez petite pour considérer les points A et B comme proches.

Cette modification permet à chaque point de la surface, y compris ceux à l'ombre, de recevoir leur part de dispersion globale.

Pour le rendu final, les termes de la dispersion locale et globale sont additionnés, comme décrit sur la Fig. 2.8.

### 2.2.3 Déformabilité

Le précalcul des atlas de textures présente un obstacle quant à la déformation en temps réel des objets translucides. Dans notre méthode, la projection de la géométrie sur le cube englobant est effectuée sur GPU afin de permettre la détection du moindre déplacement des points du maillage, et ce, *à la volée*. Les irradiances sont stockées



(a) Résultat obtenu avec le seul calcul de réponse locale. (b) Résultat obtenu avec le seul calcul de réponse globale. (c) Résultat final après addition des réponses locale et globale.

FIG. 2.8: Objet translucide en jade éclairé par-devant. Le résultat final est illustré sur l'image de droite. On peut remarquer que la profondeur de l'objet est plus perceptible, après introduction de la réponse globale.

dans des cubemaps et sont mises à jour à chaque image. Une fois le cubemap créé, il est envoyé au pixel shader final, où ce dernier s'occupe de l'accumulation des irradiances dans le but de calculer la radiance de sortie, après modulation par la réflectance diffuse. Il est vrai que le calcul de la dispersion sous-surfacique selon notre méthode nécessite plusieurs accès. Toutefois, le Fragment Texture Fetch (FTF) s'occupera de l'accélération de ces accès.

Pour chaque déplacement des sommets, les nouvelles valeurs des irradiances sont instantanément stockées dans le cubemap. Sur les figures 2.9a et 2.9c, un objet est rendu avec un éclairage direct, avant et après déformation. Nous pouvons constater que les cubemaps correspondants enregistrent automatiquement les nouvelles irradiances (voir Fig. 2.9b et 2.9d). Ce mécanisme garantit la conservation de l'information de translucidité durant la déformation des géométries.

## 2.2.4 Implémentation

Pour l'implémentation de notre algorithme, nous avons utilisé le moteur de rendu OGRE3D, tout en exploitant les récentes extensions apportées par les nouvelles générations de GPUs, à savoir les pixel et vertex shaders. Dans notre travail, les parties de simulation et de rendu se confondent, puisque la majorité des calculs sont portés sur carte graphique, qui s'occupe à la fois de la création des ATFs, de

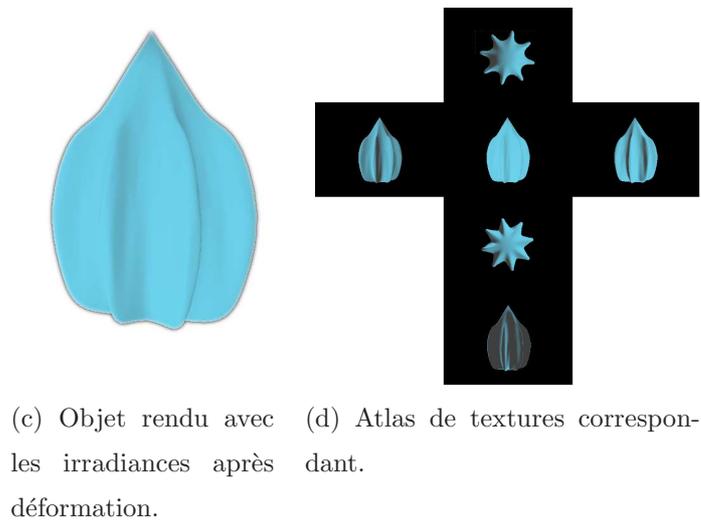
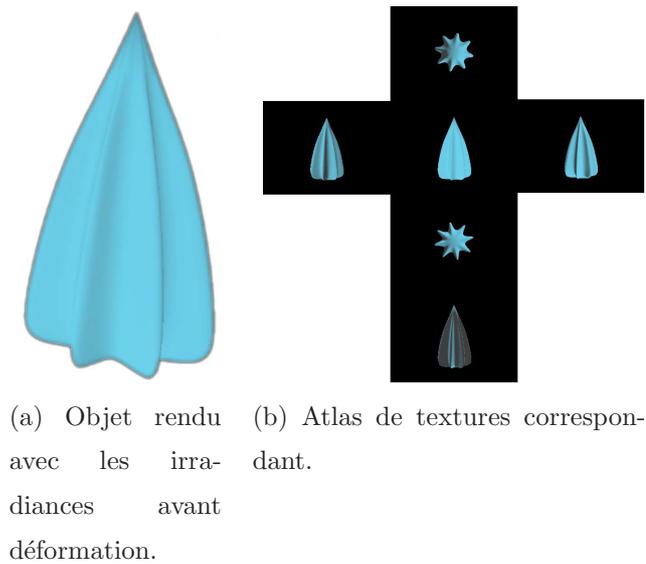


FIG. 2.9: Illustration de la mise à jour des cartes d'irradiances, lors de la déformation des objets.

l'estimation de la réflectance diffuse ainsi que la définition des couleurs des objets translucides. De ce fait, le moteur de rendu OGRE3D nous assiste comme un simple appoint de gestion des interactions avec les objets et de leurs positionnements, de la déclaration des différentes textures nécessaires à nos calculs, puis et principalement comme un outil de communication avec les cartes graphiques. Ce moteur que l'on peut définir comme une sur-couche de la librairie OpenGL, fournit un grand nombre de méthodes, à même de proposer des fonctionnalités évoluées et puissantes pour tout développement graphique. Notre méthode a été implémentée en concordance

avec le langage de programmation des processeurs graphiques Cg, développé par NVidia, où la norme *Shader Model 3.0* est requise.

La taille maximale prédéfinie du noyau de filtrage représente l'un des facteurs majeurs, agissant directement sur le nombre d'images par seconde de l'exécution de notre moteur de rendu. La taille prédéfinie du noyau de filtrage est calculée à partir du coefficient d'extinction  $\sigma_t$ , tel que nous l'avons expliqué dans la section réservée à l'estimation de la réponse locale. En effet, la taille du noyau est obtenue après multiplication des dimensions des textures représentant les faces du cube par l'inverse du coefficient d'extinction de la lumière. L'inverse de ce coefficient décrit le libre parcours moyen des photons à l'intérieur des matériaux translucides. Il est donc impératif de déterminer la taille du noyau maximale exacte, avant de procéder à la phase de l'accumulation. Ceci évitera la prise en compte de la contribution nulle de certains points du voisinage, dans le cas du choix d'une taille d'un noyau de filtrage trop grande, et par conséquent, des pertes inutiles des performances d'exécution.

Nous avons estimé la taille maximale du noyau de filtrage correspondant à un matériau quelconque, qui est égale à 5x5. Nous avons par la suite effectué des traitements d'images obtenues avec des noyaux de filtrage de tailles différentes, afin de confirmer l'idée expliquée dans le paragraphe précédent. Jensen démontre dans [FJH04] que plus l'objet est translucide, plus les images de cet objet entraînent une uniformité dans la distribution des intensités.

Dans la Fig. 2.10, un objet translucide est présenté avec différentes tailles maximales du noyau de filtrage appliquées, ainsi que les histogrammes associés. Nous pouvons remarquer que la distribution des intensités reste inchangée à partir de la taille 5x5.

Le travail présenté dans ce chapitre, avec ses différentes techniques et méthodes, peut être schématisé à l'aide de la figure 2.11. Sur ce schéma, les étapes principales du travail présenté dans ce chapitre sont classées et attribuées aux modules de calculs correspondants.

## 2.3 Résultats

Dans cette partie, nous exposons différents résultats, d'abord en temps d'exécution puis en images. La table 2.1 apporte une idée sur les performances de notre

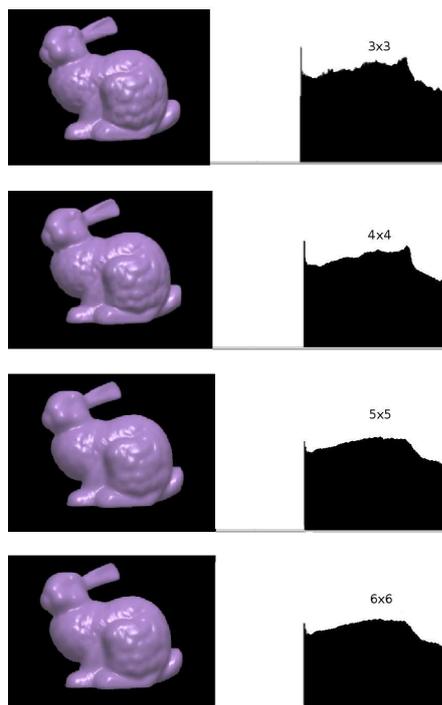


FIG. 2.10: De haut en bas, un objet translucide avec des tailles de noyau de 3x3, 4x4, 5x5, 6x6. Les deux dernières images possèdent le même histogramme d'intensités.

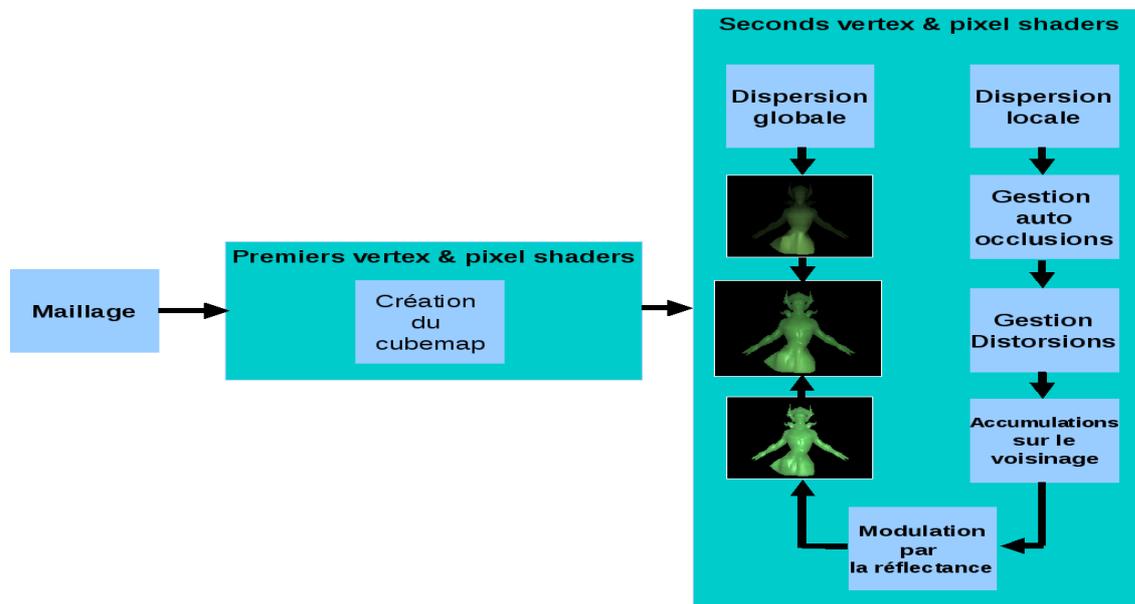


FIG. 2.11: Vue d'ensemble des techniques proposées.

implémentation du rendu sous-surfacique. Les nombres d'images par seconde présentés sont obtenus sur un AMD Athlon 64 X2 Dual Core avec 2.2 GHZ muni d'une carte graphique NVidia GeForce 7900 GTX.

Modèle	Triangles	FPS avec déformation	FPS sans déformation
Hand	7700	72	120
NVidiaDemon	48174	49	81
Bunny	72223	43	71
Neptune	227220	25	41
Buddha	381500	22	28

TAB. 2.1: Cette table liste le nombre d’images par seconde, le nombre de triangles de chaque modèle, sur des maillages déformables et non déformables.

Les temps d’exécution de notre moteur de rendu communiqués ci-dessus ont été obtenus pour une fenêtre d’affichage de 1152\*864. On remarque facilement que les techniques de simulation proposées opèrent rapidement, et affichent des temps de calculs temps-réel. Les résultats annoncés ont été récupérés, et pour chaque modèle, sans et avec application de déformations. Ceci est vrai même pour un maillage contenant un grand nombre de triangles (381500 triangles pour le Buddha).

La figure 2.12 montre une bougie en cire éclairée par sa flamme. La cire disperse la lumière dans tous les sens, saturant rapidement le matériau.

Afin de souligner la sensibilité de notre méthode quant aux petits déplacements du maillage, nous avons testé notre moteur de rendu sur des lithophanies (voir Fig. 2.13). Ces objets à l’esthétique agréable sont construits en déplaçant les sommets d’une sphère au moyen d’une texture contenant l’image à graver sur la surface. Nous pouvons voir que les régions fines de ces objets paraissent plus claires que les zones épaisses.

Pour tester notre méthode en présence de déformations, nous avons implémenté un morphing entre un maillage et la sphère englobante. Dans la figure 2.14, le Buddha de Stanford en jade est déformé, on peut remarquer que les régions fines semblent toujours plus éclairées que les régions épaisses, tout au long de la déformation. Nous avons aussi testé notre méthode sur des matériaux faiblement translucides tels que la porcelaine, en introduisant les coefficients d’absorption et de diffusion correspondant à ce matériau. Dans la figure 2.15, 3 images d’une séquence de morphing d’un objet en porcelaine sont présentées.



FIG. 2.12: Bougie en cire.



FIG. 2.13: Lithophanie : Les zones fines sont plus saturées en lumière qu'ailleurs dans l'objet.

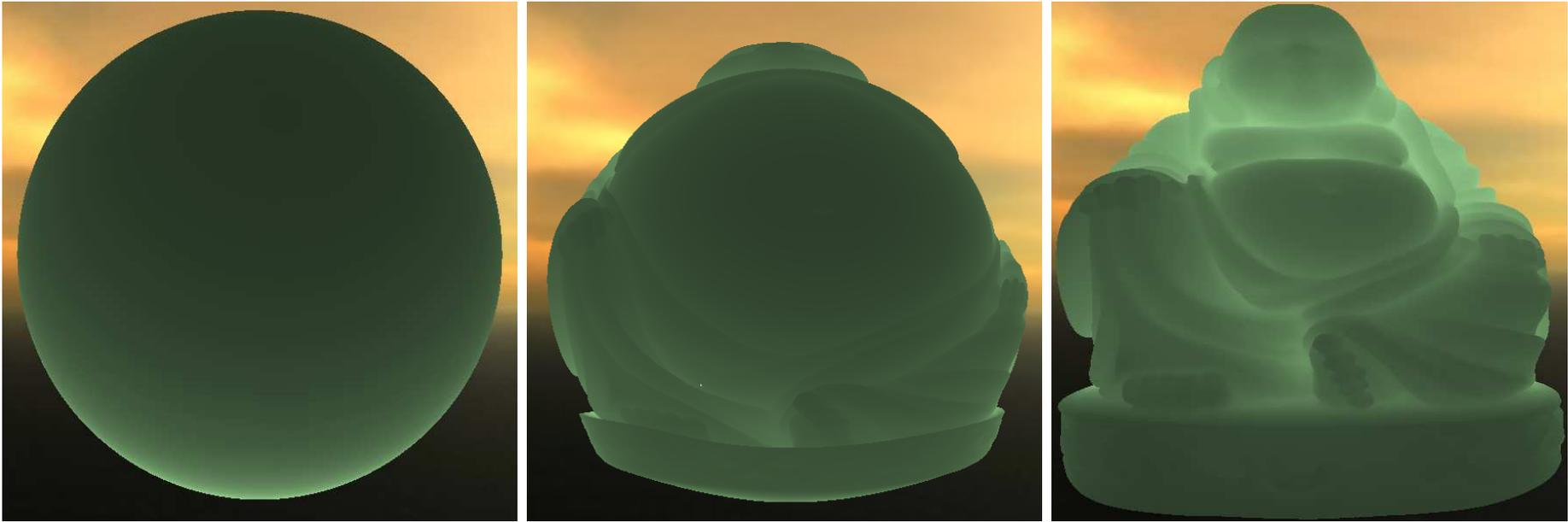


FIG. 2.14: Morphing d'un Buddha en jade, éclairé par-derrière avec une source lumineuse ponctuelle.



FIG. 2.15: Morphing d'un Buddha en porcelaine, éclairé à l'aide d'une carte d'environnement.

## 2.4 Discussion et travaux futurs

Nous avons présenté une méthode efficace qui s'exécute en temps-réel pour le rendu déformable d'objets translucides. Elle est basée sur l'approximation à l'aide du dipôle qui permet de proposer une solution analytique et élégante à l'équation de la diffusion. Le rendu est interactif et autorise l'éclairage dynamique. La technique permet alors de modifier la géométrie des objets tout en respectant la cohérence de leur translucidité. Notre méthode permet de changer interactivement les coefficients d'absorption et de diffusion, ce qui pourrait être utile pour un utilisateur, en lui donnant la possibilité de régler ces paramètres optiques jusqu'à ce qu'il atteigne l'aspect désiré.

Aucune phase de précalculs n'est nécessaire, ce qui laisse le choix à un large panel d'applications du rendu translucide, accélérant ainsi l'exécution des algorithmes implémentés.

La solution que nous avons apportée pour accéder à l'information du voisinage échoue pour certaines topologies très concaves et trouées. Cependant, même si notre algorithme ne peut calculer la dispersion locale des endroits enfouis et cachés, on peut négliger leur contribution, puisqu'ils sont invisibles depuis la source de lumière.

Dans le futur, nous souhaitons améliorer notre moteur de rendu translucide en résolvant numériquement l'équation de diffusion. Une telle résolution permet de traiter le phénomène du transport interne de la lumière, sans se préoccuper des problèmes de visibilité.



---

## Chapitre 3

# Rendu temps-réel d'objets en porcelaine

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>3.2</b>	<b>Phénoménologie de la diffusion . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>3.3</b>	<b>Acquisition des spectres de réponse et estimation des propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail . . . . .</b>	<b>81</b>
3.3.1	Mesure de la réflectance et de la transmittance . . . . .	81
3.3.2	Estimation des propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail . . . . .	84
<b>3.4</b>	<b>Algorithmes et rendu final . . . . .</b>	<b>87</b>
3.4.1	Voxelisation des maillages polygonaux . . . . .	88
3.4.2	Calcul de l'épaisseur . . . . .	89
3.4.3	Caclul de la BRDF et rendu final . . . . .	90
<b>3.5</b>	<b>Résultats . . . . .</b>	<b>91</b>
3.5.1	Résumé de l'ensemble des méthodes et techniques . . . . .	91
3.5.2	Performances . . . . .	92
3.5.3	Rendu d'objets en porcelaine émaillée et matériaux translucides hétérogènes . . . . .	93
<b>3.6</b>	<b>Discussion et travaux futurs . . . . .</b>	<b>97</b>

---

### 3.1 Introduction

La ville de Limoges doit sa notoriété à l'industrie porcelainière, qui s'est développée au point que la cité évoque instantanément l'art de la porcelaine. Cette réputation remonte à l'année 1768, date à laquelle, un gisement exploitable de Kaolin a été découvert à la petite localité de Saint-Yrieix-La-Perche, située à une quarantaine de kilomètres de Limoges. Le Kaolin est une argile blanche, et constitue le matériau principal pour la fabrication de la porcelaine. Cette argile, et grâce à l'alchimie du feu, permet d'obtenir une matière blanche, brillante, sonore, dure et surtout translucide. C'est dans le cadre de nos recherches sur la propriété de translucidité des matériaux à l'Université de Limoges, que nous avons jugé opportun de consacrer une partie de nos travaux, sur ces objets à l'esthétique radieuse qui décorent les commerces de la Ville. Le travail de certains artistes, usant d'outils propres à l'industrie, nous renforce dans l'idée de la nécessité de bâtir des modèles physiques d'interaction lumière-porcelaine. La composition de la surface participe également à l'apparence visuelle des objets en céramique, et l'artiste n'hésite pas à s'attarder sur les finitions qui peuvent produire des sensations optiques dues à l'émaillage, le vernissage et la pose de décalcomanies.

Ce chapitre vise à introduire un modèle de rendu d'objets en porcelaine, en présence d'une couche d'émail. Le modèle de rendu que nous présentons s'adapte facilement aux changements spatiaux des propriétés optiques, un phénomène qui caractérise les matériaux hétérogènes. Ceci autorise le modèle à gérer la pose de décalcomanies, constituées de matières non organiques et translucides.

La translucidité et l'éclat sont des attributs importants dans la définition des propriétés visuelles de la porcelaine. Les caractéristiques optiques dépendent de l'endroit de la production de la porcelaine, et sont influencées par la qualité et la quantité des composantes chimiques entrant dans le processus de sa fabrication. La porcelaine limougeaude est obtenue après la fusion d'une argile composée de Kaolin, de Feldspath et de Quartz. Par la suite, le résultat est éventuellement verni à l'aide de l'émail qui n'est autre qu'une poudre constituée de Silice, de Kaolin et d'oxydes métalliques.

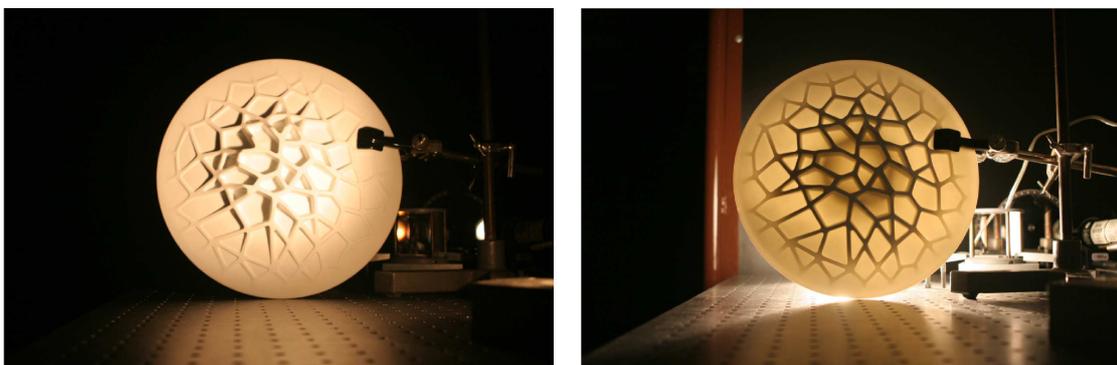
Afin de souligner les propriétés de diffusion et de translucidité de la porcelaine, nous avons pris des photos d'une assiette en porcelaine avec un côté en nervures, sous des éclairages par-devant et par-derrière (voir FIG 3.1 et 3.2).



(a) Avec un éclairage par-devant.

(b) Avec un éclairage par-derrière.

FIG. 3.1: Photos prises du côté plat d'une assiette en porcelaine.



(a) Avec un éclairage par-devant.

(b) Avec un éclairage par-derrière.

FIG. 3.2: Photos prises du côté en nervures d'une assiette en porcelaine.

Le modèle de rendu que nous proposons est paramétrable et basé sur la théorie de Kubelka-Munk. Cette théorie se définit comme étant la modélisation la mieux adaptée, de l'interaction de la lumière avec des objets en céramique (voir Chapitre 1). Le modèle accorde à son utilisateur la possibilité de modifier et de manière interactive, les propriétés optiques des matériaux, et ce, même localement (hétérogénéité), ainsi que les conditions d'illumination. Le moteur de rendu basé sur la théorie de Kubelka-Munk peut fournir un outil de visualisation pour les ingénieurs en céramique, et les prothésistes dentaires. En effet, tel que nous l'avons évoqué dans la partie consacrée

à l'état de l'art, la porcelaine a largement été exploitée par les prothésistes dentaires, à cause de la proximité visuelle et optique qui existe entre la porcelaine et les dents. Les prothésistes dentaires s'intéressent à reproduire l'éclat et la translucidité des dents, en utilisant des couronnes et des plaques dentaires constituées de porcelaine modifiée. Le moteur peut être aussi d'une grande utilité aux industriels de la porcelaine, où il peut servir à prédire l'aspect des produits, avant même leur fabrication. L'artiste porcelainier peut alors apprécier ses créations, en les décorant virtuellement à l'aide de décalcomanies enregistrées dans des textures.

La théorie de Kubelka-Munk décrit également l'absorption et la diffusion de la lumière des milieux translucides multicouches. Elle intègre alors un autre aspect des méthodes de rendu translucide, et nous permet de prendre en compte les deux couches constituant les objets en porcelaine émaillée.

Le caractère local de la théorie de Kubelka-Munk facilite la portabilité des calculs sur GPU. Le modèle s'adapte parfaitement au parallélisme exigé pour toute implémentation matérielle, en fournissant une plateforme idéale pour une accélération du calcul des équations du modèle. En définitive, le modèle de rendu d'objets translucides que nous allons décrire dans les prochaines sections, réunit plusieurs aspects à la fois : l'interactivité, l'hétérogénéité et la prise en compte des matériaux en multicouches.

## 3.2 Phénoménologie de la diffusion

Plusieurs modèles décrivent avec succès de manière phénoménologique, la diffusion volumique et la transmission de la lumière dans des milieux translucides. Les plus répandus d'entre eux sont ceux de Melamed [Mel63] pour les milieux semi-poudreux et Kubelka-Munk [KM31] ou théorie des deux flux. Ces deux modèles ont largement été appliqués en milieu industriel. Historiquement, les auteurs de la théorie de Kubelka-Munk cherchaient un moyen de prédire la luminance d'un revêtement blanc, couvrant une surface plane avec un coefficient de réflexion quelconque. Le raisonnement peut s'appliquer par extension, à chaque longueur d'onde de la lumière, et le résultat s'étend aisément au spectre visible et donc aux couleurs.

Un modèle phénoménologique fournit une expression explicite de la BRDF. Il s'agit d'une fonction mathématique dépendant d'un ou plusieurs paramètres. Ces

paramètres peuvent être fixés arbitrairement (approche directe ou empirique), mais sont généralement évalués sur un jeu de mesures (approche inverse). On peut aussi parler pour ces modèles, d'une approche analytique au sens mathématique du terme, puisqu'ils fournissent au final, une solution de la BRDF. L'approche inverse sur ces modèles révèle une idée intéressante. Il est en effet possible de les utiliser, non pas pour prédire une BRDF en fonction de leurs paramètres physiques, mais plutôt pour déduire ceux-ci grâce à une mesure de la BRDF.

### 3.3 Acquisition des spectres de réponse et estimation des propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail

La manipulation de la théorie de Kubelka-Munk de manière inverse, permet de dégager les coefficients d'absorption et de diffusion des matériaux. Dans ce cas, les propriétés optiques sont estimées à partir des spectres de la réflectance et de la transmittance d'un échantillon posé sur un substrat de réflectance précalculée. En effet, la théorie des deux flux permet de calculer le rapport entre le coefficient d'absorption et celui de la diffusion (voir Eq. 3.8 dans l'annexe) d'un échantillon d'une épaisseur connue. Les valeurs des propriétés optiques peuvent alors être déduites.

#### 3.3.1 Mesure de la réflectance et de la transmittance

Nous avons effectué le processus d'acquisition de la réflectance et de la transmittance, en étroite collaboration avec l'équipe *fibres optiques de nouvelle génération* du département de photonique au laboratoire XLIM. L'équipe nous a fourni une assistance technique complète sur les différentes méthodes de calibration et précautions à prendre en considération, durant toutes les étapes de mesures. L'appareillage utilisé est constitué d'un goniomètre et d'un spectromètre. Le goniomètre possède trois moteurs rotatifs commandés et synchronisés par un contrôleur, les moteurs sont attribués aux éléments suivants :

- Une source lumineuse halogène à fibre optique qui éclaire l'échantillon.
- Un capteur de la réflectance branché sur son autre extrémité à un spectromètre *USB2000*, de marque *Ocean Optics*. Cet outil de mesure miniature fibré

dispose d'une gamme spectrale variant entre 300 et 1000nm. L'acquisition de la transmittance est réalisée en plaçant le capteur au-dessous de l'échantillon.

- Un plateau sur lequel l'échantillon à analyser doit être fixé.

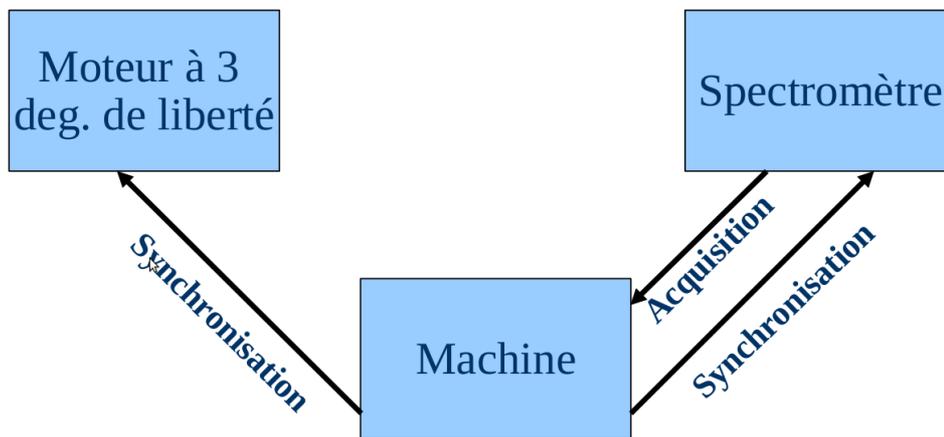


FIG. 3.3: Schéma explicatif des différents modules composant le goniospectromètre, et les interactions qui les relient.

Les différentes interactions entre les composantes de l'appareillage sont décrites dans la Fig. 3.3.1. Chacun des trois moteurs est capable de balayer  $180^\circ$ , assurant une couverture complète de l'hémisphère supérieur à l'échantillon. Le contrôleur des moteurs et le spectromètre sont reliés à un ordinateur. Ce dernier s'occupe de l'asservissement des moteurs en envoyant des signaux de commandes au contrôleur, et la synchronisation avec l'acquisition du spectre pour chaque configuration angulaire des moteurs. La figure 3.3.1 décrit le dispositif que nous avons utilisé avec toutes ses composantes.

Nous avons procédé à six manipulations spectrales qui visaient à estimer la réponse lumineuse, en réflexion et en transmission pour trois types d'échantillons différents. Les radiances en sortie en réflexion et en transmission vont servir à calculer respectivement la réflectance  $R(X)$  et la transmittance  $T(X)$ , après avoir effectué un rapport sur le flux d'entrée. Dans les deux premières manipulations, nous nous sommes focalisés sur l'estimation de la réflectance de la porcelaine, puis de l'émail. Bien évidemment, nous avons placé ces deux échantillons sur un substrat constitué d'un réflechisseur idéal avec une réflectance connue, approchant les 100%. Deux

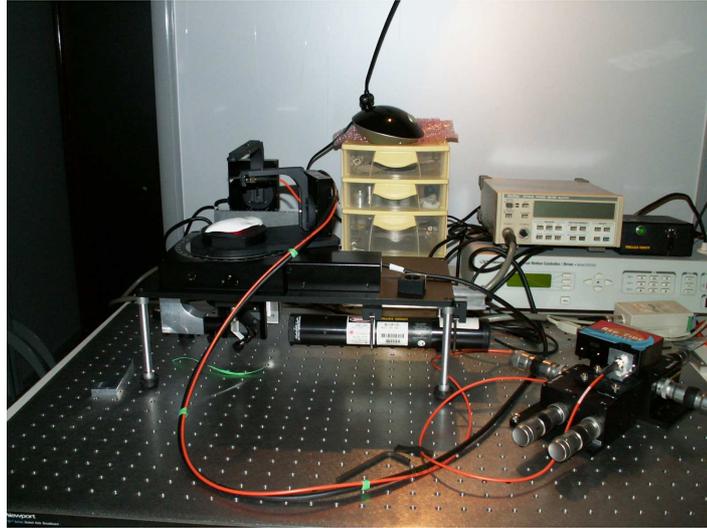


FIG. 3.4: Photo prise du dispositif d'acquisition de la réflectance et de la transmittance.

autres manipulations concernent la capture de la radiance de sortie dans le but de calculer la transmittance de la porcelaine, puis de l'émail. Les échantillons de porcelaine et d'émail sont placés sur le plateau, ce dernier dispose d'une fente permettant de faire passer un faisceau lumineux à travers les matériaux, et le récupérer par-dessous. Dans le cas de la mesure de la transmittance, aucun substrat n'est placé au contact des échantillons, afin de ne pas obstruer la transmission de la lumière. En effet, conformément à la théorie de Kubelka-Munk, l'estimation de la transmittance n'est aucunement nécessaire au calcul des propriétés optiques (voir Eq. 3.9 et 3.10 dans l'annexe). Les données qui représentent la transmittance sont uniquement calculées à titre expérimental, et surtout comparatif. Les deux dernières manipulations tentent de mesurer la réflectance des échantillons de porcelaine et d'émail d'une épaisseur importante (1 cm dans notre expérience). La réflectance du matériau optiquement épais  $R_\infty$  est une donnée impliquée dans le calcul des propriétés optiques, dans le cadre de l'utilisation de la théorie des deux flux (voir annexe).

Les données spectrales issues des quatre premières manipulations révèlent des informations qui confirment les nombreuses théories des ondes. La Figure 3.5 décrit la réflectance calculée et enregistrée des échantillons de porcelaine et d'émail. La réflectance de l'émail est plus importante que celle de la porcelaine, ce qui est en cohérence avec l'aspect brillant et réfléchissant de l'émail. La transmittance estimée

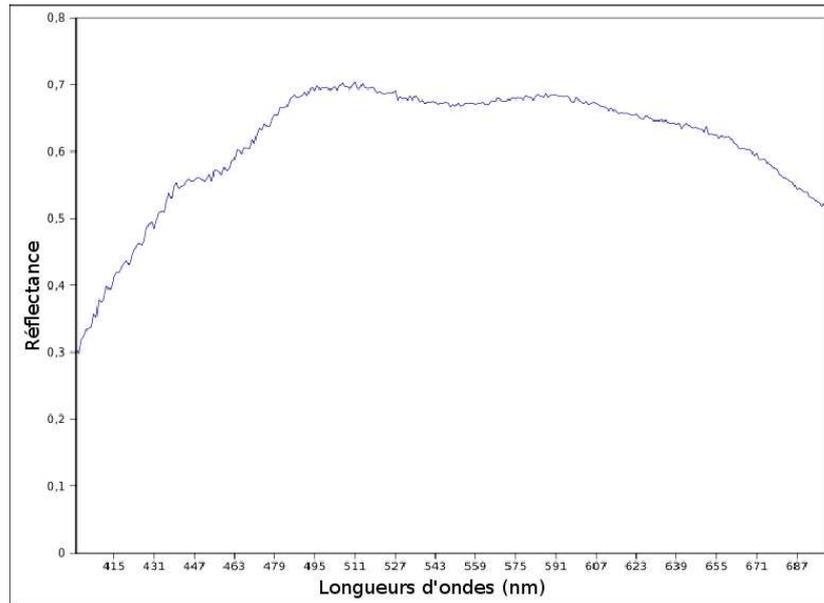
des deux échantillons (voir Fig. 3.6) croît dans le sens de la croissance des longueurs d'onde. Cependant, la transmittance de la porcelaine croît plus rapidement que celle de l'émail, et ses valeurs restent supérieures à celles de ce dernier. Cette constatation s'explique par la part importante du flux incident ayant quitté la surface de l'émail, sans jamais y pénétrer. La quantité des transmittances observées est de l'ordre de 1% et reste donc faible, et ce, pour l'épaisseur des échantillons utilisés. En effet, les études spectrales que nous avons effectuées ne permettent de mesurer que les transmittances directes ou simples, bien moins importantes que les transmittances après dispersion multiple. Un dispositif bien plus élaboré aurait été nécessaire, pour l'acquisition de telles transmittances.

### 3.3.2 Estimation des propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail

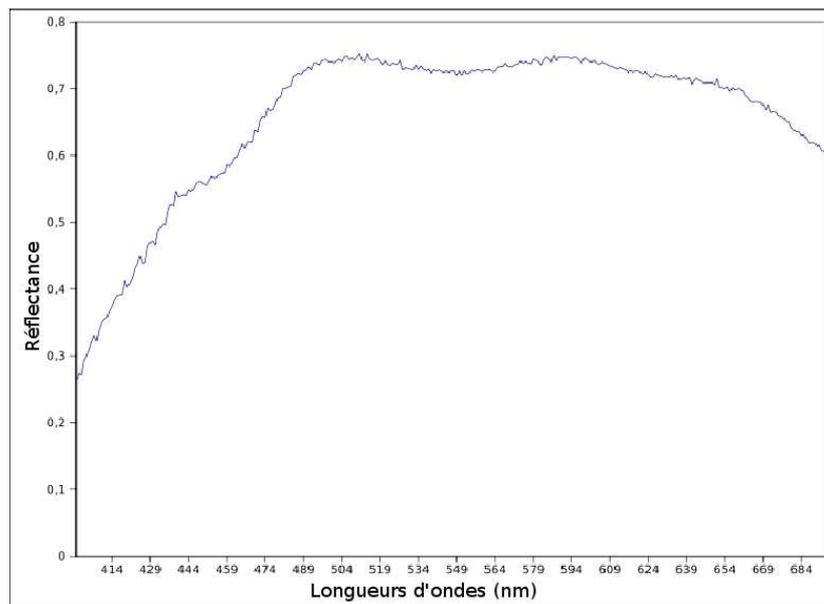
Nous appliquons la théorie de Kubelka-Munk afin d'obtenir les coefficients de diffusion  $S$  et d'absorption  $K$  de la porcelaine et de l'émail. Ce calcul nécessite principalement les données relatives à la réflectance générée par les processus de mesures. De plus, et conformément aux équations 3.9 et 3.10, nous avons besoin des réflectances mesurées sur des échantillons optiquement épais, ainsi que de leurs épaisseurs.

Nous savons que les spectromètres dressent de larges spectres des radiances acquises, et que dans le contexte du rendu assisté par ordinateur, nous nous intéressons qu'au spectre visible, délimité par les longueurs d'onde  $400nm$  et  $700nm$ . Nous adoptons le système colorimétrique  $RVB$ , et nous ne retenons que les amplitudes correspondant aux longueurs d'onde du bleu, du vert et du rouge, soient respectivement aux longueurs d'onde  $470nm$ ,  $530nm$  et  $650nm$ . Afin de réduire l'impact d'éventuelles erreurs de mesures, et d'accentuer l'exactitude des calculs, nous effectuons une moyenne des réflectances autour des longueurs d'onde concernées, lors des calculs des propriétés optiques. Nous choisissons donc, et pour chacune des longueurs d'onde correspondant au bleu, au vert et au rouge, d'effectuer des moyennes des réflectances à  $\pm 10nm$ .

Nous résumons dans le tableau 3.1 les propriétés optiques de la porcelaine et de l'émail obtenues. Les données sont en accord avec la théorie de Rayleigh, stipulant



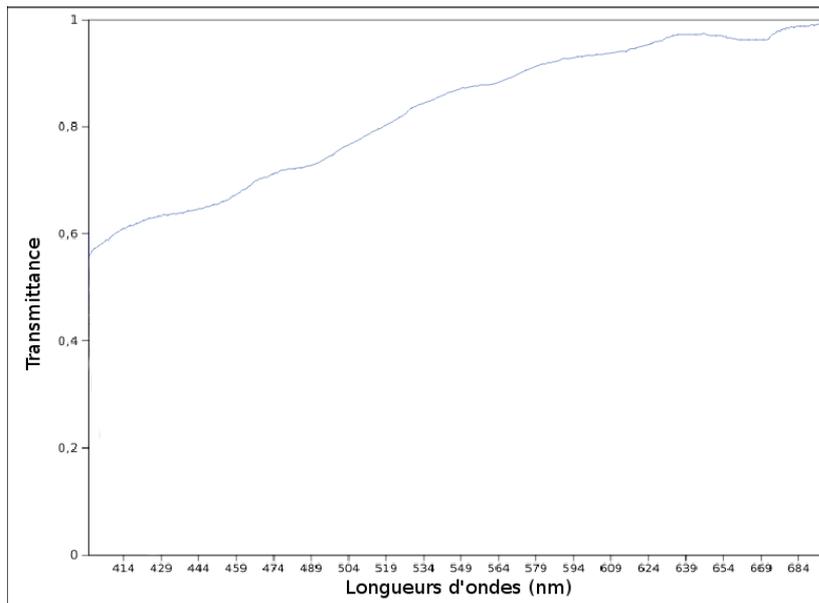
(a) Spectre en réflexion de la porcelaine.



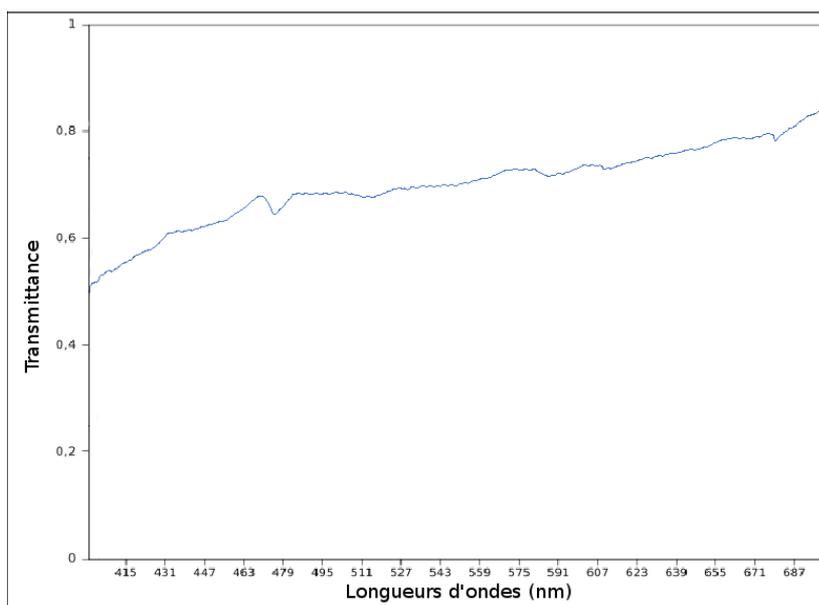
(b) Spectre en réflexion de l'émail.

FIG. 3.5: Courbes représentant la réflectance de la porcelaine et de l'émail.

que la diffusion est plus importante aux longueurs d'onde les plus faibles, lorsque les particules diffusantes du matériau sont de petites tailles. La répartition des coefficients de diffusion de la porcelaine corrobore les postulats de la théorie de Rayleigh. Les molécules de la porcelaine sont de tailles négligeables par rapport aux longueurs d'onde, ainsi, la diffusion est plus importante vers les fréquences spectrales les plus



(a) Spectre en transmission de la porcelaine.



(b) Spectre en transmission de l'émail.

FIG. 3.6: Courbes représentant la transmittance de la porcelaine et de l'émail.

élevées du spectre visible. L'émail est un matériau vitreux constitué de molécules de dimensions plus amples, et les conclusions de Rayleigh ne peuvent pas expliquer son comportement diffus. En revanche, les matériaux vitreux réfléchissent la lumière en respectant les proportions de sa distribution spectrale. Il devient évident que la diffusion de la lumière aux longueurs d'onde correspondant aux tons jaune-vert

	Coefficient d'absorption ( $mm^{-1}$ )	Coefficient de diffusion ( $mm^{-1}$ )
Émail	$K = \{2.4, 2.9, 2.6\}$	$S = \{20.1, 23.3, 19.6\}$
Porcelaine	$K = \{0.12, 0.14, 0.17\}$	$S = \{4.7, 4.3, 3.8\}$

TAB. 3.1: Résumé des coefficients optiques calculés de l'émail et de la porcelaine. Les coefficients sont donnés aux longueurs d'onde  $470nm$ ,  $530nm$  et  $650nm$

est plus importante qu'ailleurs dans le spectre visible, puisque les lampes halogènes émettent plus de photons vers ces tons.

Pour une épaisseur donnée, la théorie de Kubelka-Munk nous autorise à calculer de la réflectance et de la transmittance de la porcelaine et de l'émail, à partir des propriétés optiques estimées précédemment. Elle permet également d'estimer la réflectance et la transmittance de matériaux disposant de plusieurs couches translucides superposées, connaissant  $R(X)$  et  $T(X)$  de chaque couche. Nous exploitons ces possibilités dans le but de prédire la couleur de la porcelaine vitrifiée par l'émail.

### 3.4 Algorithmes et rendu final

Les propriétés optiques calculées peuvent servir à prédire avec efficacité la couleur de matériaux constitués de porcelaine émaillée, de n'importe quelles épaisseurs. La théorie de Kubelka-Munk révèle un autre trait de sa puissance lorsqu'elle permet de déterminer la couleur d'objets en porcelaine émaillée, où une couche fine d'émail est déposée sur la surface des objets en porcelaine.

Le moteur de rendu d'objets en porcelaine émaillée que nous proposons est entièrement implémenté sur cartes graphiques. Le degré élevé de programmabilité au niveau du pixel offert par ces super-processeurs, nous a facilité le port de nos algorithmes sur le GPU. L'estimation de la radiance de sortie est effectuée en deux étapes, une phase de précalculs qui s'occupe de la voxélisation des objets et une phase de rendu qui s'exécute *à la volée* sur carte graphique. Le but de la première étape est de fournir une texture volumique contenant la géométrie de l'objet. Dans la seconde étape, et dans un pixel shader, nous procédons au rendu final, après calcul des épaisseurs en chaque point, des radiances d'entrée et des réflectances et transmittances nécessaires.

### 3.4.1 Voxelisation des maillages polygonaux

Dans une phase de précalculs peu coûteuse en temps de calculs, la surface des objets est discrétisée puis stockée dans une texture 3D. La texture tridimensionnelle servira dans un second temps, à calculer la profondeur de l'objet en chaque point. La technique que nous proposons est relativement simple, et permet de gérer des géométries aux formes arbitraires.

Dans un premier temps, nous calculons les dimensions du cube englobant l'objet, puis ce dernier est rendu avec une couleur unie. Par la suite, une caméra mobile parcourt la géométrie le long de l'un des axes centraux du cube englobant. Au fur et à mesure que la caméra avance sur cet axe, les images acquises sont enregistrées dans une texture 3D, de la même façon dont on procède dans le domaine de l'imagerie par résonance magnétique *IRM*. De cette manière, la géométrie surfacique des objets sera enregistrée dans une texture volumique compacte, où les voxels seront adressables suivant les positions relatives des points du maillage à l'intérieur du cube englobant. La figure 3.4.1 décrit schématiquement l'étape de la voxelisation.

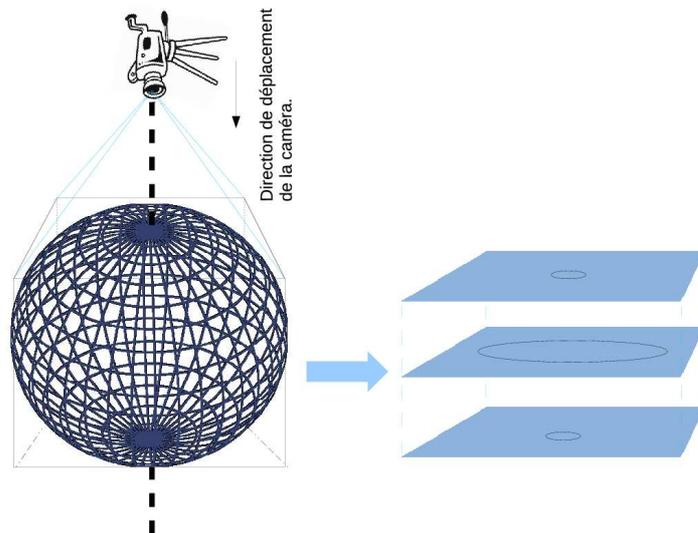


FIG. 3.7: Schéma explicatif du processus de voxelisation.

La texture volumique créée est par la suite envoyée à la carte graphique, afin que l'algorithme entreprenne le calcul de l'épaisseur.

### 3.4.2 Calcul de l'épaisseur

Les équations de Kubelka-Munk dépendent de l'information de l'épaisseur. En d'autres termes, il s'agit de la distance que traverse la lumière, à l'intérieur de l'objet, depuis un point donné. Communément, cette distance est calculée à l'aide de cartes d'ombres [Her05], une technique qui peut mettre en échec ce calcul, si la géométrie de l'objet contient des trous et des concavités. Dans [NK03], les auteurs exposent une méthode portant le nom de *depth-peeling*, et qui permet de gérer le problème des concavités. Cependant, bien que la méthode soit efficace, elle demeure inappropriée pour toute implémentation sur cartes graphiques.

Dans cette section, nous présentons une technique capable d'évaluer l'épaisseur en chaque point de l'objet, sur GPU. La texture volumique créée durant la phase de précalculs est reçue par le matériel, et le calcul de l'épaisseur peut alors commencer, pour chaque point à rendre.

À l'aide d'un pixel shader, nous effectuons un produit scalaire de la normale de chaque pixel et le vecteur normalisé de la direction de la lumière. Si le produit scalaire est négatif, le pixel reçoit la lumière ce qui implique l'estimation de l'épaisseur. Nous calculons l'équation de la droite qui passe par la source lumineuse et le pixel à rendre. Par la suite, et selon cette équation, nous comptons le nombre de voxels parcourus depuis le pixel, jusqu'à la rencontre d'un voxel de surface (voir Fig. 3.4.2). C'est le nombre de voxels visités qui indiquera la distance effective traversée par la lumière sous la surface, après modulation par les dimensions spatiales du cube englobant.

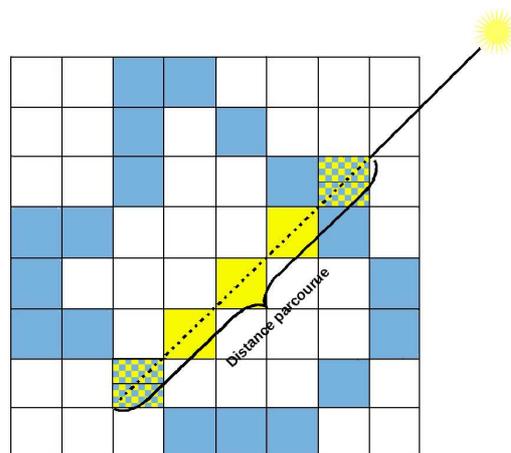


FIG. 3.8: Schéma décrivant l'algorithme de calcul de l'épaisseur sur une grille 2D.

### 3.4.3 Caclul de la BRDF et rendu final

Le modèle de diffusion de porcelaine émaillée est calculé après évaluation de la réflectance et de la transmittance de chaque couche, et application des équations 3.11 et 3.12 de l'annexe pour obtenir la réflectance et la transmittance totales. Lorsque la modélisation concerne des objets d'une épaisseur optique importante, la simple utilisation du profil de la réflectance peut s'avérer suffisante afin de prédire la couleur. Dans le cas de géométries plus fines, il est possible d'introduire la transmittance, selon les vecteurs de la direction de la lumière  $\vec{l}$ , et les normales des points à rendre  $\vec{n}$ . Le nouveau profil de diffusion s'écrit alors de la façon suivante :

$$P(X_x) = \frac{1}{2}(\vec{l} \cdot \vec{n} + 1)R_{totale}(X_x) + \frac{1}{2}(1 - \vec{l} \cdot \vec{n})T_{totale}(X_x) \quad (3.1)$$

L'équation calcule un nouveau profil comme une moyenne pondérée des de la réflectance et de la transmittance. De cette manière, la réflectance apporte sa contribution, lorsque la normale et la lumière sont dans la même direction, tandis que la transmittance est utilisée si les directions sont opposées.

Pour le rendu final, nous appliquons une modélisation classique à l'aide d'un BRDF. C'est le profil de diffusion  $P(X_x)$  qui remplacera la réflectance dans la BRDF. Les équations relatives au rendu final pourront alors s'écrire comme suit :

$$L_s(x, \vec{\omega}_s) = \int_S L_e(x, \vec{\omega}_e)P(X_x)G(x, \vec{\omega}_e)d\omega_e \quad (3.2)$$

Dans cette équation, la fonction  $G(x, \vec{\omega}_e)$  exprime le terme cosinus. Dans le cadre du travail présenté dans ce chapitre, nous nous contentons d'une illumination à l'aide de sources ponctuelles. Ainsi, un simple modèle de Phong est appliqué pour le calcul de la radiance incidente, de par la simplicité de son implémentation sur le matériel graphique. Le profil de diffusion  $P(X_x)$  ne dépend d'aucune information angulaire, et peut donc être écarté. Il sera calculé à l'extérieur de l'intégration :

$$L_s(x, \vec{\omega}_s) = P(X_x) \int_S L_e(x, \vec{\omega}_e)G(x, \vec{\omega}_e)d\omega_e \quad (3.3)$$

C'est l'équation 3.3 qui s'occupe de rendre les objets en porcelaine émaillée. Cette équation ainsi que les équations concernant le calcul des réflectance et tansmittance totales de la porcelaine émaillée sont évaluées dans le même pixel shader qui estime l'épaisseur.

## 3.5 Résultats

Cette section présente les résultats que nous avons obtenus suite à l'application des différentes méthodes décrites dans ce chapitre. Dans un premier temps, nous présentons une vue d'ensemble du processus complet de création d'images de porcelaine émaillée, de l'acquisition des spectres de réflectance et de transmittance jusqu'au rendu final. Dans un autre temps, nous exposons les performances en termes de temps de l'acquisition des spectres et des calculs. Nous terminons cette partie par une présentation des résultats en qualité visuelle d'objets en porcelaine émaillée, et d'autres objets constitués de matériaux translucides hétérogènes.

### 3.5.1 Résumé de l'ensemble des méthodes et techniques

Dans ce qui suit, un descriptif succinct des phases successives nécessaires au rendu d'objets et porcelaine émaillée, selon notre méthode :

#### **Processus d'acquisition :**

- Définition du spectre en réflexion de la porcelaine.
- Définition du spectre en transmission de la porcelaine.
- Définition du spectre en réflexion de l'émail.
- Définition du spectre en transmission de l'émail.

#### **Estimation des propriétés optiques :**

- Calcul des coefficients d'absorption et de diffusion de la porcelaine.
- Calcul des coefficients d'absorption et de diffusion de l'émail.

#### **Étape de voxelisation sur CPU :**

- Définition du cube englobant de l'objet à rendre.
- Prise des images en coupes de la surface, et enregistrement dans une texture volumique.
- Envoi de la texture volumique vers le GPU.

### Étape de rendu sur GPU

- Calcul de l'épaisseur en chaque point à rendre de l'objet.
- Calcul de la radiance d'entrée en chaque point à rendre.
- Estimation de la réflectance totale de la porcelaine émaillée, en utilisant les équations de Kubelka-Munk.
- Estimation de la transmittance totale de la porcelaine émaillée, en utilisant les équations de Kubelka-Munk.
- Rendu final par le biais d'une BRDF.

### 3.5.2 Performances

Tout au long de nos travaux, nous nous sommes rendu compte que les équations de Kubelka-Munk sont très peu gourmandes en temps de calculs. Nous avons par ailleurs utilisé des textures volumiques d'une très grande résolution, soit  $512^3$ . Le choix de telles résolutions a pour but d'augmenter la qualité de nos images, puisque les épaisseurs sont estimées avec une meilleure précision. Le choix de cette résolution n'entrave en rien la rapidité des calculs, lors de la phase de précalculs, ni au moment du rendu. La phase de voxélisation est indépendante du nombre de triangles des objets à discrétiser, et dure en moyenne une dizaine de secondes.

Les vitesses d'exécution du rendu d'objets en porcelaine émaillée sont résumées dans le tableau 3.2, nous donnons les nombres d'images par seconde enregistrés pour différents modèles.

Modèle	Triangles	Nombre d'images par seconde
Hand	7700	216
Vase	15477	181
NVidiaDemon	48174	145
Bunny	72223	128
Buddha	381500	51

TAB. 3.2: Vitesses d'exécution du rendu d'objets en porcelaine émaillée, pour différentes résolutions de maillage.

La machine de test sur laquelle nous avons relevé les différentes valeurs indiquées dans le tableau 3.2, est un ordinateur doté d'un processeur AMD cadencé à 2GHz

et muni d'une carte graphique Nvidia Geforce 8600 GT. Les résultats en chiffres restent en cohérence avec les perspectives fixées au départ, celles d'établir un modèle de rendu temps-réel, d'objets en porcelaine émaillée.

### 3.5.3 Rendu d'objets en porcelaine émaillée et matériaux translucides hétérogènes

La figure 3.9 illustre deux objets en porcelaine émaillée rendus à l'aide de notre méthode. La figure 3.9a représente le Bunny de Stanford en porcelaine émaillée. Sur la figure 3.9b, on peut voir un vase en porcelaine vitrifiée à l'aide d'une très fine couche d'email.

La figure 3.10 montre deux images d'une assiette fine en reliefs, depuis deux points de vue différents. La figure 3.10a représente la face en reliefs de l'assiette, tandis que sur la figure 3.10b nous pouvons voir la partie plate de l'objet. Sur l'image du bas de la figure 3.10, les zones brunes correspondent aux régions épaisses de l'assiette, ce qui confirme l'importance de la pondération effectuée entre la transmittance et la réflectance vue dans l'équation 3.1. De plus, ceci souligne la dépendance des profils de diffusion de l'épaisseur des objets.

La théorie de Kubelka-Munk est un modèle de la BRDF, qui se caractérise par son aspect local. Contrairement aux modèles de BSSRDF tels que celui de la diffusion dipôle, les équations de Kubelka-Munk agissent sur un même point, mais en profondeur. Cette particularité est une aubaine pour le rendu de matériaux translucides hétérogènes, où l'altération spatiale des propriétés optiques est désormais possible. Dans la figure 3.11, nous présentons deux images d'objets translucides non homogènes. Sur l'image du haut (Fig. 3.11a), un objet en porcelaine émaillée où les propriétés optiques de l'email ne sont pas homogènes. Ici, nous avons exploité une texture du dessin à appliquer sur l'objet, en utilisant les données inscrites dans la texture comme étant les nouveaux coefficients d'absorption et de diffusion de l'email. Cette technique serait une simulation de l'application de décalcomanies sur ce genre d'objets. Sur l'image du bas (Fig. 3.11b), nous avons appliqué un simple bruit de Perlin dans le but de modifier les propriétés optiques de l'email. De plus, nous avons utilisé les propriétés optiques du marbre récupérées dans [JMLH01], pour la couche inférieure. La figure 3.11b montre que la théorie de Kubelka-Munk s'applique à un

grand nombre de matériaux translucides.

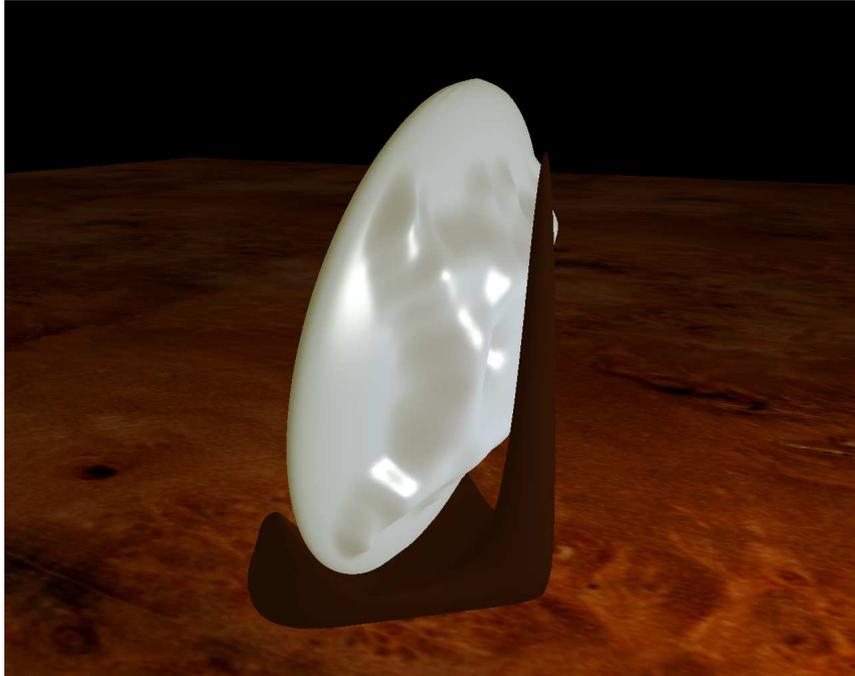


(a) Image représentant le Bunny de Stanford en porcelaine émaillée.

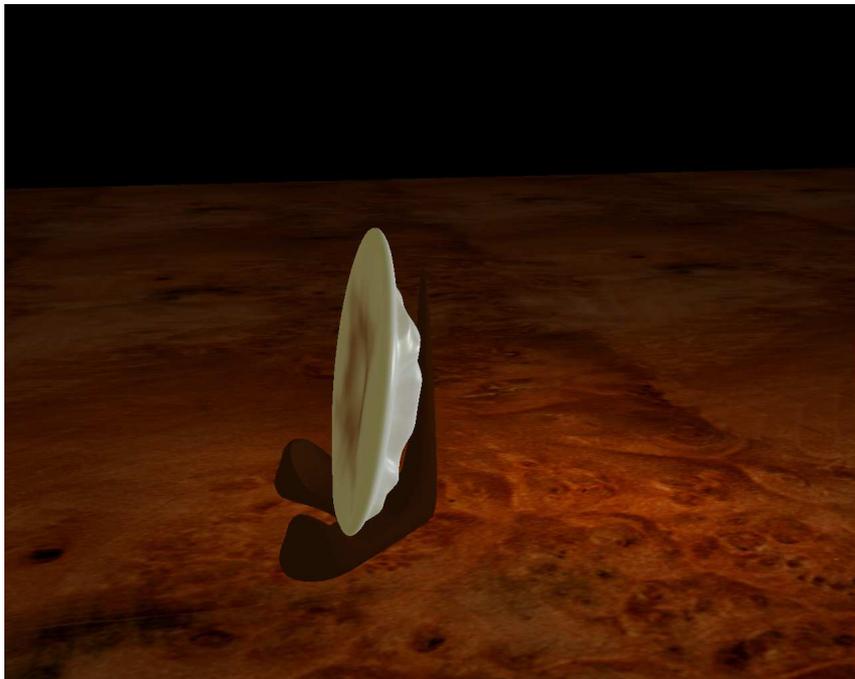


(b) Image représentant un vase en porcelaine émaillée.

FIG. 3.9: Résultats de rendu d'objets en porcelaine émaillée.

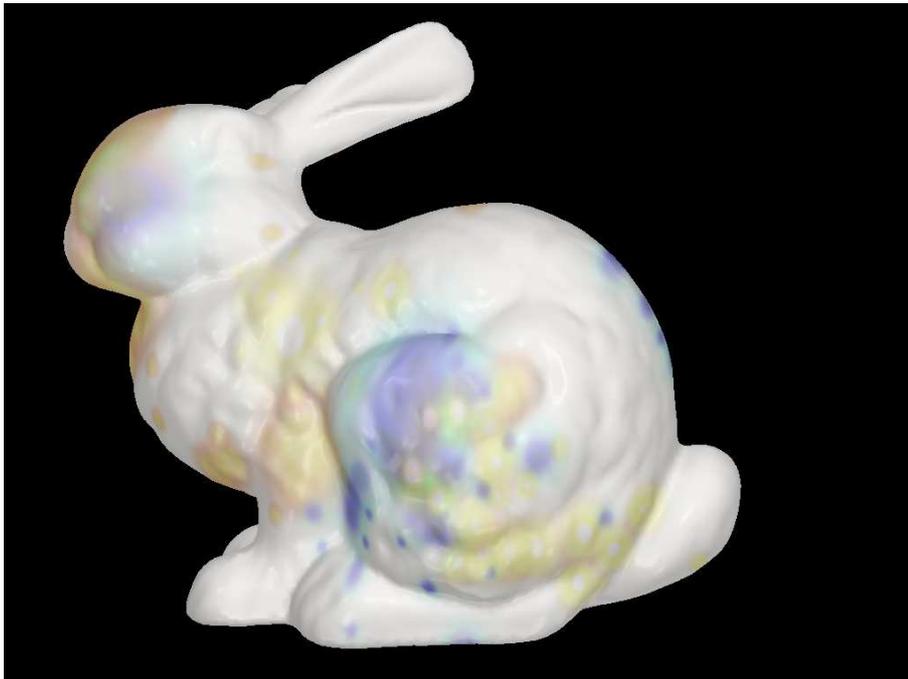


(a) Image d'une assiette en relief vue par-derrière.



(b) Image d'une assiette en relief vue par-devant.

FIG. 3.10: Résultats du modèle de Kubelka-Munk appliqué aux objets en porcelaine émaillée de géométrie fine.



(a) Objet en porcelaine émaillée hétérogène.



(b) Objet en marbre hétérogène.

FIG. 3.11: Résultats de l'application de notre méthode aux matériaux translucides hétérogènes.

## 3.6 Discussion et travaux futurs

Découvert en Chine à l'époque Tang, le secret de fabrication a été révélé au monde entier, des siècles plus tard. Une aventure digne d'une épopée qui doit son succès à la maniabilité de la pâte servant à la fabrication des objets en porcelaine captivants par leur blancheur immaculée. De cette pâte, les fabricants créent des formes différentes : des œuvres d'art, des couverts, des assiettes, des objets de décoration. Le matériau a trouvé des applications industrielles diverses dus à sa rigidité et à ses propriétés optiques : fabrication de douilles, de prothèses dentaires, construction mécanique, industrie nucléaire. L'aspect visuel de la porcelaine est souvent à l'origine de ses nombreuses applications, il est donc intéressant de pouvoir proposer des simulateurs de l'apparence de cette matière, et de les mettre au service des artisans et des industriels. En synthèse d'images, aucun travail n'a vraiment été consacré au rendu de ce matériau, en dépit de l'intense activité réservée aux objets translucides en général.

Nous avons mis en place un moteur de rendu d'objets en porcelaine émaillée. Le moteur est capable de gérer des maillages de n'importe quelle forme, sous des conditions d'illumination dynamiques. Il prend en considération les deux couches constituant ces objets, qui peuvent être d'épaisseurs arbitraires. Eventuellement, la gestion de matériaux hétérogènes est possible, laissant le choix à l'utilisateur de faire varier les propriétés optiques, même en temps-réel.

Les algorithmes proposés pour le rendu sont basés sur la théorie de Kubelka-Munk, un modèle largement exploité dans l'industrie des matériaux. C'est cette théorie qui a rendu possible notre travail et a permis de construire un modèle de rendu temps-réel d'objets multicouches et hétérogènes. En effet, le caractère paramétrable de la théorie de Kubelka-Munk l'autorise à rendre un grand nombre de matériaux translucides, et pas seulement la porcelaine émaillée.

Dans l'avenir, nous projetons d'appliquer la théorie de Kubelka-Munk au rendu de chaussées mouillées. Nous pensons qu'il est possible d'éviter l'utilisation contraignante de la mécanique des fluides, et de proposer un modèle empirique, prévu initialement pour la simulation de l'absorption de la lumière, afin de simuler le changement opéré sur la chaussée, au contact de l'eau.

La thermométrie radiative est le domaine de qui s'intéresse à l'étude de la réflec-

tance des milieux diffus, soumis à des températures plus ou moins élevées. Il fournit un support formel complet à l'usage des industriels de céramique et de métallurgie. Nous prévoyons d'utiliser ce support, et d'apporter des modifications techniques à notre moteur de rendu, afin d'appréhender l'incidence des temps et des processus de cuisson sur l'apparence de la porcelaine émaillée.



# Annexe : Formules de la théorie de Kubelka-Munk

Nous indiquons dans cette annexe les formules classiques de la théorie de la diffusion de la lumière par des milieux troubles, théorie formulée par Kubelka-Munk en 1931 ; les formules que nous citons sont celles réactualisées en 1948 par les auteurs eux-mêmes.

$$R = \frac{S}{K + S + b \coth(bX)} \quad (3.4)$$

$$T = \frac{b}{(K + S) \sinh(bX) + b \cosh(bX)} \quad (3.5)$$

Ici,  $b$  est donné par :

$$b = \sqrt{K(K + 2S)} \quad (3.6)$$

Les valeurs  $K$  et  $S$  définissent respectivement, les coefficients d'absorption et de diffusion. La variable  $b$  désigne le coefficient d'absorption apparente.

L'intégration s'opère sur une seule dimension, et la réflectance et la transmittance totales ne sont fonction que de l'épaisseur. Quand l'épaisseur du matériau est assez importante, la réflectance ne change plus, et le matériau est optiquement épais. Dans ce cas, la réflectance est donnée par :

$$R_\infty = a - \sqrt{a^2 - 1} \quad (3.7)$$

A partir de l'équation 3.7, il est possible d'obtenir le rapport entre les coefficients  $K$  et  $S$  :

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (3.8)$$

Ainsi, les coefficients de diffusion et d'absorption seront donnés par :

$$S = \frac{2.3R_\infty}{X(1 + R_\infty)} \log \frac{R_\infty(1 - R_\infty R_0)}{R_\infty - R_0} \quad (3.9)$$

$$K = \frac{2.3(1 - R_\infty)}{X(1 + R_\infty)} \log \frac{R_\infty(1 - R_\infty R_0)}{R_\infty - R_0} \quad (3.10)$$

Ici,  $R_0$  est la réflectance du substrat.

Dans le cas d'un matériau constitué de deux couches translucides, la réflectance  $R_{totale}$  et la transmittance  $T_{totale}$  totales peuvent être calculées selon les formules suivantes :

$$R_{totale} = R_{interne} + \frac{T_{interne}^2 R_{externe}}{1 - R_{interne} R_{externe}} \quad (3.11)$$

$$T_{totale} = \frac{T_{interne} T_{externe}}{1 - R_{externe} R_{interne}} \quad (3.12)$$

La réflectance et la transmittance de la couche externe sont désignées respectivement par  $R_{externe}$  et  $T_{externe}$ , tandis que ces mêmes valeurs sont données par  $R_{interne}$  et  $T_{interne}$  pour la couche interne.



## Bibliographie

- [BC06] Francesco Banterle and Alan Chalmers. A fast translucency appearance model for real-time applications. In *SCCG 2006 - Spring Conference on Computer Graphics*. ACM SIGGRAPH, April 2006.
- [Bli78] James F. Blinn. Simulation of wrinkled surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 12(3) :286–292, 1978.
- [BSS93] Philippe Blasi, Bertrand Le Saëc, and Christophe Schlick. A rendering algorithm for discrete volume density objects. *Comput. Graph. Forum*, 12(3) :201–210, 1993.
- [Cha60] Subrahmanyan Chandrasekhar. Radiative transfer. New York, 1960. Dover Publishers.
- [CHH03] Nathan A. Carr, Jesse D. Hall, and John C. Hart. Gpu algorithms for radiosity and subsurface scattering. In *HWWS '03 : Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, pages 51–59, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2003. Eurographics Association.
- [CON99] Brian Cabral, Marc Olano, and Philip Nemeç. Reflection space image based rendering. In *SIGGRAPH '99 : Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 165–170, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [CP03] Ela Claridge and Stephen J. Preece. An inverse method for the recovery of tissue parameters from colour images. In *IPMI*, pages 306–317, 2003.

- [CT82] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1) :7–24, 1982.
- [Din76] A. Dinsdale. Experiments on impact. testing of cylindrical ceramic rods. *Trans. Brit. Ceram. Soc*, 1976.
- [DJ05] Craig Donner and Henrik Wann Jensen. Light diffusion in multi-layered translucent materials. *ACM Trans. Graph.*, 24(3) :1032–1039, 2005.
- [DJ06] Craig Donner and Henrik Wann Jensen. A spectral shading model for human skin. In *SIGGRAPH '06 : ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, page 147, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [dLE07] Eugene d'Eon, David Luebke, and Eric Enderton. Efficient rendering of human skin. In Jan Kautz and Sumanta Pattanaik, editors, *SR '07 Rendering Techniques*, pages 147–157, Grenoble, France, 2007. Eurographics Association.
- [DS03] Carsten Dachsbacher and Marc Stamminger. Translucent shadow maps. In *EGRW '03 : Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, pages 197–201, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2003. Eurographics Association.
- [EM01] M. Elias and M. Menu. Characterisation of surface states on patrimonial works of art. *Surface Engineering*, 17(3) :225–229, 2001.
- [EWNT78] G. Eason, A. Weitch, R. Nisbet, and F. Turnbull. The theory of the backscattering of light by blood. In *J. Physics*, number 11, pages 1463–1479, 1978.
- [FJH04] Roland W. Fleming, Henrik Wann Jensen, and Heinrich. Perceiving translucent materials. In *APGV '04 : Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pages 127–134, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.
- [FPBB06] Guillaume François, Sumanta Pattanaik, Kadi Bouatouch, and Gaspard Breton. Subsurface texture mapping. In *SIGGRAPH '06 : ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, page 172, New York, NY, USA, 2006. ACM.

- [GLL<sup>+</sup>04] Michael Goesele, Hendrik P. A. Lensch, Jochen Lang, Christian Fuchs, and Hans-Peter Seidel. Disco - acquisition of translucent objects. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3) :835–844, August 2004. (Proc. ACM SIGGRAPH '04).
- [Gre03] Robin Green. Spherical harmonic lighting : The gritty details. *Archives of the Game Developers Conference*, March 2003.
- [Gre04] S. Green. Real-time approximations to subsurface scattering. *GPU Gems*, 2004.
- [Her05] Christophe Hery. Implementing a skin bssrdf : (or several...). In *SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 4, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [HK93] P. Hanrahan and W. Krueger. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *Proc. of SIGGRAPH-93 : Computer Graphics*, pages 165–174, Anaheim, CA, 1993.
- [HMBR05] Tom Haber, Tom Mertens, Philippe Bekaert, and Frank Van Reeth. A computational approach to simulate subsurface light diffusion in arbitrarily shaped objects. In *GI '05 : Proceedings of Graphics Interface 2005*, pages 79–86, School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2005. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [Hog79] C. S. Hogg. *In Mineralogy of ceramics*, 1979.
- [HSA91] Pat Hanrahan, David Salzman, and Larry Aupperle. A rapid hierarchical radiosity algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 25(4) :197–206, 1991.
- [HV04] Xuejun Hao and Amitabh Varshney. Real-time rendering of translucent meshes. volume 23, pages 120–142, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [Ish78] A. Ishimaru. Wave propagation and scattering in random media. *Academic Press.*, 1978.
- [JB02] Henrik Wann Jensen and Juan Buhler. A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials. In *SIGGRAPH '02 : Proceedings*

- of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 576–581, New York, NY, USA, 2002. ACM Press.
- [JC98] Henrik Wann Jensen and Per H. Christensen. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In *SIGGRAPH '98 : Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 311–320, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [JMLH01] Henrik Wann Jensen, Stephen R. Marschner, Marc Levoy, and Pat Hanrahan. A practical model for subsurface light transport. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 511–518, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [JR01] W.M. Johnston J.C. Ragain. Accuracy of kubelka-munk reflectance theory applied to human dentin and enamel. volume 80, pages 449–452, 2001.
- [KM31] P. Kubelka and F. Munk. Ein beitrag zur optik der farbanstriche. *Zeitschrift fur Technische Physik*, 12 :593–601, 1931.
- [KM99] Jan Kautz and Michael D. McCool. Interactive rendering with arbitrary brdfs using separable approximations. In *SIGGRAPH '99 : ACM SIGGRAPH 99 Conference abstracts and applications*, page 253, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [KPHE02] Joe Kniss, Simon Premoze, Charles Hansen, and David Ebert. Interactive translucent volume rendering and procedural modeling. In *VIS '02 : Proceedings of the conference on Visualization '02*, pages 109–116, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [KS00] Jan Kautz and Hans-Peter Seidel. Towards interactive bump mapping with anisotropic shift-variant brdfs. In *HWWS '00 : Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, pages 51–58, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [Lan78] Williams Lance. Casting curved shadows on curved surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 12(3) :270–274, 1978.

- [LFTW05] Hongsong Li, Sing Choong Foo, Kenneth E. Torrance, and Stephen H. Westin. Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications. In A. Duparre, B. Singh, and Z-H Gu, editors, *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies II*, volume Proceedings of SPIE Vol. 5878, pages 5878–29. SPIE, SPIE, Bellingham, WA, July 2005.
- [LGB+02] Hendrik P. A. Lensch, Michael Goesele, Philippe Bekaert, Jan Kautz, Marcus A. Magnor, Jochen Lang, and Hans-Peter Seidel. Interactive rendering of translucent objects. In *PG '02 : Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, page 214, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [LLL+96] Eric P. Lafortune, Eric P. Lafortune, Eric P. Lafortune, Yves D. Willems, and Yves D. Willems. Rendering participating media with bidirectional path tracing. In *In Eurographics Rendering Workshop*, pages 91–100. Springer-Verlag/Wien, 1996.
- [LPT05] Hongsong Li, Fabio Pellacini, and Kenneth E. Torrance. A hybrid monte carlo method for accurate and efficient subsurface scattering. In *Rendering Techniques*, pages 283–290, 2005.
- [LSSS04] Xinguo Liu, Peter P. Sloan, Heung Y. Shum, and John Snyder. All-frequency precomputed radiance transfer for glossy objects. In Alexander Keller and Henrik W. Jensen, editors, *Eurographics Symposium on Rendering*, pages 337–344, Norrköping, Sweden, 2004. Eurographics Association.
- [Mat03] Wojciech Matusik. *A data-driven reflectance model*. PhD thesis, 2003. Supervisor-Mcmillan, Leonard.
- [Mel63] N.T. Melamed. Optical properties of powders. *Journal of Applied Physics*, 34 :560–570, 1963.
- [MG99] Westin S. Lafortune E. Torrance K. Marschner, S. and D. Greenberg. Image-based brdf measurement including human skin. In *Proceedings of the 10th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 139–152, 1999.

- [MKB<sup>+</sup>03a] Tom Mertens, Jan Kautz, Philippe Bekaert, Frank Van Reeth, and Hans-Peter Seidel. Efficient rendering of local subsurface scattering. In *PG '03 : Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, page 51, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [MKB<sup>+</sup>03b] Tom Mertens, Jan Kautz, Philippe Bekaert, Hans-Peter Seidel, and Frank Van Reeth. Interactive rendering of translucent deformable objects. In Alyn P. Rockwood, editor, *SIGGRAPH*. ACM, 2003.
- [MM03] I. V. Meglinski and S. J. Matcher. Computer simulation of the skin reflectance spectra. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 70(2) :179–186, 2003.
- [NK03] Zoltán Nagy and Reinhard Klein. Depth-peeling for texture-based volume rendering. In *Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 429–433. IEEE Computer Society, 2003.
- [NL01] Carmen So-Ling Ng and Ling Li. A multi-layered reflection model of natural human skin. In *CGI '01 : Computer Graphics International 2001*, pages 249–256, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [NRH<sup>+</sup>77] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : for sale by the Supt. of Docs., US Govt. Print. Off., 1977.
- [NRH03] Ren Ng, Ravi Ramamoorthi, and Pat Hanrahan. All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :376–381, 2003.
- [PBM<sup>+</sup>06] Pieter Peers, Karl Berge, Wojciech Matusik, Ravi Ramamoorthi, Jason Lawrence, Szymon Rusinkiewicz, and Philip Dutré. A compact factored representation of heterogeneous subsurface scattering. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 25(3), July 2006.
- [RHBF80] W. J. O'Brien R. H. Brodbelt and P. L. Fan. Translucency of dental porcelains. *Journal of Dental Research*, 1980.

- [RLK98] Jan J. Koenderink Rong Lu and Astrid M. L. Kappers. Optical properties (bidirectional reflection distribution functions) of velvet. *Applied Optics*, 37 :5974–5984, 1998.
- [SGM04] Pedro V. Sander, David Gosselin, and Jason L. Mitchell. Real-time skin rendering on graphics hardware. In *SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Sketches*, page 148, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [SHHS03] Peter-Pike Sloan, Jesse Hall, John Hart, and John Snyder. Clustered principal components for precomputed radiance transfer. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :382–391, July 2003.
- [SKS02] Peter-Pike Sloan, Jan Kautz, and John Snyder. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. In *SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 527–536, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [Sta95] Jos Stam. Multiple scattering as a diffusion process. In *In Eurographics Rendering Workshop*, pages 41–50, 1995.
- [TSO96] T. Horuichi T. Sugiyama and T. Osaki. Measurement of translucency of porcelain bodies. *Journal of ceramic society of Japan*, 1996.
- [TSS03] T. Mori T. Sugiyama and S. Suzuki. Optical characteristics of japanese porcelain bodies prepared from high plastic clay. *British Ceramic Transactions*, 2003.
- [TUA<sup>+</sup>05] Masaru Tsuchida, Toshio Uchiyama, Hiroyuki Arai, Masami Nishiko, Yoshiyuki Sakaguchi, Hideaki Haneishi, Masahiro Yamaguchi, and Nagaaki Ohyama. Development of brdf and btf measurement and computer-aided design systems based on multispectral imaging. In *Proc. 10th Congress of the International Colour Association*, 2005.
- [Tur92] Greg Turk. Re-tiling polygonal surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2) :55–64, 1992.
- [War92] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2) :265–272, 1992.
- [WCPW<sup>+</sup>08] Rui Wang, Ewen Cheslack-Postava, Rui Wang, David Luebke, Qianyong Chen, Wei Hua, Qunsheng Peng, and Hujun Bao. Real-time

- editing and relighting of homogeneous translucent materials. *The Visual Computer*, 24(7-9) :565–575, 2008.
- [WJT86] W. O’Brien W. Johnston and T. Tien. The determination of optical-absorption and scattering in translucent porcelain, 1986.
- [WMP+06] Tim Weyrich, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Bernd Bickel, Craig Donner, Chien Tu, Janet McAndless, Jinho Lee, Addy Ngan, Henrik Wann Jensen, and Markus Gross. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model. *ACM Trans. Graph.*, 25(3) :1013–1024, 2006.
- [WOF85] W.M. Johnston W.J. O’Brien and F. FANIAN. Double-layer color effects in porcelain systems, 1985.
- [WSB+98] Rod White, Peter Saunders, Bonsey, J. Stuart, John van de Ven, and Hamish Edgar. Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces. *Applied Optics*, 37(16) :3450–3454, 1998.
- [WTL04] Rui Wang, John Tran, and David Luebke. All-frequency relighting of non-diffuse objects using separable BRDF approximation. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, pages 345–354, 2004.
- [WTL05] Rui Wang, John Tran, and David Luebke. All-frequency interactive relighting of translucent objects with single and multiple scattering. *ACM Trans. Graph.*, 24(3) :1202–1207, 2005.
- [WZT+08] Jiaping Wang, Shuang Zhao, Xin Tong, Stephen Lin, Zhouchen Lin, Yue Dong, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Modeling and rendering of heterogeneous translucent materials using the diffusion equation. *ACM Trans. Graph.*, 27(1) :1–18, 2008.
- [XGL+07] Kun Xu, Yue Gao, Yong Li, Tao Ju, and Shi-Min Hu. Real-time homogenous translucent material editing. *Comput. Graph. Forum*, 26(3) :545–552, 2007.
- [ZERB05] Todd Zickler, Sebastian Enrique, Ravi Ramamoorthi, and Peter Belhumeur. Reflectance sharing : Image-based rendering from a sparse set of images. In *Rendering Techniques 2005 : 16th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 253–264, June 2005.