

UNIVERSITÉ DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Science - Technologie - Santé

FACULTÉ des Sciences et Techniques - Laboratoire XLIM UMR CNRS 6172

Département Mathématiques Informatique - Projet Synthèse d'images Réaliste

Thèse N° : 18/2007

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L' UNIVERSITÉ DE LIMOGES

Discipline / Spécialité : Informatique

présentée et soutenue par

HNAT Kevin

le 27 Juin 2007

Influence de la Microgéométrie des surfaces sur le Rendu Réaliste

Thèse dirigée par : D. GHAZANFARPOUR et A.REINEIX

Co-encadrement : S. MERILLOU

Composition du jury

<i>Président :</i>	Michel Meriaux	Professeur à l'Université de Poitiers
<i>Rapporteurs :</i>	Jean-Pierre Jessel	Professeur à l'Université de Toulouse 3
	Mateu Sbert	Professeur à l'Universitat de Girona (Espagne)
<i>Examineurs :</i>	Djamchid Ghazanfarpour	Professeur à l'Université de Limoges
	Alain Reineix	Directeur de recherche à l'Université de Limoges
	Stéphane Merillou	Maître de conférences à l'Université de Limoges

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Je voudrais remercier Monsieur Mateu Sbert et Monsieur Jean-Pierre Jessel pour avoir accepté d'examiner ma thèse. L'intérêt manifesté pour mes travaux a permis d'apporter un regard extérieur critique et intéressant sur le sujet. Je remercie également Monsieur Michel Meriaux pour l'intérêt qu'il a porté au sujet en acceptant de la juger et en présidant le Jury.

Je voudrais tout autant remercier Djamchid Ghazanfarpour et Alain Reineix pour m'avoir accueilli et m'avoir permis de réaliser ces travaux. Merci également à Stéphane Merillou pour son soutien.

Je n'oublierais pas de remercier l'ensemble du département informatique de Limoges pour son accueil quand j'étais Moniteur avec un merci particulier à Michel Gautier, mon tuteur pédagogique.

Un grand merci à Damien pour nos discussions passionnées, pour m'avoir appris tant de choses et m'avoir permis d'obtenir ce qu'on m'avait refusé par cinq fois auparavant.

Je voudrais remercier l'ensemble de mes collègues et amis que j'ai pu côtoyer durant mes trois ans à Limoges : Kossovar, Boucle, Sylvain, Pierrouseau, Patrick, Hubert, Romain, Yann, Céline, Salman, Passe Partout et tous les autres. Je n'oublierais jamais nos nuits au coin du PC, un Kebab à la main en train de refaire le monde. C'est grâce à vous que cette thèse m'a appris plus que je n'aurais jamais imaginé.

Je remercie ma famille, ma belle famille ainsi que mes amis pour le soutien pendant ces années difficiles.

Je finirais par le merci le plus important. Tout que j'ai fait et écrit n'aurait pas été possible sans toi. Ton soutien sans faille jusqu'au dernier moment, m'a poussé à ne pas abandonner et à toujours avancer pour réussir. Je suis simplement heureux et fier que tu sois ma femme aujourd'hui.

à celle qui ne pourra jamais lire ce qui suit.

L'égoïsme ne règnera plus dans les sciences quand on s'associera pour étudier. Au lieu d'envoyer aux Académies des paquets cachetés, on s'empressera de publier ses moindres observations pour peu qu'elles soient nouvelles et on ajoutera : "Je ne sais pas le reste"
(Evariste Galois - 30 mai 1832)

Table des matières

Chapitre 1 Introduction Générale	1
Chapitre 2 La rugosité en synthèse d'images	5
2.1 Introduction	5
2.2 Quelques notions de bases en science des matériaux.	7
2.2.1 Caractéristique d'une surface réelle	7
2.2.2 Principe de mesure d'une surface	8
2.3 Fonction de distribution de hauteurs de surfaces et longueur d'autocorré- lation.	10
2.3.1 Fonction de distribution de hauteurs de surfaces	10
2.3.2 Le modèle de He Torrance	12
2.3.3 Le modèle de diffraction de Stam	12
2.3.4 Synthèse sur ce paramètre de rugosité	13
2.4 Pente de surface RMS.	13
2.4.1 La description de surface	14
2.4.2 Le modèle de Torrance Sparrow	14
2.4.3 Les autres modèles de FDRB basé sur des microfacettes	16
2.4.4 Synthèse sur la pente RMS	18
2.5 La rugosité représentée comme l'exposant d'un cosinus.	20
2.5.1 Le modèle de Phong	20
2.5.2 Le modèle de Blinn-Phong.	21
2.5.3 Le modèle d'Ashikminn Phong	22
2.5.4 Modèle de Strauss	23
2.5.5 FDRB compacte de matériaux métalliques	24
2.6 Les autres modèles de rugosité	24
2.6.1 le modèle de Poulin Fournier	24
2.6.2 Les FDRBS modélisées à partir de famille de fonction.	25

2.6.3	Les modèles basés sur des mesures	25
2.7	Conclusion	25
Chapitre 3	Extension de la notion de la rugosité	27
3.1	Introduction	27
3.2	Vers une notion commune de rugosité	27
3.2.1	Une description de surface physique : Le modèle de Beckmann et Spizzichinno	28
3.2.2	Les modèles empiriques	30
3.2.3	Une notion commune de rugosité	33
3.3	Extension du modèle de rugosité	39
3.3.1	Introduction	39
3.3.2	Choix d'un modèle de FDRB	39
3.3.3	Introduction des nouvelles distributions	40
3.4	Résultats	40
3.5	Conclusion et travaux futurs	41
Chapitre 4	Rendu en temps réel du changement d'aspect de matériaux poreux	45
4.1	Introduction	45
4.2	Modèles de vieillissements : un tour d'horizon des techniques	46
4.3	Le modèle de porosité en temps réel	47
4.3.1	Description du modèle utilisé	47
4.3.2	Rendu en temps-réel	48
4.3.3	Résultats	49
4.4	Pollution des surfaces poreuses par un matériau étranger	49
4.5	Pollution atmosphérique des surfaces poreuses	52
4.5.1	La pollution atmosphérique	52
4.5.2	Description de la méthode	53
4.5.3	Resultats de notre simulation de pollution	55
4.6	Surfaces poreuses mouillées	61
4.6.1	Animation du modèle	62
4.6.2	Résultats de la simulation de surface mouillée	64
4.7	Conclusion	68

Chapitre 5 Le phénomène de diffusion en électromagnétisme	71
5.1 Problématique croisée de la description de surfaces	71
5.1.1 Expression de la FDRB en électromagnétisme	72
5.2 La réflexion et la transmission des ondes électromagnétiques	73
5.3 La diffusion des ondes électromagnétiques	74
5.4 Etude de la méthode des petites perturbations [Yan06]	75
5.5 Modèles de surface à base de fractales	77
5.6 conclusion	78
Chapitre 6 Conclusion et Perspectives	79
Annexes	83
Annexe A Pixel Shader et Vertex Shader pour la porosité	83
A.1 Pixel Shader pour les surfaces mouillées	83
A.2 Vertex Shader pour les surfaces mouillées	86
A.3 Pixel Shader pour les surfaces mouillées	87
A.4 Vertex Shader pour les surfaces mouillées	90
Bibliographie	93

Table des figures

1.1	Vrai ou Faux? (Copyright is owned by the respective companies or artists.)	1
2.1	Echelle de Rugosité dans quatre domaines d'étude	5
2.2	Echelle de Westin	6
2.3	Angles et vecteurs utilisés	7
2.4	Principe de mesure par profilomètre. La hauteur de surface est mesurée par un stylo mécanique.	9
2.5	(a) : Mesure d'une surface réalisée avec un profilomètre. La longueur de mesure est de 1,0mm. (b) Photographie du tuyau en cuivre utilisé pour la mesure.(c) Agrandissement à la loupe binoculaire de la surface mesurée.(16x).	9
2.6	Deux surfaces générées à partir du même σ peuvent être complètement différents.	12
2.7	Deux images représentant les effets de la rugosité sur le modèle de He Torrance . (a) montre 5 boules avec σ croissant. (b) montre 5 boules avec un τ croissant.	13
2.8	Ombrage, masquage et définition de l'angle α	15
2.9	Le modèle isotropique de Ward sur 5 boules	18
2.10	Le modèle anisotrope de Ward sur 5 boules	19
2.11	FDRB de Cook et Torrance sur 5 boules	20
2.12	La FDRB de Phong sur 5 spheres ($k_d = 0.0, k_s = 1.0, n = \{1, 10, 30, 50, 80\}$, lDe gauche à droite).	21
2.13	Exemple d'une description de surface dite à <i>cylindre positif</i> (modèle de Poulin Fournier)	25
3.1	la distribution des hauteurs de la surface d(h) ($\sigma_h = 1$).	28
3.2	une FDRB spéculaire utilisant d(h) ($n = 1.6 - 0.2j, t = 20, k_d = 0.0, k_s = 1.0$).	29
3.3	La distribution de Beckmann en utilisant une pente RMS $m = 0.32$	31
3.4	La distribution de Cook et la distribution de Phong avec respectivement $m = 0.32$ et $n = 4$	32
3.5	Les limites de l'approximation de la distribution de Beckmann ($m = 0.51$) par la distribution de Phong ($n = 1$)	33
3.6	La distribution de Blinn ($n_B = 17$) approchant la distribution de Beckmann ($m = 0.32$).	34

3.7	La distribution de Beckmann ($m = 0.54$) approchant la distribution de Blinn($n_B = 4$).	35
3.8	La distribution de Ward ($m_x = 0.1, m_y = 0.8$) et la distribution d'Ashikminn ($n_u = 10, n_v = 187$).	36
3.9	La distribution de Ward ($m_x = 0.1, m_y = 0.8$) et la distribution d'Ashikminn ($n_u = 100, n_v = 100$).	36
3.10	Exemple de résultats	37
3.11	Une scène complète : un dragon en argent, en or et en bronze (resp. de gauche à droite)	38
3.12	Les distributions utilisées	41
3.13	Distribution uniforme $a = 0.1$	41
3.14	Distribution exponentielle $\lambda = 0.5$	42
3.15	Distribution de Rayleigh : $\sigma = 0.1$	42
3.16	Distribution de Cauchy : $a = 0.1$	42
3.17	Distribution de Simpson : $a = 1$	42
3.18	Un dragon en étain simulé en utilisant la distribution de Cauchy	43
3.19	Un dragon sculpté dans la glace en utilisant la distribution de Cauchy	44
3.20	Réflexions spéculaire du modèle d'Ashikminn et Shirley	44
4.1	La porosité peut prendre des valeurs élevées dans certains matériaux	46
4.2	Un pixel peut être couvert d'un nombre assez important de pores. Leur comportement moyen est simulé en utilisant un pore unique dont le comportement et les caractéristiques sont définies comme moyen et qui est inséré dans le modèle d'illumination local.	48
4.3	Le modèle de porosité appliqué à une poterie.	50
4.4	Le modèle de l'illumination locale après ajout du matériau étranger	50
4.5	Les trois types de contributions prises en compte dans notre modèle.	51
4.6	Zones de pollution. Sur la partie gauche de l'image, le bâtiment est exposé au nord et à la pluie, tandis que la partie droite en est protégée.	53
4.7	Texture d'éclairage (b), de normales (c) et de contours (d) issues d'une statue Africaine (a).	54
4.8	Remplissage du pore au cours du temps.	55
4.9	Les trois zones de vieillissements	56
4.10	Evolution temporelle de la pollution sur un bas relief.	57
4.11	Influence du paramètre α_{poro} .	58
4.12	Une scène d'intérieur complète (cathédrale).	59
4.13	Scène de vieillissement extrême	60
4.14	Pore partiellement rempli d'eau.	61
4.15	Wet texture extraites des photos 4.17(c)(gauche). Exemple utilisant les Wet textures.(droite)	63
4.16	Rôle de α_{poro} dans notre modèle	65
4.17	Comparaison de notre modèle avec des photos réelles.	66
4.18	Pluie tombant sur un bas-relief	66
4.19	Une scène inspirée de [JLD99], montrant une pierre sèche et une pierre mouillée	67

4.20	Simulation de l'efflorescence	69
5.1	Macroporosité d'un sol naturel (Wiliam.A Wisner 1972)	73
5.2	Réflexion d'une onde sur un conducteur parfait	74
5.3	Méthode des petites perturbations $0 < \theta < 90, \Phi = 0, \tau = 1$	76

1

Introduction Générale

Contexte

Les images de synthèses sont aujourd’hui omniprésentes et incontournables. Elles se rencontrent dans les domaines du divertissement tout d’abord. Le cinéma et les jeux vidéo sont de gros consommateurs de cette technologie. Les films entièrement en image de synthèse ont, depuis le premier ” Toy Story ”, envahi les écrans. La communication a emboîté le pas pour proposer des visuels entièrement reconstruits pour des affiches ou des spots de publicités. Dans l’industrie et notamment l’industrie automobile et aéronautique, la synthèse d’image devient de plus en plus usitée dans les simulations et les mises en situations.

Cet état de fait a été possible par l’avancée des techniques de rendu réalistes. Le degré de réalisme atteint aujourd’hui ne nous permet même pas de différencier dans certains cas une photographie d’une image de synthèse. Les deux images présentées à la figure 1.1 en sont un exemple.



FIGURE 1.1 – Vrai ou Faux ? (Copyright is owned by the respective companies or artists.)

Ce réalisme fort est une conjugaison de l’amélioration des techniques de rendu réalistes,

de l'amélioration du matériel et du talent des artistes qui conçoivent modèles, textures et lumière. Aujourd'hui, il convient de distinguer deux sous domaines majeurs du rendu d'images de synthèses. D'un côté, la calcul d'images classique. Le but est de réaliser une image statique (même si c'est une partie d'une animation) dont l'ensemble des interactions physiques sont représentées. De l'autre côté, on a vu l'émergence du rendu en temps réel guidé par l'amélioration des cartes graphiques et leurs spécialisations. Le réalisme est ici poussé à son maximum mais tout en restant dans les limites des contraintes du temps réel. Le but est différent et les applications le sont également. Les images de synthèse classiques trouvent leurs applications dans le cinéma ou la publicité. Le rendu en temps réel est quand à lui le domaine privilégié des jeux vidéo. Cependant, les simulateurs utilisés dans des industries plus conventionnelles (simulateurs de vol, de conduite ou architecturaux) sont basés sur des techniques de rendus en temps réel.

Motivation de nos travaux

Dans l'étude de la représentation d'un phénomène physique en synthèse d'images, deux approches peuvent être trouvées. La première consiste à trouver un moyen, quelqu'il soit mais en règle générale toujours simple pour représenter le phénomène. Dans ce contexte, l'utilisation de textures (2D ou 3D) est une réponse classique à la représentation de matériaux spécifiques par exemple. Une autre méthode consiste à étudier mathématiquement le phénomène et de le représenter le plus fidèlement possible. Notre étude s'inscrit dans cette démarche. Nous avons constaté le nombre réduit d'étude de la représentation des surfaces et plus particulièrement de la rugosité en synthèse d'images. En effet, bien que cette notion soit une notion couramment utilisée aucune étude de la rugosité n'avait encore été réalisée de manière physique et mathématique. La description de l'état de la surface intervient principalement dans le calcul de l'éclairage. Nous ne considérons pas les variations visibles d'une surface dans cette étude. Nous avons décidé d'introduire la notion de rugosité comme une notion complète dont la définition doit être la plus précise possible.

Objectif de cette thèse

Notre objectif principal consiste en une étude des effets de l'état de la surface sur le calcul de l'éclairage local. Nous nous limitons aux effets visibles des variations locales invisibles de la hauteur de la surface. Notre démarche a été d'aller chercher les définitions des paramètres de description de surfaces utiles dans les domaines où ces paramètres sont classiquement étudiés. Nous avons notamment cherché dans deux domaines en particulier : **La science des matériaux**. Nous nous sommes en particulier concentrés sur le sous domaine de l'étude des description de l'état de la surface. Ce domaine est particulièrement intéressant car il étudie l'état de surface des objets manufacturés. Ces objets font partie de ceux que l'on essaye de représenter de manière réaliste en synthèse d'images. **La diffusion des ondes électromagnétiques**. Historiquement, le calcul de l'éclairage local est dérivé du calcul de la diffusion des ondes électromagnétiques. De nombreuses

Fonctions de Distribution de Reflectance BiDirectionnelle (FDRB), utilisé dans le calcul de la réflexion de la lumière, ont été conçues à partir de modèles de diffusion.

L'étude de ces deux domaines est donc naturelle dans notre optique.

De plus, l'étude de la seule rugosité s'avère insuffisante. Nous avons ajouté une notion importante et récurrente quand on parle de l'état d'une surface : la porosité. Nous avons notamment mis en lumière l'importance de cette notion dans le cadre du vieillissement des surfaces poreuses.

Organisation de ce document

- Le chapitre 2 présente la notion de rugosité utilisée dans les modèles de calcul d'éclairéments locaux. Nous présentons dans cette partie les définitions utilisées en synthèse d'images et leurs équivalents de la science des matériaux. Le but étant de présenter l'état de l'art en matière de rugosité, nous avons choisi de les présenter en commençant par la représentation la plus physiquement réaliste. Nous continuerons ensuite avec les modèles moins physique et nous terminerons par les modèles empiriques.
- Le chapitre 3 présente certaines extensions de la notion de rugosité en synthèse d'images. Nous présentons dans un premier temps une manière d'uniformiser les différentes notions de rugosité vue au chapitre 2. Puis nous présentons un modèle permettant de prendre en compte un certain nombre de nouvelles représentations de rugosité.
- L'intégration de la porosité dans le modèle de description locale nous a permis de mettre au point un modèle générique permettant de prendre en compte un nombre important de phénomènes de changement d'aspects des matériaux poreux. L'étude nous a permis de dégager deux extensions principales permettant de représenter d'un côté les surfaces poreuses mouillées et de l'autre les effets de la pollution atmosphérique sur ces mêmes surfaces. L'ensemble de cette étude est présentée au chapitre 4
- Le chapitre 5 présente de manière succincte notre étude de la notion de rugosité en diffusion électromagnétiques. Cette étude se décompose en deux parties. La première présente les notions mises en jeu et l'étude de la méthode dite des petites perturbations. Cette étude préliminaire prouve l'utilité de l'étude des modèles de diffusion afin de permettre de prendre en compte de nouveaux effets visuels en synthèse d'images. La seconde partie de cette étude traite de la rugosité fractale. L'intégration de la notion de fractalité d'une surface rugueuse permet d'introduire la notion de dimension fractale. Cette notion de haut niveau sert dans ce domaine à représenter de manière globale le comportement d'une surface rugueuse.
- Enfin, nous présentons les conclusions de nos travaux de recherche et nous proposons de nouvelles pistes de recherche au travers de perspectives et de propositions variées.

2

La rugosité en synthèse d'images

La première partie de ce manuscrit a pour but de présenter la notion de rugosité utilisée en synthèse d'images. Nous parlerons plus particulièrement dans le cadre de cette étude de l'éclairage local.

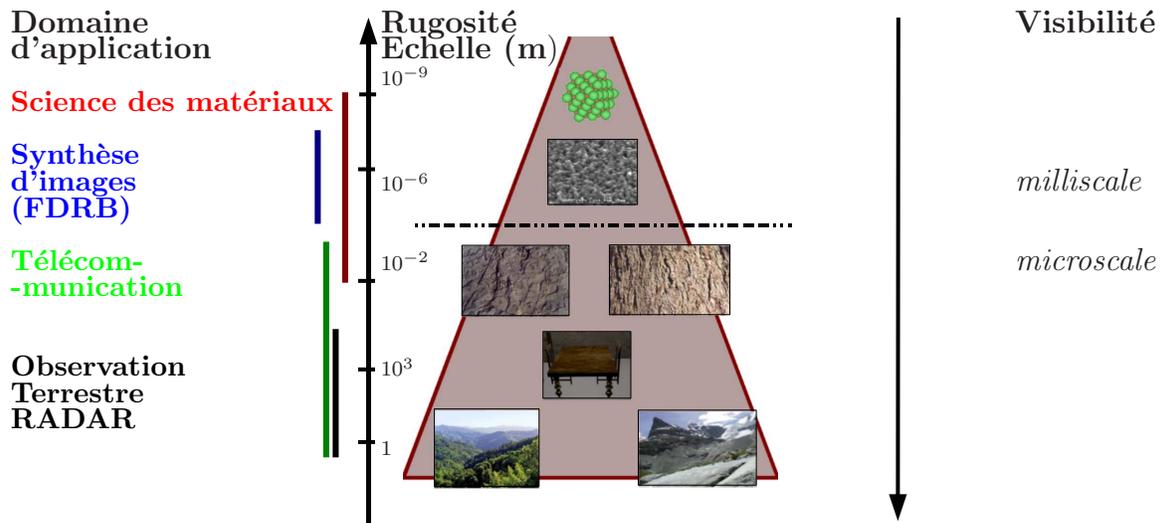


FIGURE 2.1 – Echelle de Rugosité dans quatre domaines d'étude

2.1 Introduction

La rugosité est un moyen permettant de caractériser la micro géométrie d'une surface. Bien que ce soit une notion courante de la physique, il est très difficile de la caractériser de manière universelle (et donc également de manière mathématique). La rugosité va dépendre du contexte de son utilisation. Afin de mieux appréhender cette notion, nous allons survoler quelques domaines dans lesquels la rugosité est utilisée. La figure 2.1 illustre les différentes rugosités que l'on peut rencontrer dans quatre domaines particuliers : la

science des matériaux, la synthèse d'images (plus particulièrement le sous domaine du calcul d'éclairage local), les télécommunications et l'observation de la terre par RADAR. Nous pouvons remarquer sur la figure 2.1 que la rugosité peut représenter des choses

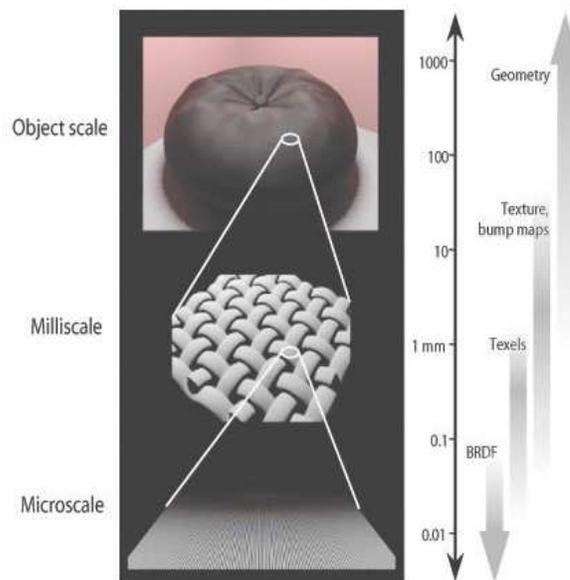


FIGURE 2.2 – Echelle de Westin

très diverses suivant le domaine d'application. Le spectre de longueur est également très varié, en partant des variations atomiques d'une structure cristalline au couvert végétal d'une forêt. Cependant le terme (ou mot) utilisé est le même quelque soit le domaine. De plus, nous pouvons remarquer que le domaine qui nous intéresse dans le cadre de ces travaux, i.e. la synthèse d'images, est également étudié par la science des matériaux. Notre démarche sera issue de ce constat. Nous allons réaliser l'état de l'art des rugosités en synthèse d'images et comparer les définitions trouvées avec celles utilisées en sciences des matériaux. Une échelle communément utilisée en synthèse d'images pour identifier la rugosité a été introduite par Westin et al. dans [WAT92]. Cette échelle est reproduite à la figure 2.2. Dans celle ci, les notions d'échelle microscopique (*microscale*) et macroscopique (*milliscale*) sont différenciées. Nous avons reporté cette séparation sur la figure 2.1. Dans le domaine macroscopique, une texture présentant une rugosité visible à l'oeil nu sera rendue à l'aide de techniques dites macroscopiques telle que le plaquage de bosselure et le déplacement de surface. Dans le cas microscopique, la rugosité est prise en compte lors du calcul de l'éclairage local dans les Fonctions de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle (FRDB). La rugosité est alors présente en tant que paramètre de la FRDB. Notre étude va tenter de présenter chaque paramètre de rugosité utilisé en synthèse d'images. Nous essayons de replacer dans un contexte physique commun cette notion en utilisant des définitions génériques issues de la science des matériaux. Ainsi, nous présentons, dans un premier temps, différentes définitions de rugosité employées à la fois en synthèse d'images et en science des matériaux. Pour chacune de ces définitions,

nous présentons une formulation mathématique de la rugosité, puis, nous présentons des modèles de FDRB utilisant cette définition. Dans un second temps, nous présentons des modèles de rugosité propre à la synthèse d'images, qui n'ont pas leur équivalent en science des matériaux. La figure 2.3 montre l'ensemble des notations prise dans ce manuscrit. Le vecteur V représente le vecteur de vue. Le vecteur S est le vecteur pointant dans la direction de la source de lumière. Le vecteur R est le vecteur colinéaire à la direction de la réflexion selon la loi de Descartes. Le vecteur N va représenter la normale à la surface et le vecteur H est le vecteur bissecteur entre S et V .

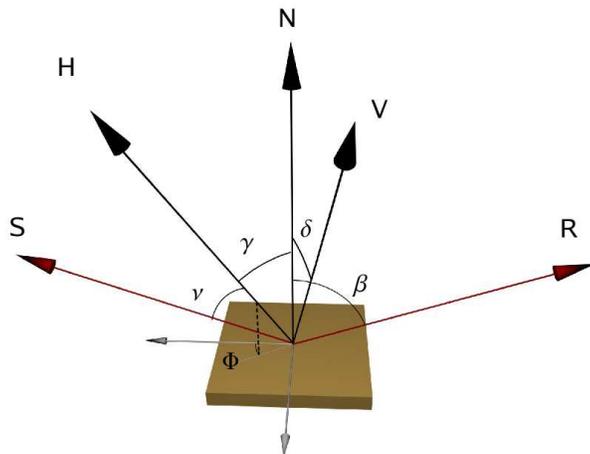


FIGURE 2.3 – Angles et vecteurs utilisés

2.2 Quelques notions de bases en science des matériaux.

Nous limitons notre étude à la caractérisation de la surface des objets. Les définitions présentées dans la section suivante sont classiquement utilisées en caractérisation de surfaces.

2.2.1 Caractéristique d'une surface réelle

Quelle que soit l'échelle, toutes les surfaces vont présenter certaines caractéristiques de bases communes. Chaque surface est ainsi composée de différentes classes d'irrégularités comme le montre le tableau 2.1

- La classe 1 appelée "shape deviation" représente la déviation globale par rapport à l'horizontale.
- La classe 2 nommée "Waviness" va permettre de prendre en compte les ondulations de la surface
- La classe 3 ou "Roughness I" est définie par les cannelures de la surface.

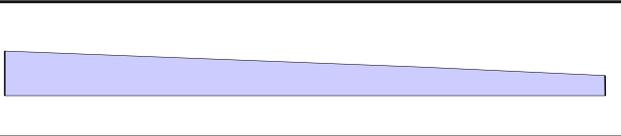
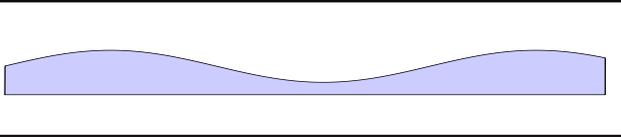
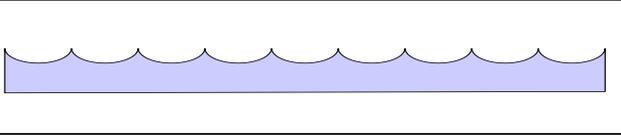
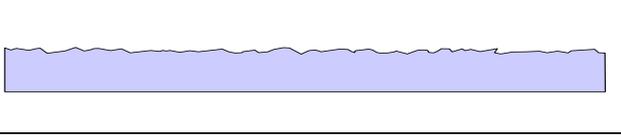
Class 1 : Shape deviation	
Class 2 : Waviness	
Class 3 : Roughness I	
Class 4 : Roughness II	
Class 5 : Roughness III	Aucune représentation possible
Class 6 : Roughness IV	Aucune représentation possible

TABLE 2.1 – Une surface réelle est composée de nombreuses classes d'irrégularités. Les principales classes sont représentées dans ce tableau.

- La classe 4 est appelée " Roughness II " est formée par les entailles, les protubérances ou les écailles.
- Les classes 5 et 6 ne peuvent être représentées sous une forme graphique. Ces classes concernent les structures cristallines internes du matériau. Elles sont nommées " Rugosité III " et " Rugosité IV ".

On peut noter que la notion même de rugosité existe sous des formes diverses et à différentes échelles. En synthèse d'images, la rugosité classiquement utilisée est la rugosité I. Les autres formes de rugosité ne sont, à notre connaissance, pas utilisées. Cependant, il est intéressant de s'intéresser aux classes 2 et 3 et plus particulièrement à la frontière existante entre ces deux classes afin de savoir où commence la notion de rugosité. Le point à partir duquel la rugosité I devient la waviness est appelé le point de coupure. Il est définie par la longueur d'onde de coupure λ_c . Aucune caractérisation absolue de cette transition n'existe. La longueur d'onde de coupure est choisie arbitrairement. A partir de ce moment et jusqu'à la fin de ce manuscrit, nous allons appeler rugosité la rugosité I définie par la classe 3.

2.2.2 Principe de mesure d'une surface

Les principales méthodes de mesures de rugosité sont normalisées par L'American Society of Mechanical Engineers (ASME). Cette organisation classe les techniques de

mesure suivant 3 méthodes :

- Mesure du profil (Ligne 1D)
- Mesure du profil de la surface.
- Méthode de moyenne de surface.

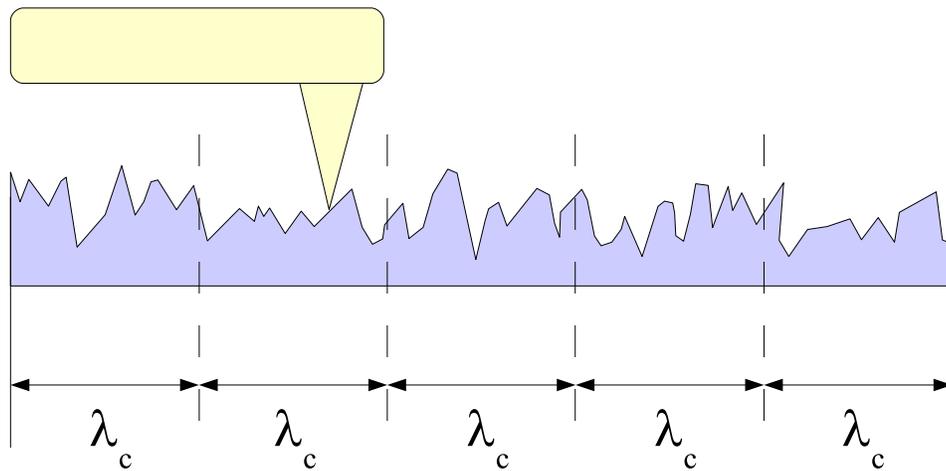


FIGURE 2.4 – Principe de mesure par profilomètre. La hauteur de surface est mesurée par un stylo mécanique.

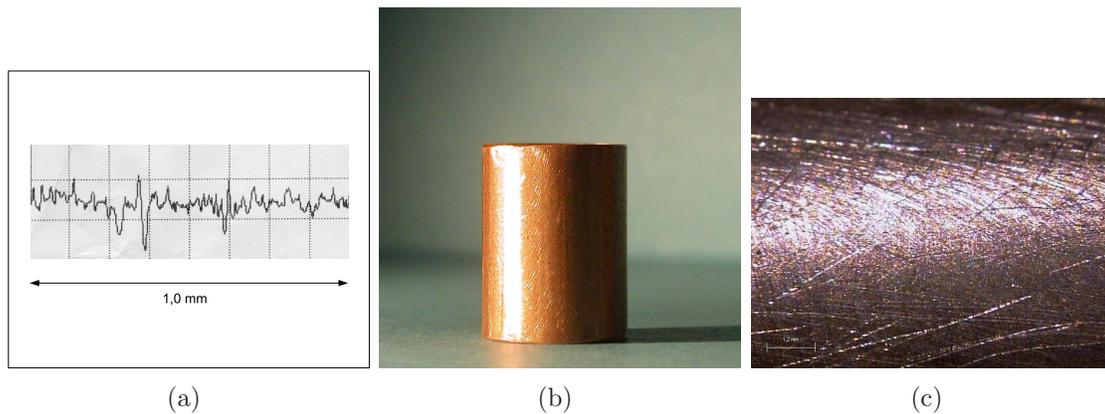


FIGURE 2.5 – (a) : Mesure d'une surface réalisée avec un profilomètre. La longueur de mesure est de 1,0mm. (b) Photographie du tuyau en cuivre utilisé pour la mesure.(c) Agrandissement à la loupe binoculaire de la surface mesurée.(16x).

La méthode de mesure du profil est la méthode la plus utilisée. Elle permet de mesurer les propriétés micro géométriques de la surface à l'aide d'un procédé mécanique appelé profilomètre. Un appareil muni d'un stylet parcourt une surface et relève l'élévation de la hauteur à intervalle régulier. La figure 2.4 schématise ce principe de mesure. Grâce à cette discrétisation, on obtient le profil de la surface noté $s(x)$. La figure 2.5 montre un exemple de mesure de profil (2.5(a)) sur un échantillon cylindrique de cuivre (2.5(b),

vue par une loupe binoculaire 2.5(c)). Cette méthode simple à mettre en oeuvre permet de mesurer de nombreux paramètres caractérisant la rugosité. Les paramètres mesurés sont appelés *paramètres R*. Ils sont massivement utilisés car très adaptés aux procédés de fabrications industriels. Ces paramètres ont fait l'objet d'une norme internationale [fS].

D'autres méthodes appelées méthodes sans contact existent et servent à mesurer un profil de surface. Ces méthodes utilisent un LASER qui va balayer la surface à mesurer. L'analyse de la lumière réfléchie va permettre de reconstruire les hauteurs de la surface.

La méthode de mesure de profil de surface est une extension 3D de la méthode de profil de surface. Cette technique peut être exécutée selon deux manières :

- Un échantillon de profil de surface est interpolé sur toute la surface.
- La surface est analysée suivant un procédé d'analyse d'image

Les paramètres 3D n'ont jamais été normalisés. C'est un travail en cours d'élaboration. Les *paramètres S* (autre nom de ces paramètres 3D) sont mesurés en utilisant les méthodes d'analyse d'image. Le lecteur notera que seront données dans ce manuscrit, dans la mesure du possible, les définitions 2D et 3D des paramètres de mesures de la rugosité décrits.

La méthode de moyennement du profil de la surface est communément décrite comme globale dans la mesure où les hauteurs ne sont pas explicitement mesurées. A la place, on va analyser en une seule passe la surface et la quantité mesurée est mise en relation avec un paramètre statistique décrivant la rugosité de cette surface.

Une comparaison des différentes méthodes pourra être trouvée en [PB95].

En synthèse d'images, seuls les paramètres issus des méthodes de mesure du profil sont utilisés. Ainsi, parmi ceux-ci, on peut distinguer en particulier :

- La longueur d'auto corrélation qui est un paramètre utilisé pour décrire la corrélation entre deux points de la surface.
- La rugosité RMS (Root mean square ou moyenne quadratique) permet une description statistique des surfaces
- La pente RMS, qui permet également la description statistique, est largement utilisée dans le cas des surfaces dites à microfacettes.

Ces paramètres sont détaillés dans les prochains paragraphes

2.3 Fonction de distribution de hauteurs de surfaces et longueur d'autocorrélation.

2.3.1 Fonction de distribution de hauteurs de surfaces

Les surfaces rugueuses naturelles peuvent être décrites en utilisant une distribution statistique de hauteur du premier ordre représentant les écarts de cette hauteur par rapport à un niveau moyen donné. La distribution Normale (aussi appelée Gaussienne) est un exemple classique (car le plus utilisé) de fonction de distribution utilisée dans ce cas. La surface est définie par un procédé stationnaire à deux variables aléatoires $h(x, y)$. L'écart type est noté σ et la valeur moyenne de ce procédé est : $\langle h \rangle = 0$. La distribution des hauteurs h est alors donnée par :

$$d(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}}$$

L'écart type est également appelé Rugosité RMS (Root Mean Square). C'est un paramètre statistique de description de la surface qui représente les variations des hauteurs de la surface autour de la moyenne des hauteurs. En accord avec les méthodes de mesures présentées, la rugosité RMS peut alors être exprimée comme suit :

$$\sigma_{RMS} = R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [s(x_i) - \overline{s(x_i)}]^2} \quad (2.1)$$

Où

La technique de mesure par 2D par profilomètre est ici utilisée.

n est le nombre de points de mesures.

$s(x_i)$ est le profil.

$\overline{s(x_i)}$ est la moyenne des hauteurs issues du profil.

$$\sigma_{RMS} = S_q = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n s^2(x_i, y_j)} \quad (2.2)$$

Où

La méthode de discrétisation de surface est utilisée.

n et m sont le nombre de points de mesures suivants les directions X et Y .

$s(x_i, y_j)$ est le profil de la surface.

Une surface rugueuse ne peut être uniquement définie par une distribution statistique de hauteur h à cause du manque d'informations et de contrôle sur la cohérence spatiale du profil mesuré. Lorsque l'on veut, à partir d'une valeur donnée de rugosité RMS, générer un profil, des résultats très différents peuvent être obtenus (Bien que ces surfaces soit issues du même procédé stochastique).

La figure 2.6 illustre cela. La fonction de distribution utilisée seule va nous permettre de contrôler uniquement les hauteurs du profil généré. Pour résoudre ce problème, un paramètre $C(\tau)$ représentant la corrélation entre deux pics de la surface séparés par une longueur τ doit être adjointe à la représentation de la surface. Beckmann et Spizzichino [BS63] proposent de représenter cette corrélation par :

$$C(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{T^2}} \quad (2.3)$$

Avec T , la longueur de corrélation telle que $C(T) = e^{-1}$.

En synthèse d'image cette représentation de surface est utilisée principalement par le modèle de FDRB de He Torrance et par le modèle de diffraction de Stam. Nous allons détailler ces modèles ci-après.

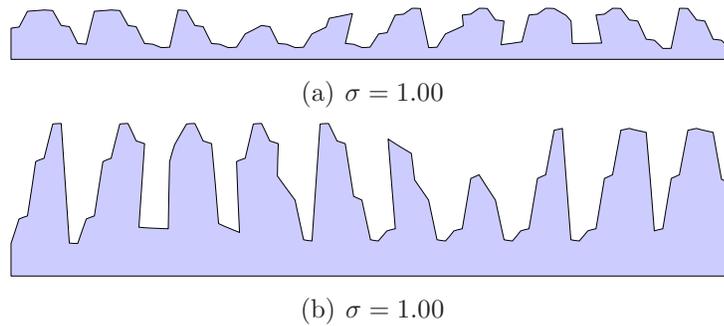


FIGURE 2.6 – Deux surfaces générées à partir du même σ peuvent être complètement différents.

2.3.2 Le modèle de He Torrance

Le modèle de He Torrance (dont l'acronyme HTSG est communément utilisé) est basé sur la théorie de la diffraction de KIRCHHOFF et l'optique ondulatoire

Le modèle est composé de trois parties :

- Le terme de réflexion spéculaire
- Le terme de réflexion diffuse uniforme
- Le terme de réflexion diffuse directionnelle.

Le modèle utilise la description de surface utilisé par Beckmann et Spizzichino et présentée au paragraphe précédent. On peut remarquer que ce modèle introduit la notion de rugosité effective. A cause du masquage et de l'ombrage, la partie de surface rugueuse effectivement soumise à la lumière incidente peut avoir une rugosité différente de la rugosité globale. (Ceci s'explique en partie par le caractère aléatoire de la description de la surface). Ainsi, on va calculer cette rugosité effective afin de prendre en compte cet effet important, notamment aux angles rasants. Cependant, ce n'est pas un paramètre de description de surface objectif, tant il dépend de la situation. (Lumière incidente, angle de réflexion, surface..). Plus de détails peuvent être trouvés sur ce modèle dans [HTSG91, HHP⁺92].

Cette FDRB est basée sur un modèle électromagnétique reconnu et une description de surface générale. C'est, à notre connaissance, le modèle le plus physique et complet de FDRB .

2.3.3 Le modèle de diffraction de Stam

Dans [Sta99], Stam décrit un modèle de FDRB permettant de prendre en compte les effets de la diffraction lumineuse. Il a étendu le modèle de He Torrance pour simuler l'anisotropie de certaines surfaces. Dans ce modèle, la surface est représentée par une fonction aléatoire de hauteur assimilée à une Gaussienne. De plus, une fonction de corrélation est également utilisée pour décrire l'apparence générale des surfaces. Du point de vue de la rugosité, le modèle utilisé est celui de Beckmann et Spizzichino. Afin de prendre en compte l'anisotropie, la fonction de corrélation a été modifiée. Les équations 2.4 et 2.5 montrent les fonctions de corrélation correspondant respectivement à des surfaces Gaussiennes et fractales.

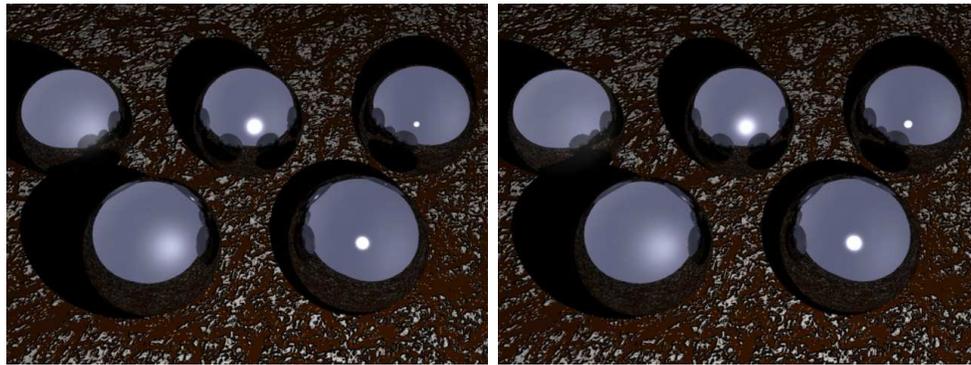
$$C_1(x, y) = e^{-\frac{x^2}{T_x^2} - \frac{y^2}{T_y^2}} \quad (2.4)$$

$$C_2(x, y) = e^{-\sqrt{\frac{x^2}{T_x^2} + \frac{y^2}{T_y^2}}} \quad (2.5)$$

T_x et T_y représentent les longueurs de corrélation de deux directions perpendiculaires sur la surface. Cela permet la représentation d'un comportement anisotropique de la surface. Les surfaces isotropes sont obtenues avec $T_x = T_y$.

2.3.4 Synthèse sur ce paramètre de rugosité

La rugosité présentée ici est paramétrée par la grandeur σ appelée rugosité RMS et par la longueur de corrélation τ . La figure 2.7 montre l'effet sur la FDRB du changement de l'un et l'autre de ces paramètres. Ainsi, on constate que quand σ diminue la surface devient plus spéculaire et le reflet spéculaire devient plus petit. Cela peut s'expliquer par la caractérisation aléatoire de la surface. En moyenne l'écart moyen entre les pics et les creux de la surface va diminuer. La surface sera donc plus lisse et le comportement vis-à-vis de la lumière sera celle d'une surface spéculaire. De même, quand τ augmente, la surface devient plus spéculaire. La corrélation contrôle la répétition du même processus sur la surface. Plus la longueur est petite, plus les changements seront rapides et la surface rugueuse. En ce qui concerne l'anisotropie, ce type de surface est simulé (modèle de Stam) en utilisant des longueurs de corrélation perpendiculaires et non corrélées. Ce procédé permet donc de définir des rugosités différentes dans les deux directions perpendiculaires X et Y. C'est la manière classique de définir l'anisotropie en synthèse d'images.



(a) $\tau = 20$, $\sigma = 2.5, 1.5, 0.7, 0.3, 0.1$

(b) $\sigma = 1.00$, $\tau = 5, 12, 20, 50, 100$

FIGURE 2.7 – Deux images représentant les effets de la rugosité sur le modèle de He Torrance . (a) montre 5 boules avec σ croissant. (b) montre 5 boules avec un τ croissant.

2.4 Pente de surface RMS.

Nous allons présenter dans cette section les surfaces décrites à l'aide de microfacettes.

2.4.1 La description de surface

En synthèse d'images, les surfaces peuvent d'être décrites en utilisant la pente RMS de surface m (aussi appelée écart type des normales locales). Ce paramètre de rugosité est moins utilisé dans l'industrie que la rugosité RMS mais est fréquemment rencontré en synthèse d'images [TS67]. La définition de ce paramètre est :

$$m_{RMS} = R_{dq} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial s(x_i)}{\partial x} \right)^2} \quad (2.6)$$

Où

n est le nombre de points de mesure

$\frac{\partial s(x_i)}{\partial x}$ est la valeur discrète de la dérivée partielle en x du profil
la technique du profilomètre est ici utilisée.

$$m_{RMS} = S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial s(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial s(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]} \quad (2.7)$$

n and m sont les nombres de points de mesures dans les directions X et Y.

$\frac{\partial s(x, y)}{\partial x}$ est la valeur discrète en x de la dérivée partielle du profil $s(x, y)$ au point (x_i, y_i)

$\frac{\partial s(x, y)}{\partial y}$ est la valeur discrète en y de la dérivée partielle du profil $s(x, y)$ au point (x_i, y_i)

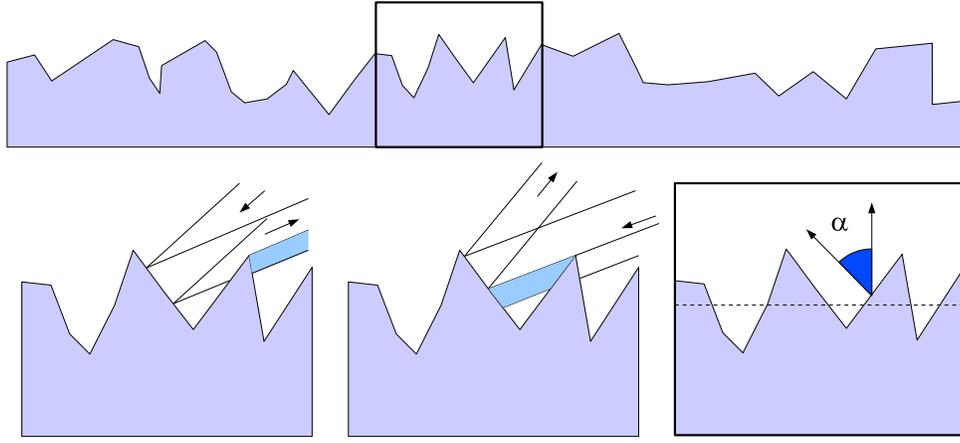
La méthode de discrétisation de surface est utilisée.

D'une manière analogue à la rugosité RMS σ , la pente RMS décrit les fluctuations des pentes de la surface autour d'une pente moyenne. Les deux paramètres sont des valeurs RMS d'une caractéristique de la surface. Ainsi, la pente RMS est adaptée à la description d'une surface à l'aide de microfacettes.

2.4.2 Le modèle de Torrance Sparrow

Le modèle de Torrance Sparrow est basé sur l'optique géométrique. Ce modèle utilise les lois de l'optique géométrique et évite la théorie électromagnétique de l'optique ondulatoire. Les approximations de l'optique géométrique sont valables dès lors que la longueur caractéristique de la surface est grande devant la longueur d'onde. Le modèle de surface utilisé ici est une distribution de microfacettes planes et parfaitement spéculaires. Une facette est définie par l'angle α entre sa normale et la normale à la surface globale (c'est-à-dire la ligne moyenne de la surface macroscopique). La distribution des angles α est réalisée à l'aide d'une fonction à une dimension (de type Gaussienne par exemple) possédant les caractéristiques suivantes : moyenne nulle et écart type σ .

la FDRB de Cook et Torrance utilise le modèle géométrique de surface de Beckmann et Spizzichino. En utilisant la séparation spéculaire/diffuse classique, la partie spéculaire peut s'écrire :

FIGURE 2.8 – Ombrage, masquage et définition de l'angle α

$$\rho_d = \frac{1}{\pi}$$

$$\rho_s = \frac{1}{\pi} \frac{F_\lambda \cdot G \cdot D}{(N \cdot S)(N \cdot V)}$$

Où :

- F_λ est le terme de Fresnel
- G est le terme Géométrique
- D est le terme de Distribution

Le terme de Fresnel

Le terme de Fresnel représente la quantité de lumière réfléchiée sur une surface calculée à partir des équations de Maxwell, ce coefficient assure de la conservation de l'énergie (grâce à la continuité sur les frontières). Le coefficient de Fresnel pour la lumière non polarisée est :

$$F_\lambda(\cos(\theta)) = \frac{1}{2} \frac{(a - \cos(\theta))^2 + b^2}{(a + \cos(\theta))^2 + b^2} \left[\frac{(a + \cos(\theta) - \frac{1}{\cos(\theta)})^2 + b^2}{(a - \cos(\theta) + \frac{1}{\cos(\theta)})^2 + b^2} + 1 \right] \quad (2.8)$$

avec :

$$a^2 = \frac{1}{2} (\sqrt{(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + \cos(\theta)^2 - 1)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2} + n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + \cos(\theta)^2 - 1) \quad (2.9)$$

$$b^2 = \frac{1}{2} (\sqrt{(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + \cos(\theta)^2 - 1)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2} - n_\lambda^2 + k_\lambda^2 - \cos(\theta)^2 + 1) \quad (2.10)$$

k_λ représente le coefficient d'extinction de la surface et n_λ est le rapport des index de réfraction des deux milieux mis en jeu. Un tel terme ne dépend pas de la rugosité de la surface.

Le terme géométrique : le masquage et l'ombrage.

Les microfacettes de la surface peuvent bloquer une partie de la lumière arrivant en un point de la surface. C'est l'ombrage. Une partie de la lumière réfléchie peut également être bloquée par un creux. Cet effet est appelé le masquage. Le terme géométrique permet de prendre en compte ces deux effets. G représente les effets de la rugosité sur la réflexion de lumière. Dans chaque creux en forme de V , l'influence du masquage et de l'ombrage est calculé en utilisant les caractéristiques de la surface. Blinn donne une première définition de ce terme en s'appuyant sur l'optique géométrique :

$$G = \min\left\{1, \frac{2(N.H)(N.V)}{(V.H)}, \frac{2(N.H)(N.S)}{(V.H)}\right\} \quad (2.11)$$

Ce terme ne fait pas intervenir explicitement la rugosité. D'autres termes, développés plus tard, comme celui de Smith [B.G67] repris par Schlick [Sch93, Sch94] font intervenir directement la rugosité m .

$$G(\cos(\delta)) = \frac{\cos(\delta)}{\cos(\delta) - k \cdot \cos(\delta) + k} \quad (2.12)$$

Où $k = \sqrt{\frac{2m^2}{\pi}}$ et m est la pente RMS de la surface.

On retrouve alors la rugosité définie par la pente RMS de surface m .

Le terme de distribution

Le terme de distribution a également été défini par Blinn. Il donne une expression simple de ce terme :

$$D = ce^{-\left(\frac{\gamma}{m}\right)^2} \quad (2.13)$$

En 1981, Cook et Torrance montrent que la distribution utilisée par Beckmann et Spizichino dans [BS63] peut décrire à la fois les diélectriques et les conducteurs qu'ils soient rugueux ou non. Cette distribution est :

$$D = \frac{e^{-\left(\frac{\tan\gamma}{m}\right)^2}}{m^2 \cos^4 \gamma} \quad (2.14)$$

where :

γ est l'angle entre les vecteurs N et H

m est la pente RMS

Ce terme dépend explicitement de la rugosité comment on peut le voir dans l'équation précédente. De plus, on remarque que la rugosité utilisée est encore la pente RMS.

2.4.3 Les autres modèles de FDRB basé sur des microfacettes

Nous décrivons dans le paragraphe suivant des FDRB reprenant le modèle de microfacettes présenté précédemment.

Le modèle de Oren et Nayar

La réflexion de la lumière sur les surfaces diffuses ayant une rugosité forte est habituellement calculée avec le modèle de Lambert. Oren et Nayar introduisent une amélioration de ce modèle en utilisant une surface à base de microfacettes permettant de prendre en compte des effets comme l'ombrage, le masquage et les interreflexions. Le modèle utilise la radiance de chaque facette $L_m(\alpha)$ (α est défini à la figure 2.8). La radiance totale sur l'hémisphère englobante est alors l'intégrale, sur toutes les facettes, du produit entre la radiance de chaque facette $L_m(\alpha)$ et la distribution d'angle $P(\alpha) = ce^{-\frac{\alpha^2}{2m^2}}$. On peut remarquer que ce terme est le même que celui de Torrance Sparrow. Le paramètre physique de rugosité utilisé est donc la pente RMS m .

Le modèle de Ward

Ward utilise un gonioréfectomètre pour mesurer les FDRBS . Grâce à cet appareil, il mesure les caractéristiques de la réflectance anisotrope et isotrope de divers matériaux. En plus des données expérimentales, il propose un modèle mathématique ajustant ses expérimentations. Il utilise le modèle de Torrance Sparrow mais en le simplifiant. Ainsi, afin de construire un modèle physique, il introduit un facteur de normalisation globale. La forme isotrope de la FDRB de Ward s'écrit alors :

$$\rho_{ISO} = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos\theta\cos\delta}} \frac{\exp[-(\frac{\tan\gamma}{m})^2]}{4\pi m^2} \quad (2.15)$$

Où ρ_d est l'éclairement diffus
 ρ_s est l'éclairement spéculaire
 m est la pente RMS

Par rapport au modèle original de Torrance Sparrow, Ward introduit le terme de Fresnel, les effets de masquage, d'ombrage et les constantes k_s et k_d dans les coefficients diffus et spéculaire. La figure 2.9 montre cinq sphères avec des rugosités décroissantes. Le reflet spéculaire est plus lumineux quand la pente RMS décroît. Le modèle peut également utiliser deux rugosités perpendiculaires et non corrélées afin de simuler des comportements anisotropiques. La forme anisotrope de la FDRB de Ward est alors :

$$\rho = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos\theta\cos\delta}} \frac{\exp[-\tan^2\gamma((\frac{\cos\phi}{m_x})^2 + (\frac{\sin\phi}{m_y})^2)]}{4\pi m^2} \quad (2.16)$$

Où m_x est la pente RMS dans la direction X
 m_y est la pente RMS dans la direction Y
 ϕ est l'angle azimutal du vecteur H

La figure 2.10 montre cinq sphères avec une pente RMS décroissante comme précédemment, le reflet spéculaire est également augmenté quand la pente RMS diminue.

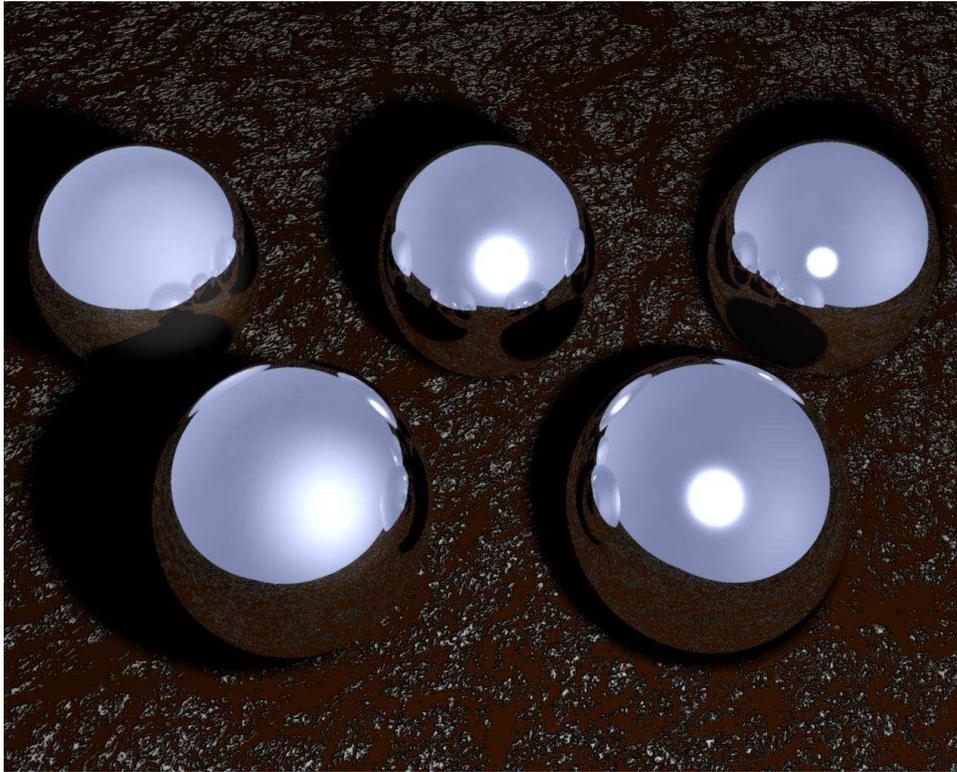


FIGURE 2.9 – Le modèle isotropique de Ward sur 5 boules ($k_d = 0$, $k_s = 1$, $m = \{0.3, 0.15, 0.1, 0.05, 0.01\}$, de gauche à droite)

Les autres modèles basés sur les microfacettes

Un grand nombre de FDRB sont basées sur une description de surface à base de microfacettes. Kelemen et al [KL05] proposent un modèle de FDRB physiquement plausible, basé sur la simplification du modèle de surface. Cependant, malgré cette simplification annoncée, la pente RMS est utilisée sans changement. Ashikminn et al. [APS00] présentent une méthode pour concevoir une FDRB à partir d'une description de la distribution de l'orientation de ses microfacettes. La rugosité est ici implicite, dérivant de la distribution utilisée. La pente RMS n'est donc pas directement utilisée mais est cachée par le modèle de microfacettes. Neumann et al. [NNSK99] modifient le modèle de Ward pour introduire de nouveaux comportements pour la réflexion, en particulier le pic de rétrodiffusion et la réflectance métallique aux angles rasants. Cependant, la description de surface utilisée, à l'origine, par Ward reste inchangée.

2.4.4 Synthèse sur la pente RMS

Comme nous venons de le voir, l'utilisation de la pente RMS de la surface comme description de la rugosité revient, en synthèse d'images, à définir une surface à l'aide de microfacettes. La FDRB de Cook et Torrance est à la base de tous les modèles fondés sur ce type de description de surfaces. Elle fait intervenir trois termes principaux qui dépendent différemment de la rugosité. Le terme de Fresnel ne dépend pas de la rugosité.



FIGURE 2.10 – Le modèle anisotrope de Ward sur 5 boules ($k_d = 0$, $k_s = 1$, $\frac{m_x}{m_y} = \frac{1}{3}$, $m_y = \{0.3, 0.15, 0.1, 0.05, 0.01\}$, de gauche à droite).

C'est un paramètre qui est directement relié aux caractéristiques internes du matériau composant la surface. Le terme géométrique représente l'ombrage et le masquage. Ces deux phénomènes sont implicitement liés à la rugosité. Cependant, certaines définitions, (comme celle de Blinn) ne prennent pas en compte la rugosité de manière explicite. D'une certaine manière, ce type de définition n'admet pas la rugosité en tant que variable du problème de l'éclairage. La rugosité est donc la même quelle que soit la surface. D'autres définitions réintroduisent ce terme et permettent de rétablir l'effet de la rugosité sur le reflet lumineux. En ce qui concerne le terme de distribution, les références à la rugosité sont directes. La pente RMS est utilisée pour caractériser l'écart type de la distribution des pentes de la surface. La figure 2.11 montre que quand la pente RMS augmente la surface devient plus rugueuse et la surface moins spéculaire. En effet, une grande valeur de m signifie de grandes fluctuations des pentes des micros facettes autour de la pente moyenne donc une surface très rugueuse.

Nous présentons dans la section suivante des modèles de rugosité spécifiquement utilisés en synthèse d'images et les FDRBS qui leurs sont associées.

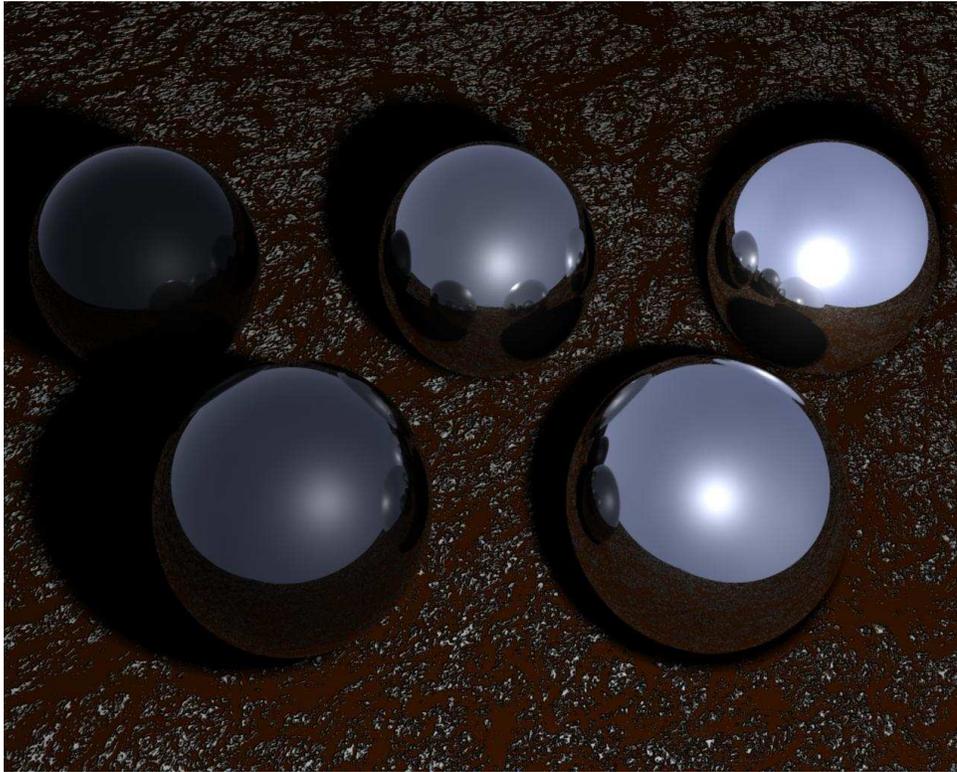


FIGURE 2.11 – FDRB de Cook et Torrance sur 5 boules ($k_d = 0.0, k_s = 1.0, n_\lambda = 1.2, m = \{1, 0.6, 0.3, 0.1, 0.01\}$ de gauche à droite).

2.5 La rugosité représentée comme l'exposant d'un cosinus.

2.5.1 Le modèle de Phong

Le modèle de Phong est classiquement donné par l'équation suivante :

$$\rho_r = k_d(N.S) + k_s F_s(S, V) \quad (2.17)$$

Phong calcule le reflet spéculaire en utilisant un cosinus élevé à une puissance entière. On peut assimiler le modèle de Phong à une irradiance venant de la direction S considéré en un point où la normale est N . L'équation 2.18 donne la formulation originelle de Phong pour calculer la partie spéculaire de la FDRB .

$$F_s(S, V) = \left\{ \begin{array}{ll} (R.V)^{n_s} & \text{if } (R.V) > 0 \\ 0 & \text{Sinon} \end{array} \right\} \quad (2.18)$$

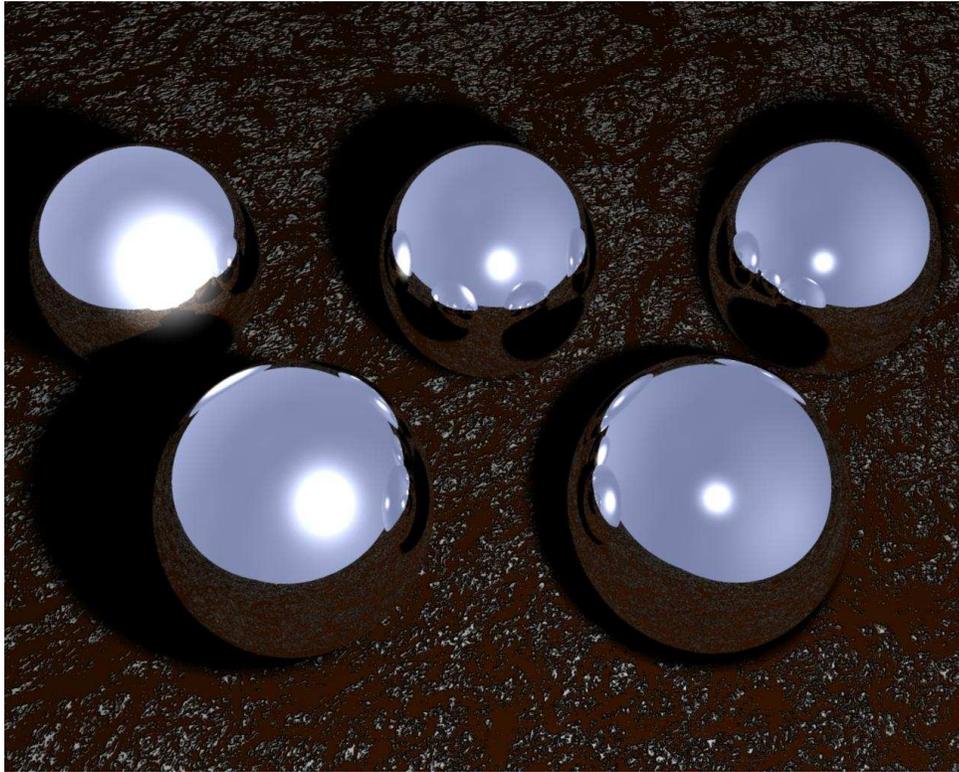


FIGURE 2.12 – La FDRB de Phong sur 5 spheres ($k_d = 0.0, k_s = 1.0, n = \{1, 10, 30, 50, 80\}$, lDe gauche à droite).

Phong donne un formalisme simple, mais efficace de l'éclairage local. Cependant, toutes les surfaces ne peuvent être rendues avec réalisme en utilisant ce modèle, en particulier les métaux. En effet, ceux-ci ont un comportement qui va changer suivant l'angle d'incidence de la lumière. Cet effet n'est pas pris en compte par ce modèle du fait de l'absence de la prise en compte du terme de Fresnel. La rugosité de la surface est assimilée à un exposant appelé n . Comme le modèle de Phong est empirique, ce paramètre n'est relié à aucun paramètre physique. La figure 2.12 montre que quand l'exposant augmente le reflet spéculaire augmente également.

2.5.2 Le modèle de Blinn-Phong.

En 1967, Blinn a travaillé sur le modèle de Phong. Il essaye de faire correspondre le modèle à des mesures d'éclairages. Blinn utilise l'équation 2.19 pour décrire le reflet spéculaire. En utilisant H , le vecteur bissecteur entre le vecteur de vue V et le vecteur d'arrivée de la lumière S , il améliore la rapidité du modèle.

$$F_s^B(S, V) = (N \cdot H)^{n_B} \quad (2.19)$$

$$H = \frac{V + S}{2} \quad (2.20)$$

Bien que plus rapide, il est aussi phénoménologique que le modèle de Phong. Afin de pallier ces défauts, Lewis ([Lew94]) essaye de donner une base physique à ces deux modèles. En effet, il va créer un nouveau modèle en essayant de respecter les principes de réciprocité des FDRBS d'une part et de conservation d'énergie d'autre part. Cette FDRB est alors définie par :

$$L_r = k_\alpha L_\alpha + k_\rho(N.S)\left[\frac{1 - k_\sigma}{\pi} + \frac{k_\sigma F_s(S, V)}{H_s(S)}\right]L_d$$

Où :

$$H_s(S) = \int_{\Omega_N} F_s(S, V')(N.V')d\omega'_r$$

$$k_\sigma = \left(1 + \frac{k_d\pi(N.S)}{k_s H_s(S)}\right)^{-1}$$

$$k_\rho = k_d\pi + k_s \frac{H_s(S)}{(N.S)}$$

$$k_\alpha = k_\rho \left[1 + k_\sigma \left(\int_{\Omega_N} (N.S') \frac{F_s(S', V)}{H_s(S')} d\omega'_i - 1\right)\right]$$

Ce dernier modèle n'est cependant pas parfait bien qu'il respecte certains principes physiques. En effet, d'autres principes tels que la rugosité (et donc la description de surface) ne sont pas pris en compte de manière physique. Ainsi à cause du modèle de rugosité utilisée (ou plutôt non utilisé), nous ne pouvons pas considérer ce modèle comme physiquement juste d'un point de vue de la surface. Au lieu d'essayer de reproduire un effet global par une fonction mathématique, le modèle doit s'employer à utiliser une description de surface plus physique.

2.5.3 Le modèle d'Ashikminn Phong

Une autre forme du modèle de Phong peut être trouvée dans [AS00]. Ce modèle introduit le comportement anisotropique des surfaces dans le modèle de Phong. Il utilise les approximations de Schlick afin de simuler les termes de Fresnel. La formulation mathématique de ce modèle est donné dans l'équation 2.21.

$$\rho(S, V) = \rho_s(S, V) + \rho_d(S, V) \tag{2.21}$$

$$\rho_s(S, V) = \frac{\sqrt{(n_u + 1)(n_v + 1)}}{8\pi} \frac{(N.H)^{n_x \cos^2 \phi + n_y \sin^2 \phi}}{(H.S) \cdot \max((N.S)(N.V))} F_\lambda(S.H) \tag{2.22}$$

$$F_\lambda(S.H) = k_s + (1 - k_s)(1 - (S.H))^5$$

$$\rho_d(S, V) = \frac{28k_d}{23\pi} (1 - R_s) \left(1 - \left(1 - \frac{(N.S)}{2}\right)^5\right) \left(1 - \left(1 - \frac{(N.V)}{2}\right)^5\right) \quad (2.23)$$

Dans ce modèle, la rugosité est simulée en utilisant la puissance du cosinus. Cet exposant est défini par :

$$n_x \cos^2 \phi + n_y \sin^2 \phi \quad (2.24)$$

Les paramètres n_u et n_v vont simuler deux rugosités perpendiculaires et non corrélés. Le moyen utilisé pour simuler l'anisotropie est similaire à celui utilisé par Ward ou Stam. Comme pour les modèles précédents la rugosité utilisée ici n'est pas physique.

2.5.4 Modèle de Strauss

Comme habituellement en synthèse d'images, la FDRB de la surface est la somme d'un terme diffus et d'un terme spéculaire.

$$\rho = k_d \rho_d + k_s \rho_s \quad (2.25)$$

Le terme diffus de Strauss est décrit par l'équation :

$$\rho_d = f_d(N.S) d_a \quad (2.26)$$

$$f_d = (1 - s^3)(1 - t)$$

$$d_a = 1 - m.s$$

On peut tout d'abord noter que, par rapport aux autres modèles, le terme diffus est paramétré par s et t représentant la *smoothness* et la *transparence* de la surface. Ces termes ne sont pas définis physiquement. Le terme de réflexion spéculaire de Strauss est basé sur le modèle de Phong

$$\rho_s = -(R.V)^h s_a s_c \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} h &= \frac{3}{1-s} \\ s_a &= \min(1, r_n + (r_n + k_b)b) \\ r_n &= (1 - t) - f_r^d \\ S_c &= 1 + m(1 - F(\theta))(C(\lambda) - 1) \\ b &= F(\theta)G(\theta)G(\gamma) \end{aligned}$$

F simule les effets de Fresnel et G simule le terme géométrique (masquage et ombrage). Les expressions de F et G sont données par les équations 2.28 et 2.29. Les valeurs typiques de k_f et k_s sont données par Strauss ($k_f = 1.12, k_s = 1.01$).

$$F(x) = \frac{\frac{1}{(x-k_f)^2} - \frac{1}{k_f^2}}{\frac{1}{(1-k_f)^2} - \frac{1}{k_f^2}} \quad (2.28)$$

$$G(x) = \frac{\frac{1}{(1-k_g)^2} - \frac{1}{(x-k_g)^2}}{\frac{1}{(1-k_g)^2} - \frac{1}{k_g^2}} \quad (2.29)$$

Dans le terme spéculaire défini à l'équation 2.27, nous trouvons une structure identique au modèle de Phong. Le reflet spéculaire est un cosinus élevé à une puissance. Dans ce modèle, la rugosité peut être vu comme l'inverse du terme s qui caractérise le caractère *lisse* de la surface (*smoothness*, que l'on pourrait traduire par le néologisme *lissitude*). De cette manière, la puissance du cosinus nommé h peut être reliée à la rugosité n du modèle de Phong.

2.5.5 FDRB compacte de matériaux métalliques

Les modèle de Phong et Blinn ont été modifiés pour prendre en compte les effets métalliques des FDRBS dans [NNSK99]. La valeur de la rugosité est gardée comme dans les modèles originaux. Du strict point de vue de la rugosité, aucun nouveau modèle de rugosité ou de description de surface n'est ici proposé. L'équation 2.30 met en évidence la rugosité dans le terme spéculaire de ce modèle.

$$\rho = C_n \cdot \frac{(H.N)^n}{\max((N.L), (N.V))} \quad (2.30)$$

2.6 Les autres modèles de rugosité

Nous allons présenter dans cette partie les FDRBS basées sur des descriptions de surfaces spécifiques. En particulier, nous décrirons le modèle de Poulin Fournier qui est, historiquement, le premier modèle anisotropique en synthèse d'images

2.6.1 le modèle de Poulin Fournier

Miller [Mil88] utilise des cylindres pour simuler le comportement anisotropique de certaines surfaces. Poulin Fournier ont suivi ce principe en affirmant qu'un certain nombre de cylindres peuvent être utilisés pour simuler de fins sillons sur la surface. Ils introduisent alors des notions de description de surface cylindrique positive et négative (ou transparente), selon que des bosses ou des creux forment la surface. Les auteurs ont développé leur modèle autour de cette géométrie présentée à la figure 2.13. Au contraire de la projection de la normale suivant l'axe des cylindres, la projection de la normale suivant la section de ceux-ci varie. Cette différence va induire le comportement anisotropique de la surface. Dans ce modèle, certains paramètres contrôlent l'anisotropie : la distance entre deux cylindres adjacents d et la hauteur d'enfouissement des cylindres h . L'éclairement de la surface, dans une direction choisie, est la somme de l'éclairement de la surface créée, d'une part, par la portion de surface où il n'y a pas de cylindres et, d'autre part, par la

portion de cylindres visibles. De plus, Poulin Fournier ajoutent l'ombrage et le masquage à leur modèle. Cependant, aucune référence à la rugosité n'est faite explicitement. La description de la surface utilisée fait paraître une rugosité sous-jacente mais non exprimée directement. Cette description est reproduite à la figure 2.13.

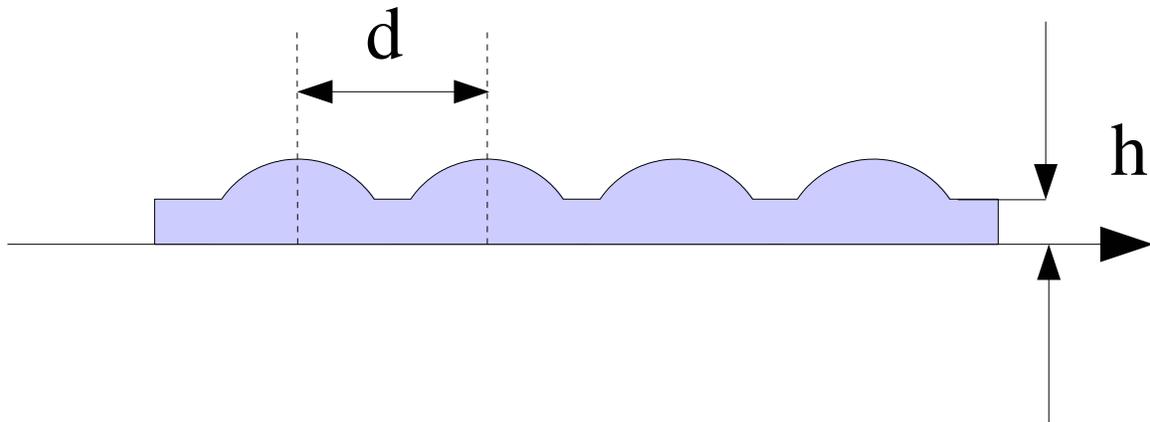


FIGURE 2.13 – Exemple d’une description de surface dite à *cylindre positif* (modèle de Poulin Fournier)

2.6.2 Les FDRBS modélisées à partir de famille de fonction.

Certaines FDRBS sont modélisées à partir de fonctions de base. Par nature, ces FDRBS intègrent la rugosité dans les fonctions qu’elles approchent. Une description physique ou mathématique de la notion de rugosité est ici sans objet. On peut citer parmi ces modèles les modèles de Lafortune. [LFTG97].

2.6.3 Les modèles basés sur des mesures

Certaines FDRBS sont basées sur des mesures d’éclairement. Dans ces modèles, la rugosité est directement incluse dans les surfaces que l’on mesure. Cette rugosité se retrouve donc implicitement dans les résultats de la mesure est donc dans le modèle final. La seule façon d’avoir la rugosité utilisée par ces modèles et de mesurer directement la rugosité sur les échantillons par une des techniques vues à la section 2.2.2. Ces modèles sont par exemple les modèles de Matusik [MPBM03, WHML03] ou Ngan [NDM05, NDM06].

2.7 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section la notion de rugosité en synthèse d’images. Dans un premier temps, nous avons présenté quelques notions utilisées dans le cadre de la caractérisation de surfaces. En se basant sur ces notions, nous avons essayé de présenter

les rugosités utilisées en synthèse d'images d'une manière physique. En utilisant les définitions identiques du domaine de la science des matériaux et de la synthèse d'images, nous avons identifié deux principales rugosités : la rugosité RMS σ basée sur une description statistique de hauteur de surfaces et la rugosité de pente RMS m qui est largement utilisée dans les modèles dits à microfacettes. Cependant d'autres types de rugosité sont utilisés en synthèse d'images de manière originales. Ainsi, le modèle de FDRB le plus utilisé c'est à dire le modèle de Phong utilise une représentation de rugosité sous la forme d'une puissance de cosinus. Cette manière de représenter la rugosité d'une surfaces n'a, cependant, pas d'équivalent en science des matériaux.

3

Extension de la notion de la rugosité

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la notion de rugosité utilisée en synthèse était principalement retrouvée dans le calcul de l'éclairement local. La notion de rugosité ainsi utilisée peut être de nature très variée. Mais on peut facilement trouver deux catégories de rugosité :

- Les rugosités physiques : Issue de la caractérisation des matériaux, la définition de la rugosité est basée sur une observation physique du comportement de la rugosité surfacique. Ce sont les modèles de surface en microfacettes et à distribution de hauteurs
- Les rugosités empiriques : Issu de l'expérience, le terme de rugosité est identifié à cause du comportement global qu'il induit sur l'éclairement local.

Le travail que nous avons réalisé consiste dans un premier temps à essayer de montrer les liens existant entre les différentes définitions de la rugosité. Nous aboutissons à la définition globale de la rugosité dans le cadre des FDRBS .

Dans un second temps et suite à la nouvelle définition de la rugosité dans les FDRBS, nous avons essayé d'introduire des rugosités originales issues de nos observations.

3.2 Vers une notion commune de rugosité

Dans chaque modèle de rugosité présenté au chapitre précédent, nous avons mis en évidence la présence d'une description de rugosité surfacique (qu'elle soit implicite ou explicite). Dans les modèles classiquement utilisés, la rugosité est concentrée dans un terme unique. Cependant, on peut remarquer que les différentes définitions utilisées ne sont, au final, pas très différentes les unes des autres. Nous allons retracer dans cette section les liens entre ces différentes définitions. Nous essayons également de donner à ces définitions un socle commun dans le but de ne retenir qu'une seule formulation finale. Le point de départ de notre réflexion sera le modèle de He Torrance. A notre connaissance, c'est le modèle le plus physiquement réaliste du point de vue de la rugosité. He et al. ont utilisé une distribution de hauteurs Gaussienne accompagnées d'une longueur de corrélation pour décrire la géométrie de la surface.

La figure 3.1 montre la distribution des hauteurs de la surface en utilisant un σ spécifique. La figure 3.2 montre le modèle de He Torrance qui utilise cette distribution.

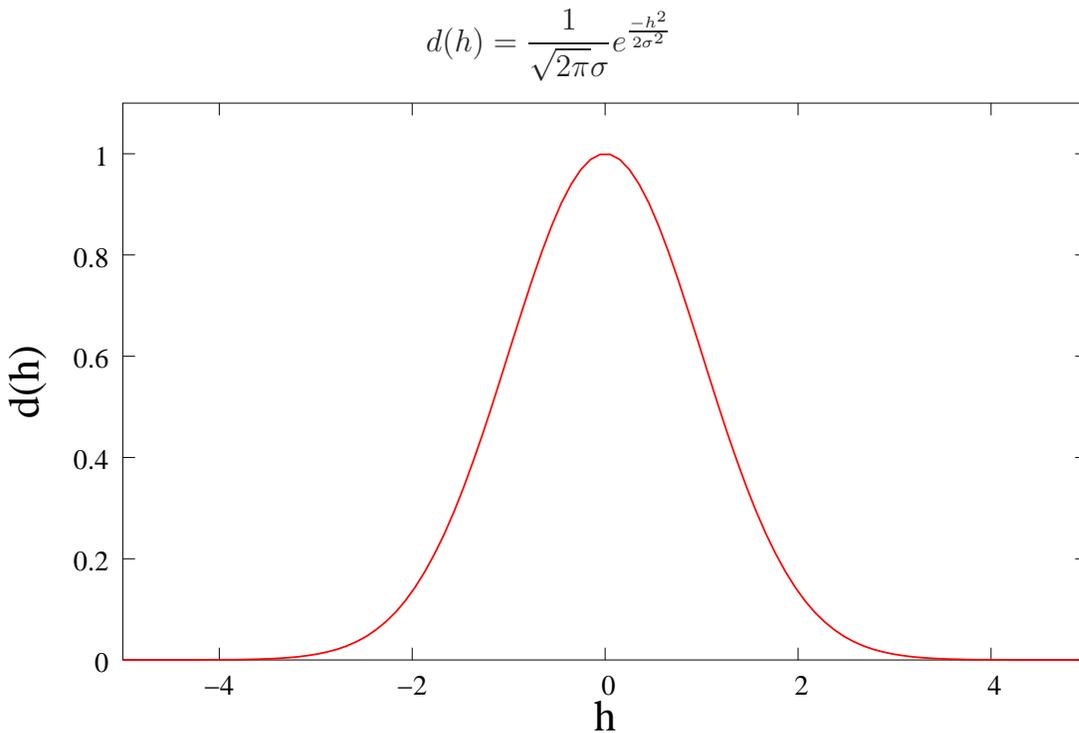


FIGURE 3.1 – la distribution des hauteurs de la surface $d(h)$ ($\sigma_h = 1$).

3.2.1 Une description de surface physique : Le modèle de Beckmann et Spizzichinno

Dans [BS63], Beckmann et Spizzichinno décrivent les réflexions des ondes électromagnétiques sur une surface rugueuse. De manière à modéliser la surface, il utilise le modèle décrit dans le chapitre précédent. Il explique aussi comment, à partir du même cadre physique, formuler une description de surfaces à bases de microfacettes. En considérant la définition de l'angle α (identique à celui décrit dans le modèle de Torrance Sparrow et rappelé à la figure 2.8), la distribution des pentes de la surface décrites en microfacettes peut s'écrire :

$$d(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \tan \beta_0 \cos^2 \alpha} e^{-\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta_0}\right)^2}$$

Ce modèle est le même que celui utilisé par Cook et Torrance. Ainsi, un lien mathématique et physique existe entre ces deux méthodes de description de l'état de la surface.

Le paramètre $\tan \beta_0$ peut être interprété comme l'écart type de la loi Normale décrivant la distribution des angles des pentes de la surface. C'est la définition de la rugosité de pente RMS m comme décrite au chapitre suivant. De plus, Beckmann et Spizzichinno donnent dans [BS63], une relation mathématique entre, d'un côté, la pente RMS m et, de l'autre, la rugosité RMS σ et la longueur d'autocorrélation T :

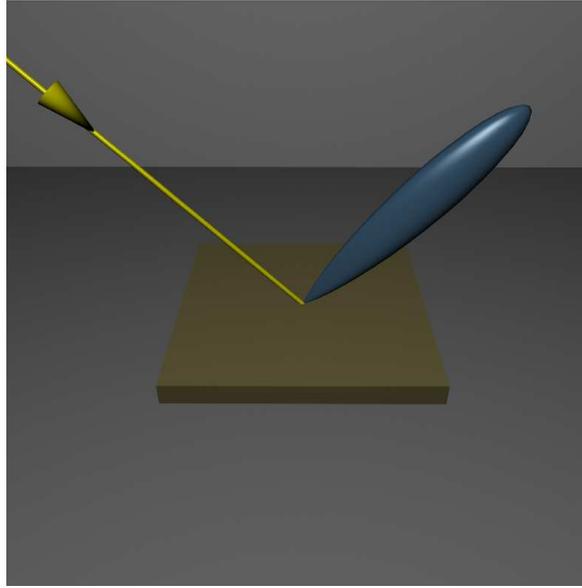


FIGURE 3.2 – une FDRB spéculaire utilisant $d(h)$ ($n = 1.6 - 0.2j$, $t = 20$, $k_d = 0.0$, $k_s = 1.0$).

$$m = \tan \beta_0 = \frac{2\sigma}{T} \quad (3.1)$$

On peut donc en déduire que le modèle de Cook et Torrance utilise un modèle de description de surfaces qui est physiquement validé. Pour une surface réelle donnée, il est possible de mesurer les paramètres σ et T (par une des méthodes présentées au chapitre précédent). On peut alors en déduire m et une description statistique de la surface en utilisant la formule 3.1.

Cependant, cette transformation n'est pas bijective. Avec la connaissance de la pente RMS, il n'est pas possible de déduire de manière unique la rugosité RMS et la longueur d'autocorrélation. Nous ne pouvons déduire qu'une famille de couple (σ, T) possible, chaque couple permettant de décrire une surface différente à l'aide du modèle de He Torrance.

Le modèle de Ward prend en compte le comportement anisotrope des surfaces. La forme isotropique du modèle de Ward utilise une description de surface similaire à la description du modèle de Cook et Torrance. La méthode appliquée précédemment peut alors être utilisée sur ce modèle, afin de trouver une rugosité de pente RMS. Cependant, de manière à dégager une expression de rugosité commune, nous devons modifier le terme de rugosité défini par Ward. De cette manière, nous pourrions appliquer l'approximation des pentes de surface à ce modèle. Ainsi, nous introduisons un coefficient de correction $\frac{1}{\cos^4 \gamma}$ à ce modèle pour trouver :

$$\rho_{ISO} = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos \theta \cos \delta}} \frac{\exp[-(\frac{\tan \gamma}{m})^2]}{4\pi m^2 \cos^4 \gamma} \quad (3.2)$$

La même correction peut être appliquée à la forme anisotropique de ce modèle.

Le modèle de Schlick utilise une approximation de la distribution des pentes de la surface de Beckmann et Spizzichino en gardant le terme de rugosité des pentes m . La validité physique est alors héritée du modèle approximé.

3.2.2 Les modèles empiriques

Dans les modèles dérivés du modèle de Phong on utilise une rugosité en exposant de cosinus. Dans le modèle originel, le paramètre n peut être interprété comme une rugosité de surface. En faisant varier n , nous faisons varier la spécularité de la surface représentée. Ce paramètre n'est pas lié à une quelconque théorie physique. Cependant, on peut remarquer que la fonction mathématique \cos^n approche une fonction Normale. Grâce à cette observation, nous pouvons en déduire qu'il est possible d'approcher une distribution de hauteurs de surface par une fonction \cos^n . La distribution de rugosité du modèle de Phong est alors :

$$d(\nu) = (R.V)^n \quad (3.3)$$

Pour des raisons de commodité, nous appellerons cette fonction particulière *la fonction de distribution de Phong*. Dans la distribution de Beckmann et Spizzichino la variable est l'angle γ (voir figure 2.3). Afin de comparer les distributions, nous devons faire un changement de variables dans la fonction de distribution de Phong. Considérant la figure 2.3 et le cas où les vecteurs sont dans le même plan, nous pouvons alors dire :

$$\theta = \nu + \delta$$

$$\beta = \delta + \gamma$$

$$\theta = \gamma + \beta$$

nous remarquons que :

$$\nu + \delta = \gamma + \beta$$

et :

$$\nu + \delta = 2\gamma + \delta$$

pour finir :

$$\nu = 2\gamma$$

Quand les vecteurs ne sont pas dans le même plan, la projection des vecteurs sur un plan commun va introduire une approximation qui n'influencera pas notre méthode. Le coefficient de projection pourra facilement s'intégrer dans les coefficients diffus et spéculaire. On peut alors faire correspondre les distributions empiriquement en faisant varier les paramètres de la distribution normale. Comme dans le modèle de Cook et Torrance nous pouvons déduire d'une surface réelle le paramètre n qui peut être utilisé pour calculer l'éclairement de la surface. La méthode est alors la suivante : à partir du modèle de Cook et Torrance, nous utilisons le terme de pente RMS m comme défini dans le paragraphe précédent minimisant l'erreur entre les deux distributions (d'un côté celle de Phong et de l'autre celle de Cook et Torrance. Par exemple, en prenant une surface ayant une longueur de corrélation $T = 0.8$ et $\sigma = 0.2$, nous pouvons calculer la pente RMS

$m = \tan \beta_0 = \frac{2 \times 0.2}{0.8} = 0.32$. la figure 3.3 montre la distribution de Beckmann en utilisant une pente RMS $m = 0.32$.

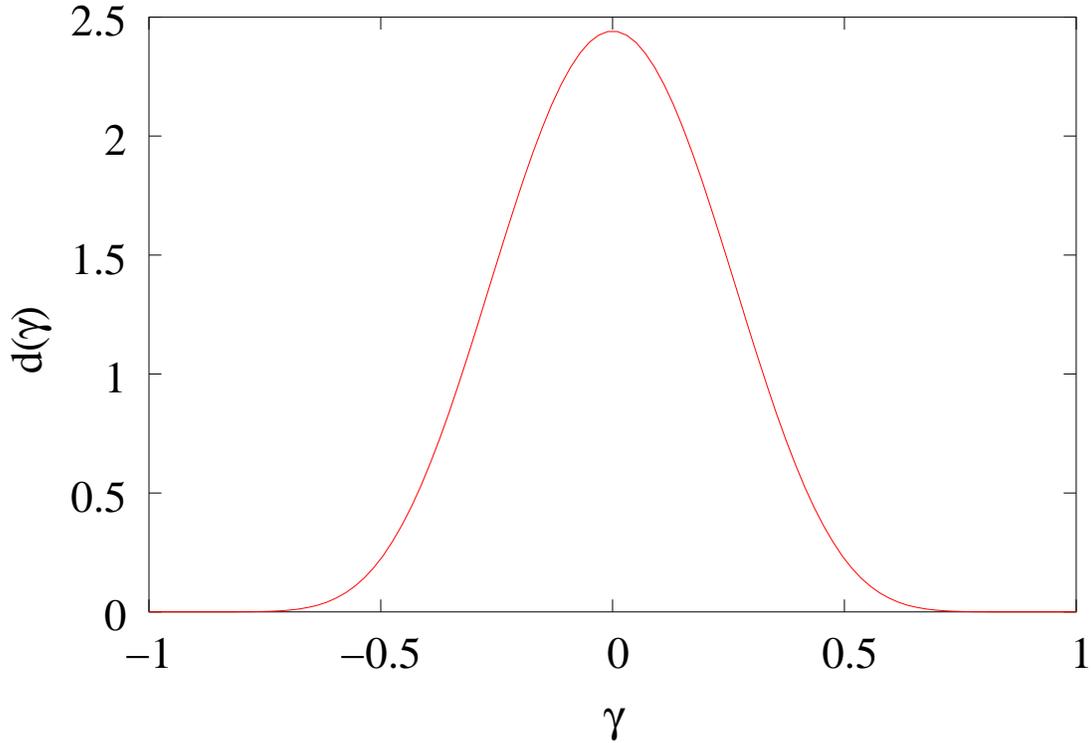


FIGURE 3.3 – La distribution de Beckmann en utilisant une pente RMS $m = 0.32$

Ensuite, nous faisons correspondre les deux fonctions de distribution. Nous trouvons expérimentalement que la valeur $n = 4$ donne une bonne approximation. Afin de comparer, les niveaux ont été ajustés. Nous avons ajouté un terme de correction $\frac{1}{4m^2}$. Ce terme peut être vu comme extrait des coefficients diffus et spéculaire. De plus il est facile de respecter la condition de Lewis $k_d + k_s = 1$ en utilisant $k_s = \frac{1}{4m^2}$. Nous pouvons remarquer que sur la majeure partie de notre approximation, les deux courbes sont quasiment confondues. L'approximation est donc dans ce cas très bonne. La figure 3.4 montre ces deux distributions. Nous pouvons, de manière similaire, déduire depuis une distribution de Phong, les paramètres permettant de retrouver une pente RMS et nous pouvons alors obtenir une surface physiquement plausible.

Cependant, le paramètre n limite cette approximation. À cause de la définition de n , une surface parfaitement diffuse peut être représentée grâce à $n = 1$. Nous pouvons alors en déduire la valeur m_{max} qui représente la plus grande valeur de m qui peut être obtenu par cette méthode. La distribution de Phong correspondant est montrée à la figure 3.5. Nous y avons également représenté la distribution de Beckmann et Spizzichinno avec le paramètre $m_{max} = 0.51$.

Nous pouvons aussi déduire une distribution depuis le modèle de Blinn :

$$d(\gamma) = (N.H)^n$$

Dans ce cas, il n'y a pas de problèmes à propos de l'angle de la distribution car les

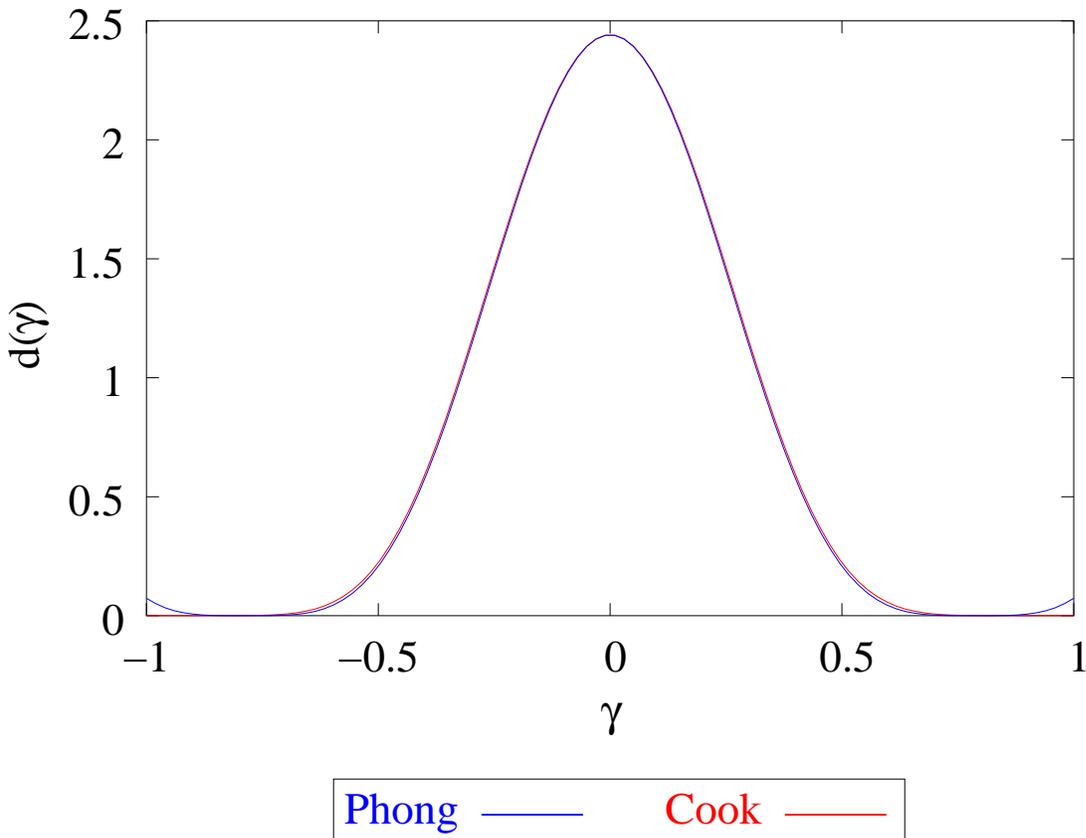


FIGURE 3.4 – La distribution de Cook et la distribution de Phong avec respectivement $m = 0.32$ et $n = 4$.

angles utilisés dans les deux modèles sont les mêmes. Nous pourrions alors utiliser la même méthode que celle décrite précédemment. Il est ainsi possible de modéliser une surface physiquement plausible en utilisant le modèle de Blinn. Ainsi, avec les distributions $\sigma = 0.2$, $m = 0.8$, nous pouvons utiliser une distribution de Blinn (nom donné à la rugosité dans le cas de ce modèle) avec $n_B = 17$. la figure 3.6 montre ce cas. Nous avons également du ajouter le terme de correction scalaire comme précédemment ayant pour valeur $\frac{1}{4m^2}$.

Cependant, la plus petite valeur de n_B ne peut pas représenter de manière satisfaisante une distribution de Beckmann. La figure 3.7 montre que avec $n_B = 4$ la distribution de Beckmann utilisant $m = 0.54$ est la plus satisfaisante. Cependant, ce n'est clairement pas une bonne approximation même si la silhouette globale est préservée.

Le modèle d'Ashikminn appartient à la famille des modèles de Phong. Il est principalement utilisé pour le rendu des surfaces anisotropiques. Une méthode similaire pour ce genre de surface peut alors être imaginée. La distribution de référence que nous prendrons est alors la distribution utilisée dans le modèle de Ward :

$$d(\gamma) = \frac{\exp[-\tan^2 \gamma (\frac{\cos^2 \phi}{m_x^2} + \frac{\sin^2 \phi}{m_y^2})]}{4m^2 \cos^4 \gamma}$$

En effet, nous devons comparer les paramètres n_u et n_v du modèle d'Ashikminn et

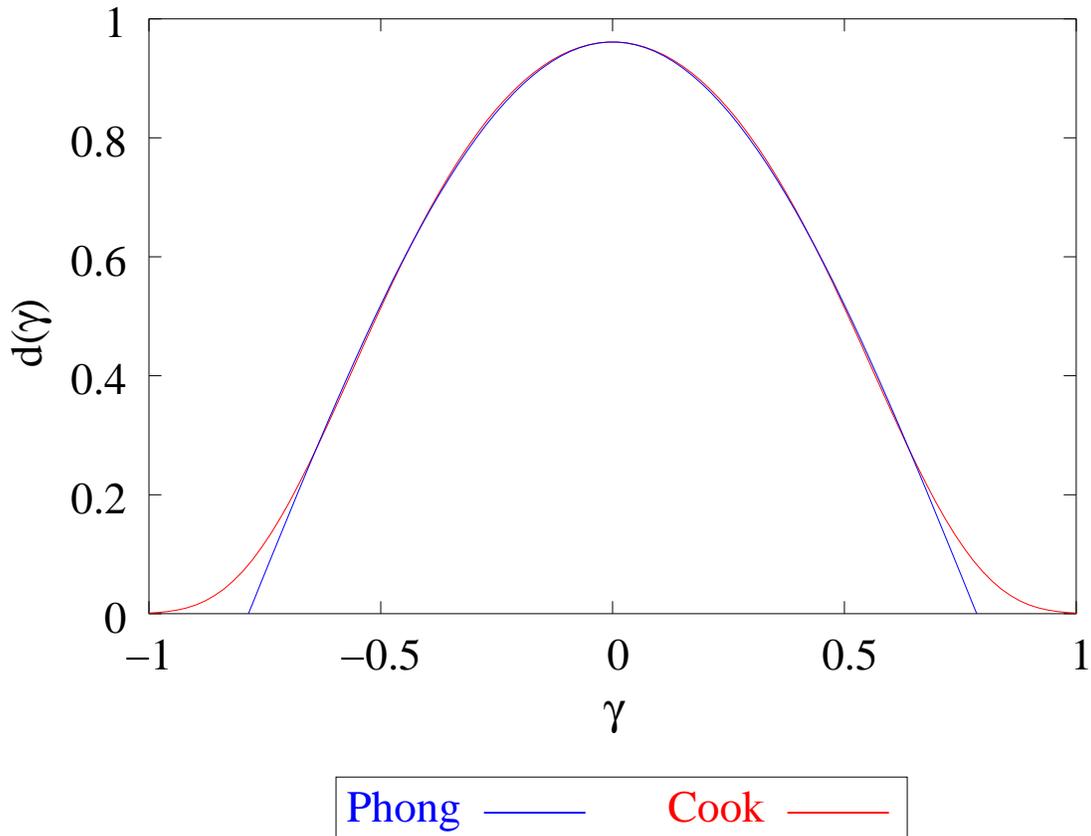


FIGURE 3.5 – Les limites de l’approximation de la distribution de Beckmann ($m = 0.51$) par la distribution de Phong ($n = 1$)

les paramètres σ_x et σ_y du modèle de Ward. La Figure 3.8 montre une approximation de la distribution de Ward ($m_x = 0.1$, $m_y = 0.8$) par la distribution d’Ashikminn ($n_u = 10, n_v = 187$). Cependant la solution trouvée n’est pas unique, les couples possibles de solutions sont alors nombreux. Pour s’en convaincre la figure 3.9 montre l’approximation d’une distribution de Ward ($m_x = 0.1$, $m_y = 0.8$) en utilisant $n_u = 100$, $n_v = 100$. Afin de pallier ce problème, nous choisissons d’essayer de conserver un rapport constant entre les deux paramètres. L’introduction de cette contrainte nous permet d’alors de ne choisir qu’un seul couple au final (notre critère utilise le rapport $\frac{m_x}{m_y}$).

3.2.3 Une notion commune de rugosité

Ce travail permet de trouver une notion de rugosité commune à la majeure partie des FDRBS analytiques. De plus, nous pouvons justifier la représentation des surfaces utilisée par les modèles phénoménologiques issus du modèle de Phong. Dans la technique de rendu de Path Tracing, la réflexion de la surface suit de manière générale le modèle de réflexion de Phong. Grâce à la méthode présentée dans les paragraphes précédents, nous pouvons justifier l’utilisation de paramètres spécifiques pour la représentation d’une surface réelle connue. Certains travaux sur l’importance sampling [LRR04] donnent la possibilité d’utiliser d’autres FDRBS afin de réaliser ce calcul d’éclairement. Cependant,

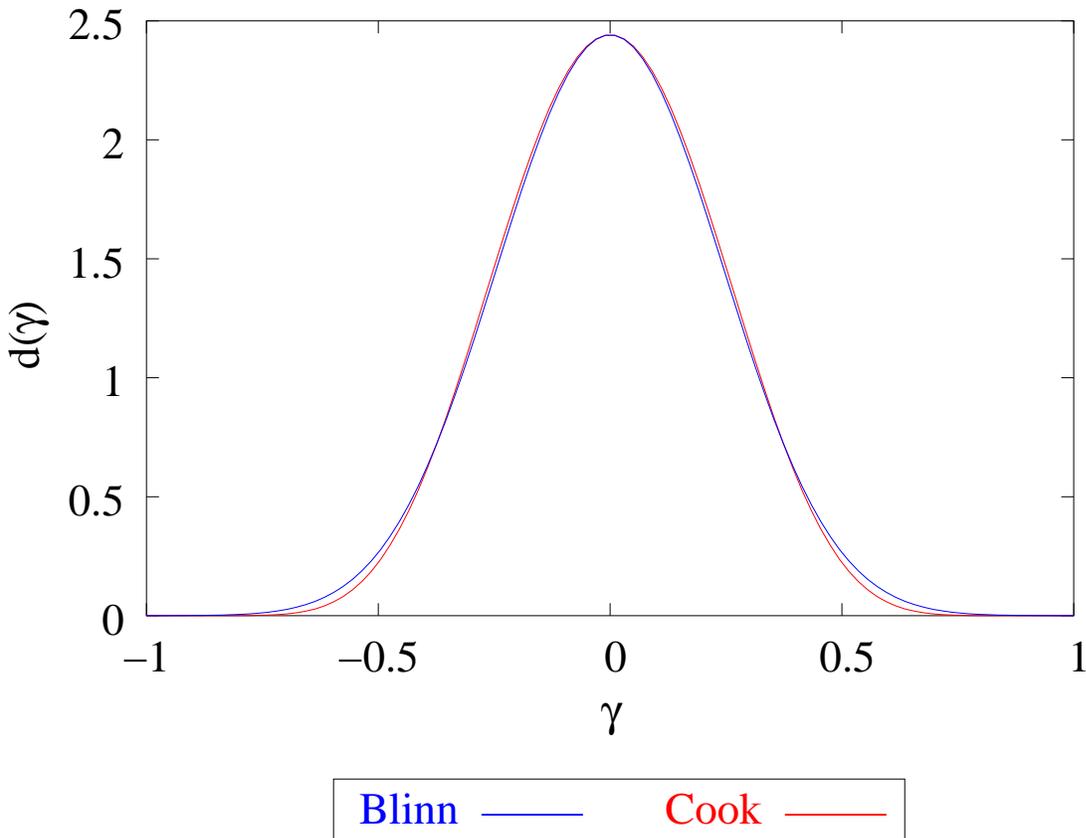


FIGURE 3.6 – La distribution de Blinn ($n_B = 17$) approchant la distribution de Beckmann ($m = 0.32$).

la simplicité de la formulation de Phong apporte l'avantage de la rapidité. Notre méthode permet également d'ajouter une notion de surface physiquement plausible à un Path Tracer utilisant le modèle de Phong échantillonné.

Nous présentons à la figure 3.10 quelques résultats de simulations.

Afin de résumer cette étude, nous pouvons remarquer que la rugosité est toujours incluse dans une distribution statistique. Cette distribution représente les valeurs prises par la hauteur ou les pentes des microfacettes. (la distribution des pentes de la surface représente l'approximation au 1er ordre de la distribution de hauteur comme définie par [BS63], le modèle de Phong a été conçu de manière à représenter le comportement par une fonction purement mathématique et on peut également la considérer comme une approximation de la fonction de hauteur Gaussienne). Ces fonctions de distributions représentant toutes la même grandeur, on peut les rassembler sous la même appellation. Nous avons décidé de nommer ces distributions du nom de "*Rugosité générale*". Le tableau 3.1 montre l'ensemble des modèles présentés et leur rugosité généralisée. La figure 3.11 montre l'utilisation de notre méthode pour représenter des surfaces présentant une rugosité générale identique sur une scène complète. La première chose que l'on peut remarquer est que la complexité des phénomènes ne permet pas d'obtenir une similitude forte sur les surfaces. Une étude globale des FDRBS doit être réalisée pour permettre de trouver des similitudes sur les

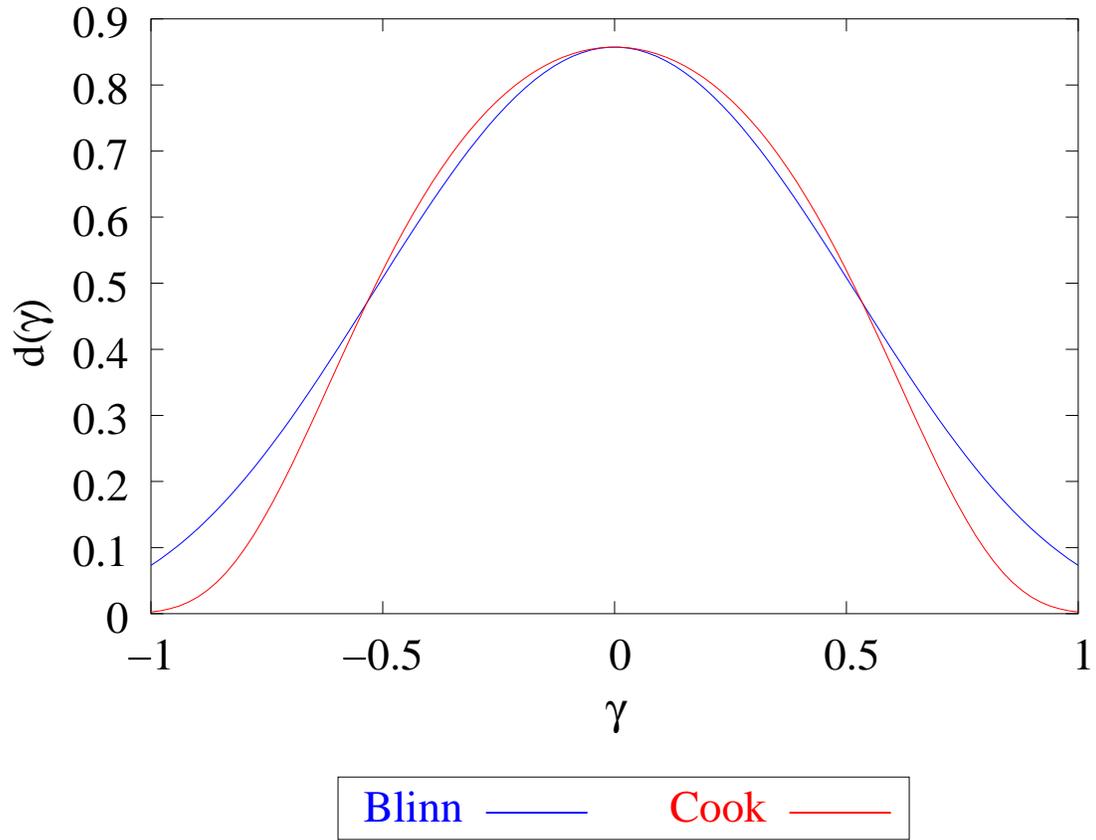


FIGURE 3.7 – La distribution de Beckmann ($m = 0.54$) approchant la distribution de Blinn($n_B = 4$).

fonctions 3D.

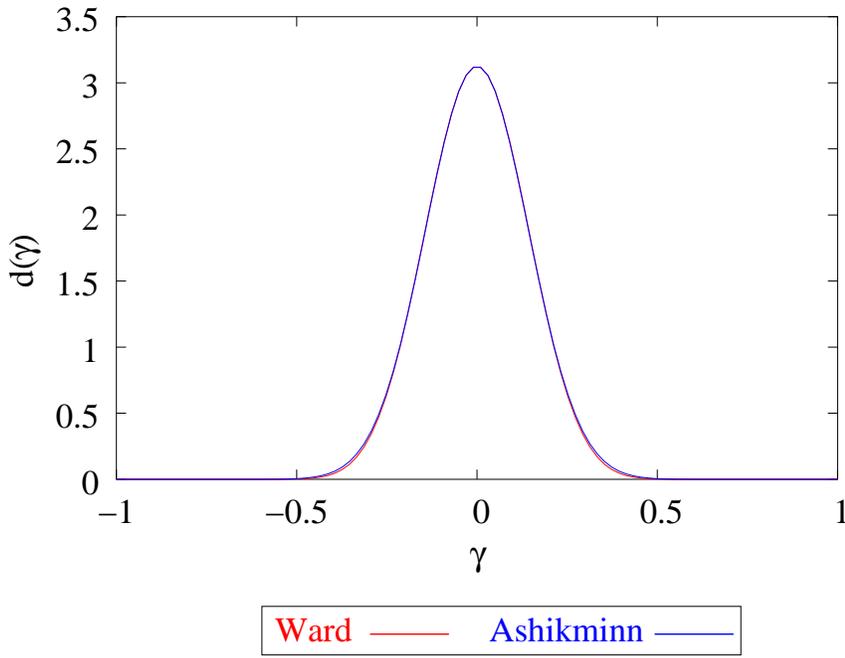


FIGURE 3.8 – La distribution de Ward ($m_x = 0.1, m_y = 0.8$) et la distribution d’Ashikminn ($n_u = 10, n_v = 187$).

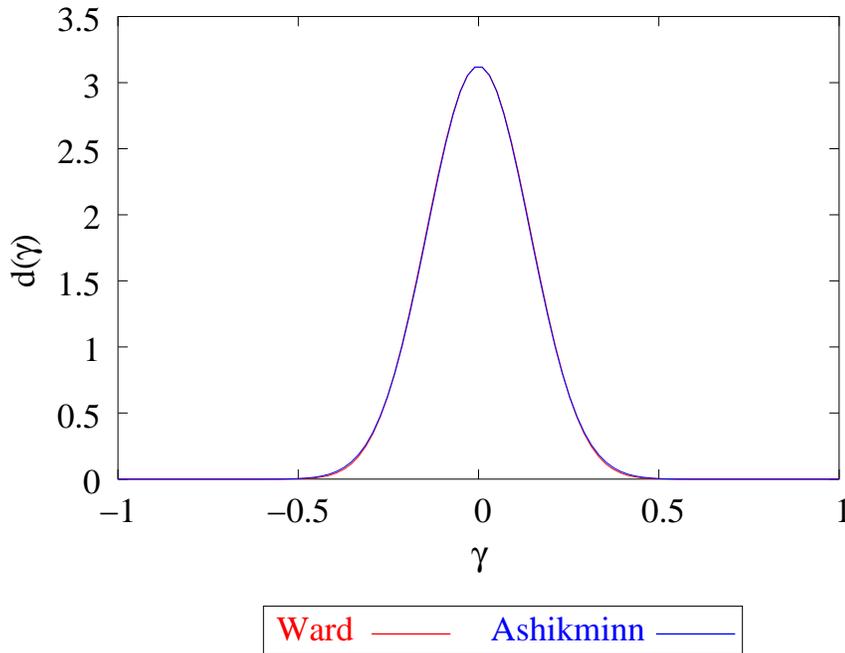


FIGURE 3.9 – La distribution de Ward ($m_x = 0.1, m_y = 0.8$) et la distribution d’Ashikminn ($n_u = 100, n_v = 100$).

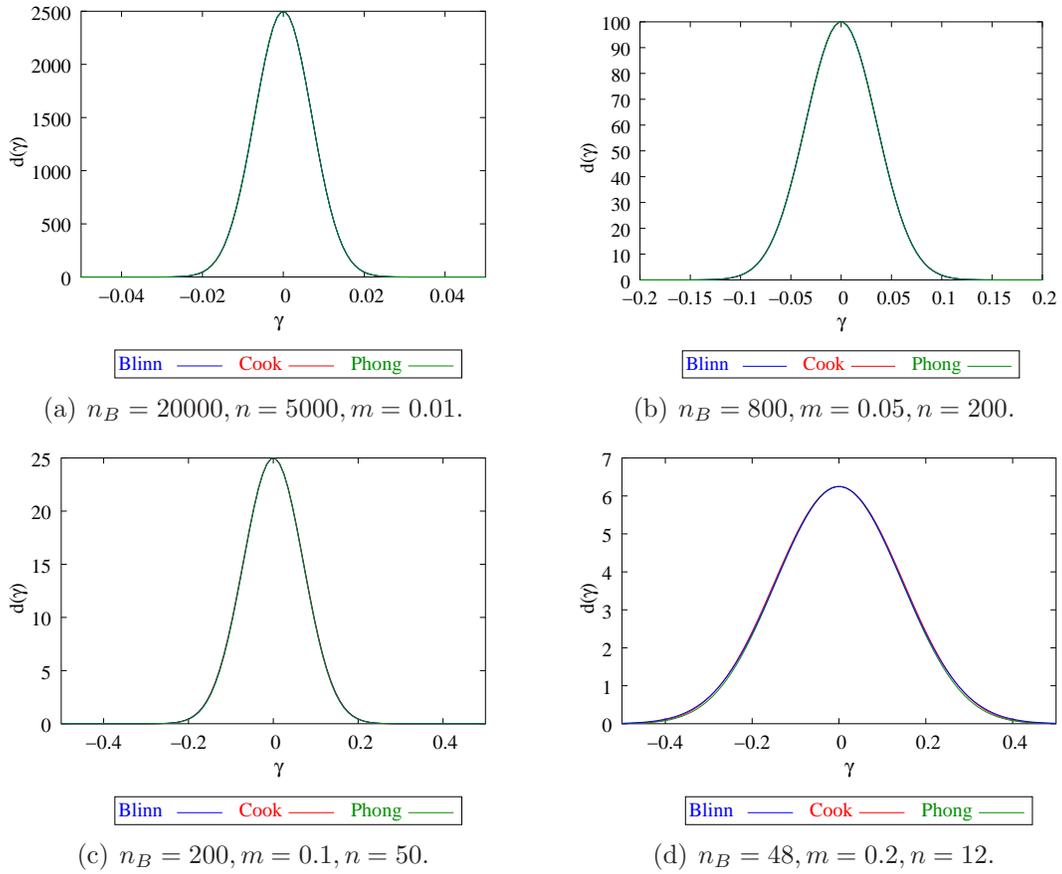


FIGURE 3.10 – Exemple de résultats

<i>Modeles</i>	<i>Rugosité utilisée</i>	<i>Rugosité générale</i>
Cook-Torrance-Sparrow	RMS Slope m	$\frac{\exp[-\frac{\tan^2 \gamma}{m^2}]}{4m^2 \cos^4 \gamma}$
Schlick	RMS Slope m	$\frac{m^3 x}{(N.H)(mx^2 - x^2 + m^2)^2}$
Ward (isotropic)	RMS Slope σ	$\frac{\exp[-\frac{\tan^2 \gamma}{m^2}]}{4m^2 \cos^4 \gamma}$
Ward (anisotropic)	RMS Slope σ_x and σ_y	$\frac{\exp[-\tan^2 \gamma (\frac{\cos^2 \phi}{m_x^2} + \frac{\sin^2 \phi}{m_y^2})]}{4m^2 \cos^4 \gamma}$
Phong	n_s	$(R.V)^{n_s}$
Strauss	h	$(R.V)^h$
Blinn-Phong	n_b	$(N.H)^{n_b}$
Ashikminn-Shirley-Phong	$n_u \cos^2 \phi + n_v \sin^2 \phi$	$(N.H)^{n_u \cos^2 \phi + n_v \sin^2 \phi}$
He-Torrance-Sillion-Greenberg	$d(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}}$ and $C(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{T^2}}$	$d(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}}$ and $C(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{T^2}}$

TABLE 3.1 – Synthèse sur les modèles de rugosité utilisés en synthèse d'images

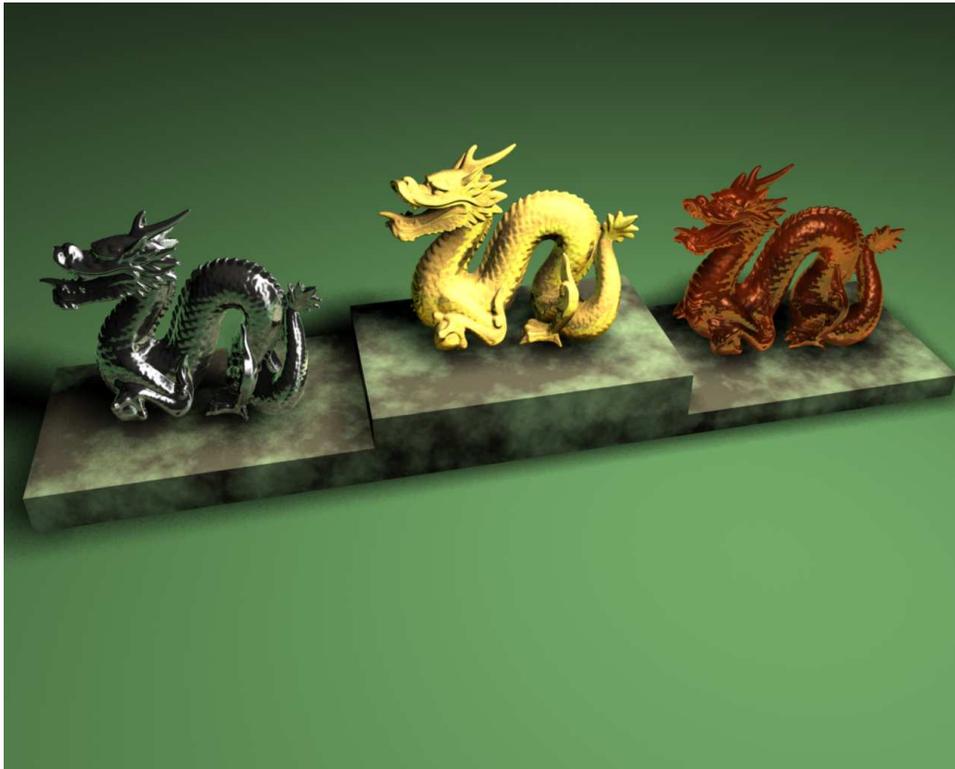


FIGURE 3.11 – Une scène complète : un dragon en argent, en or et en bronze (resp. de gauche à droite)

3.3 Extension du modèle de rugosité

3.3.1 Introduction

Comme nous venons de le voir, la rugosité peut être représentée de manière unique par une distribution de hauteur (que cette distribution soit utilisée comme telle ou qu'elle soit approchée ou alors approximée). Cependant, nous pouvons trivialement remarquer que, sous une apparente diversité, seule une unique distribution est utilisée : la distribution Gaussienne. Il est vrai qu'il est communément établi que de nombreux phénomènes naturels suivent cette loi statistique. Cependant, de récents travaux ont montré que la rugosité peut normalement suivre d'autres lois de distributions. Nous appellerons par opposition aux distributions communément utilisées ces nouvelles distributions des distributions non Gaussiennes.

Certains auteurs vont même plus loin et pensent qu'il n'y a objectivement aucune raison d'utiliser une distribution plutôt qu'une autre [TAE04, BC96]. Nous proposons dans cette extension, d'utiliser de nouvelles distributions pour représenter la rugosité d'une surface. Ainsi, nous proposons d'utiliser les distributions dites uniforme, exponentielle, de Cauchy, de Rayleigh et de Simpson afin de décrire l'état de la surface.

3.3.2 Choix d'un modèle de FDRB

La rugosité seule ne permet pas de décrire l'éclairement d'une surface réelle. Ce phénomène met en jeu de nombreux paramètres. Pour pouvoir montrer l'influence des nouveaux modèles de rugosité, nous devons choisir un modèle de FDRB et y intégrer nos distributions. Dans un premier temps, nous avons voulu utiliser le modèle de He Torrance afin d'intégrer nos nouvelles distributions. Cependant, l'intégration s'est avérée compliquée. Afin de simplifier le processus, nous avons décidé d'utiliser le modèle de Cook et Torrance. Dans sa forme générale, on peut rappeler le terme spéculaire ρ_s :

$$\rho = k_s \rho_s + k_d \rho_d. \quad (3.4)$$

Avec :

$$\rho_d = \frac{1}{\pi}. \quad (3.5)$$

$$\rho_s = \frac{1}{\pi} \frac{F_\lambda \cdot G \cdot D}{(N.S)(N.V)}. \quad (3.6)$$

Où :

- F_λ est le terme de Fresnel.
- G est le terme de géométrie.
- D est le terme de Distribution.

C'est ce dernier terme qui va nous intéresser pour notre étude.

Nous gardons la forme générale de la FDRB de Cook et Torrance :

$$\rho_{n-g} = k_s \rho_{s,n-g} + k_d \rho_{d,n-g}. \quad (3.7)$$

Le terme diffus est considéré comme lambertien. D'autres modèles de diffusion peuvent être utilisés, à la condition de s'assurer de la conservation de l'énergie. Ce comportement est dû à la séparation entre les termes spéculaires et diffus.

Le terme spéculaire est uniquement modifié au niveau de la distribution.

3.3.3 Introduction des nouvelles distributions

Distribution uniforme

$$d(\alpha) = \frac{1}{(2a)}, \quad \forall \alpha \in [-a, a]. \quad (3.8)$$

Distribution Exponentielle Cette distribution est, après la distribution normale, la distribution la plus utilisée.

$$d(\alpha) = \lambda e^{-\lambda|\alpha|}. \quad (3.9)$$

Où $\lambda > 0$.

Distribution de Rayleigh

$$d(\alpha) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} & \forall \alpha > 0 \\ 0 & \text{si } \alpha < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Distribution de Cauchy

$$d(\alpha) = \frac{a}{\pi(a^2 + \alpha^2)}. \quad (3.11)$$

Où $a > 0$

Distribution de Simpson

$$d(\alpha) = \begin{cases} \frac{2(\alpha-a)}{(b-a)(c-a)} & , \text{ si } a < \alpha < c \\ \frac{2(b-\alpha)}{(b-a)(b-c)} & , \text{ si } c < \alpha < b \\ 0 & \text{sinn} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.4 Résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats de nos simulations. Les images présentent pour chaque modèle, une boule, un dragon et un buddha sous les mêmes conditions d'illumination. Dans le but de comparer les différentes distributions, nous utilisons le même modèle de Cook et Torrance, en ne changeant que le terme de distribution.

Les images suivantes (Figure 3.13 à 3.4) montrent les résultats de nos simulations. Nous pouvons voir que le reflet spéculaire illustre bien les nouvelles distributions. Par

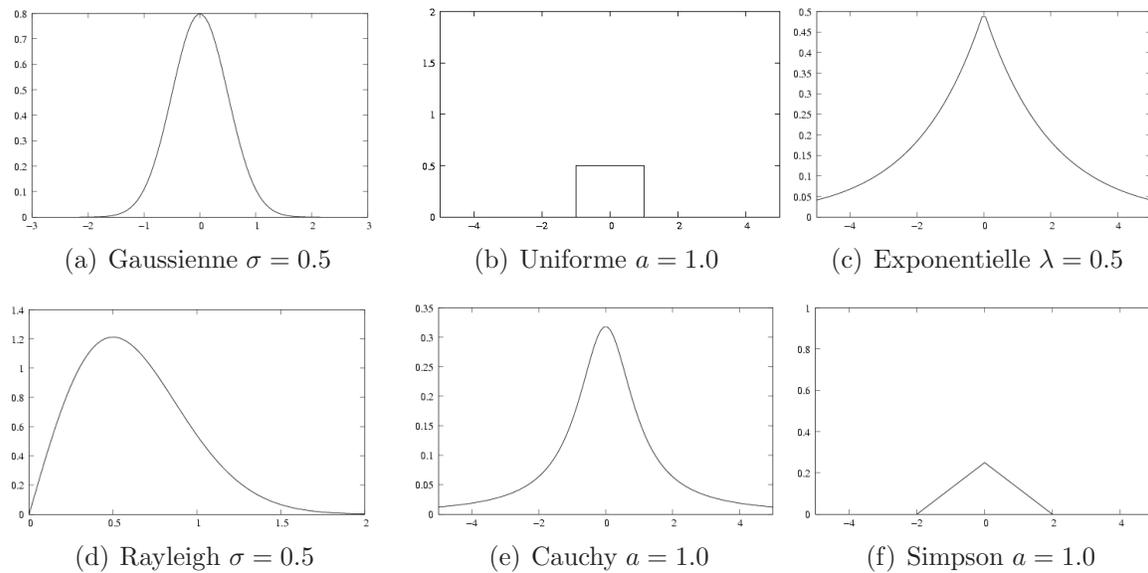
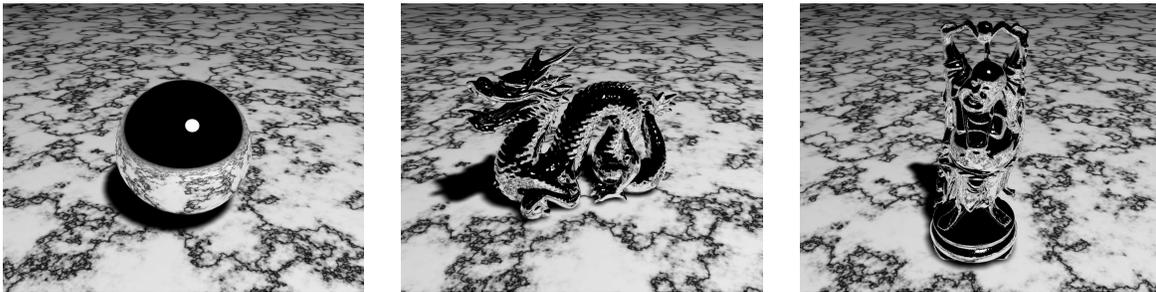


FIGURE 3.12 – Les distributions utilisées

exemple, la distribution uniforme induit un reflet spéculaire bien rond et la frontière est franche. On a l'impression d'un spot lumineux dirigé vers la surface. On peut remarquer également, la différence entre la distribution de Cauchy et les autres distributions. Cette distribution bien que purement spéculaire, présente un comportement diffus global assez important. Cela vient du fait que la distribution de Cauchy ne passe jamais par 0. Les valeurs des pentes des microfacettes sont alors plus diverses et le comportement global est plus diffus. La figure 3.18 montre que l'on peut grâce à cette distribution simuler de façon convaincante certains matériaux comme l'étain.

FIGURE 3.13 – Distribution uniforme $a = 0.1$

3.5 Conclusion et travaux futurs

Nous avons proposé dans cette partie l'utilisation de nouvelles distributions pour représenter la rugosité des surfaces réelles. Pour cela, nous avons intégré nos distributions dans un modèle de Cook et Torrance. De cette manière, nous gardons les caractéristiques propres de la FDRB en y ajoutant seulement une représentation de surface différente.



FIGURE 3.14 – Distribution exponentielle $\lambda = 0.5$



FIGURE 3.15 – Distribution de Rayleigh : $\sigma = 0.1$



FIGURE 3.16 – Distribution de Cauchy : $a = 0.1$



FIGURE 3.17 – Distribution de Simpson : $a = 1$

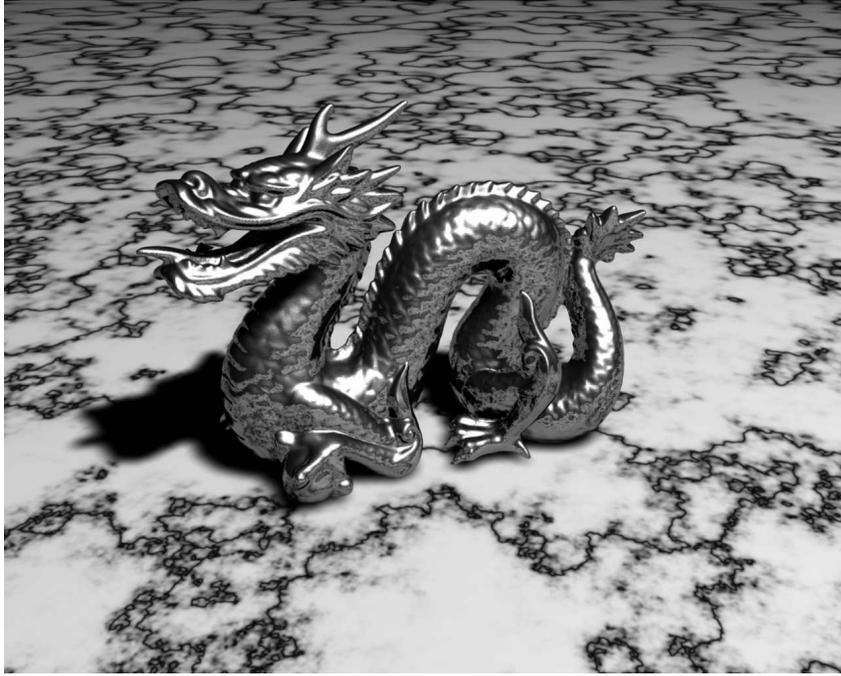


FIGURE 3.18 – Un dragon en étain simulé en utilisant la distribution de Cauchy

De cette manière, nous permettons le rendu physiquement réaliste du point de vue de la description de surface, de certaines surfaces qui ne pouvaient être rendues en utilisant une distribution Gaussienne. C'est le cas par exemple de la glace dont la distribution de hauteurs suit une loi de Cauchy (Figure 3.19). Cependant l'utilisation du modèle de Cook et Torrance a été induite par sa simplicité. Nous avons simplement changé un terme sans rendre compte des changements induits par ces nouvelles distributions sur les autres termes (notamment le terme géométrique). De plus, nous restons dépendants du modèle de Cook et Torrance et de ses approximations. La prochaine étape concernant ce travail serait d'utiliser le modèle de He Torrance et de le modifier pour prendre en compte ces nouvelles distributions. De cette manière, il serait possible de représenter une distribution de hauteur différente de la distribution gaussienne habituellement utilisée. La seconde voie d'exploration de ce travail serait de reprendre le modèle de Ashikminn et Shirley [APS00]. Ce modèle présente une manière de réaliser le rendu de surfaces dont la distribution de micro facettes est différente de la distribution Gaussienne habituelle. Outre des distributions originales et fantaisistes (voir la figure 3.5), cela permet de simuler l'anisotropie d'une surface de manière différente. Il serait judicieux d'incorporer nos distributions dans ce modèle et de montrer ainsi plusieurs modèles présentant une justification physique pour le choix de la distribution de micro facettes et dont le comportement global a été étudié (notamment pour le terme géométrique).

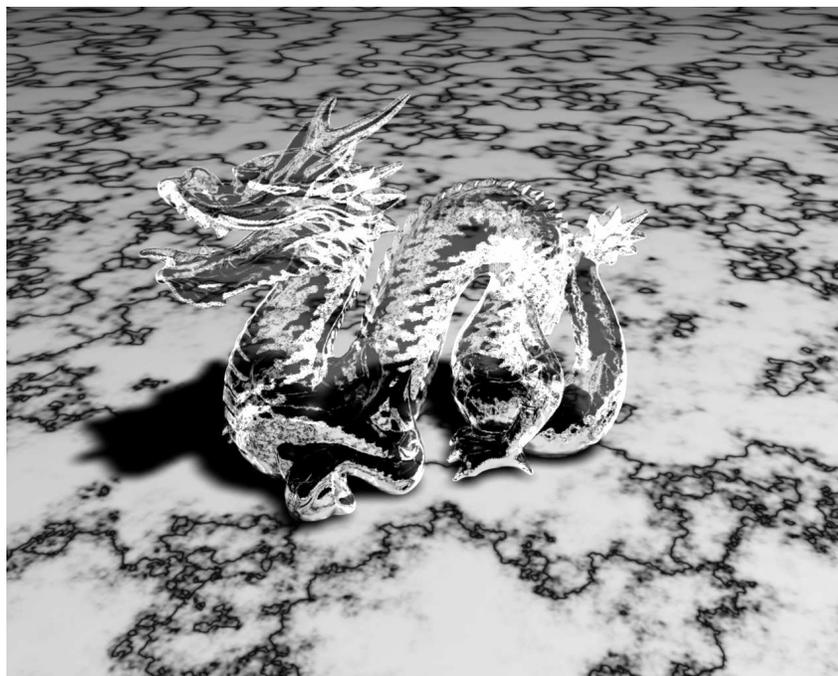


FIGURE 3.19 – Un dragon sculpté dans la glace en utilisant la distribution de Cauchy

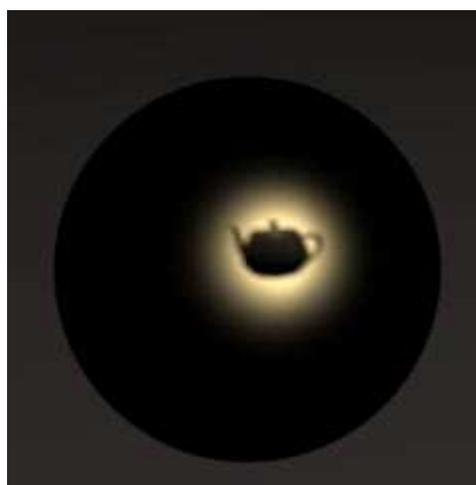


FIGURE 3.20 – Réflexions spéculaires du modèle d'Ashikminn et Shirley

4

Rendu en temps réel du changement d'aspect de matériaux poreux

4.1 Introduction

La première partie de ce manuscrit a permis de démontrer l'importance des méthodes de simulation de l'interaction lumière/matière. Une composante fondamentale de cette description est la micro géométrie de la surface. Comme nous l'avons déjà vu, les surfaces possèdent des défauts invisibles à l'oeil nu, impliquant des changements visibles sur la réflexion de la lumière. Parmi ces défauts, on peut noter la rugosité de la surface qui intervient dans la plupart des fonctions bidirectionnelles de réflectance (FDRB) et qui a été étudiée précédemment. La porosité est un autre de ces défauts de surface. Elle est peu prise en compte en synthèse d'images alors qu'elle peut être très présente dans certains matériaux ([BS90]). Par exemple, la porosité d'un matériau comme la brique peut atteindre 0.4 (il s'agit de la proportion de surface couverte par des pores) comme le montre la figure 4.1. De plus, outre son influence propre, la porosité est à l'origine de nombreux phénomènes liés aux changements d'aspect des surfaces. Elle est par exemple impliquée dans la corrosion destructrice car le réseau de pores de la rouille permet aux réactions chimiques de se propager à l'intérieur du matériau. La porosité permet également d'expliquer les changements d'apparence des surfaces mouillées. Celles ci deviennent plus sombres et plus spéculaires. D'autres phénomènes comme les effets de la pollution peuvent également être simulés par ce biais.

La simulation virtuelle des matériaux poreux peut être d'une grande importance dans un domaine tel que la préservation du patrimoine culturel. En effet, dans ce domaine, la plupart des matériaux utilisés sont poreux (briques, pierre taillée). Les effets du vieillissement et notamment de la pollution atmosphérique sont un enjeu économique et culturel. Le nettoyage des surfaces de monument tels que les cathédrales a un coût non négligeable. Un logiciel permettant de déterminer les zones préférentielles de vieillissement des constructions pourrait aider à en prévenir les dommages. Notre approche a été d'étudier dans un premier temps le rendu de matériaux poreux. A partir du modèle de rendu existant, nous avons décidé de simuler en temps réel ce type de matériau. Nous avons pour cela utilisé les capacités des dernières cartes graphiques conçues à base de GPU program-

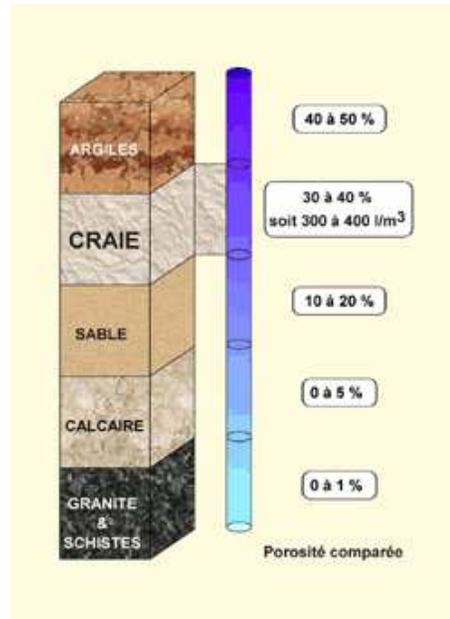


FIGURE 4.1 – La porosité peut prendre des valeurs élevées dans certains matériaux

mable. A partir de ce modèle, nous avons déduit un modèle générique comportemental du vieillissement des surfaces poreuses. De ce modèle générique, nous avons extrait deux spécialisations pour simuler d'une part, les effets de la pollution atmosphérique et d'autre part le mouillage et le séchage des surfaces poreuses.

4.2 Modèles de vieillissements : un tour d'horizon des techniques

Becket et Badler [WN90] ont représenté les imperfections d'une surface en utilisant une texture synthétisée à base de fractales. Blinn [Bli82] et Hsu [ST95] ont proposé différentes techniques pour simuler le dépôt de la poussière sur des surfaces. Wong [TTWYPA97] a proposé une méthode dépendant de la géométrie permettant de représenter l'accumulation de poussières, la patine et le peeling. Dans [PPD01], les auteurs modifient la géométrie des objets pour représenter les impacts dus à différents outils. L'enlèvement et les craquelures de la peinture ont été étudiés dans [PPD02]. Afin d'obtenir des résultats plus proches de la réalité, des techniques physiquement réalistes ont été développées. Dorsey [DPH96] propose un modèle permettant de prendre en compte les particules sales charriées par les écoulements de liquides. Le vieillissement des surfaces non poreuses a été étudié dans [JAH⁺99]. La corrosion (à la fois la patine et les effets destructifs de la corrosion) ont été étudiés par [DH96] et [MDG01a].

Dans cette partie, nous allons nous occuper uniquement des méthodes permettant le rendu d'une surface mouillée. Dans [NKON90], Nakamae et al. utilisent un modèle de réflexion bicouche pour simuler la présence de flaques d'eau sur une route pour un

simulateur de conduite. En se mouillant, la surface de la route devient plus foncée. Ce noircissement est obtenu empiriquement en changeant les composantes de réflexion de la lumière. Dans [JLD99], Jensen et al. introduisent un changement dans le comportement du matériau vis-à-vis de la lumière à cause du mouillage de la surface. Dans ce cas, la surface devient plus foncée, plus lumineuse, plus spéculaire, et translucide. Ce modèle est fondé sur une représentation de surface bicouches. Dans [LGR⁺05], Lu et al. simulent le séchage d'une surface en utilisant des paramètres de captures réalisées sur des objets réels. Le rendu en temps réel de surface mouillée, à notre connaissance, n'a jamais été étudié spécifiquement. Cependant, dans des études faisant intervenir des simulations de fluides, le rendu de surface mouillée a été obtenu par des techniques particulières, le seul but étant d'avoir des scènes esthétiquement réussies. Par exemple, dans [YHXE05], Liu et al. décrivent un système d'écoulement de fluide sur une surface qui permet de prendre en compte le phénomène de surface mouillée. Pour un tel rendu, la méthode utilise une interpolation linéaire entre deux textures. La première texture représente la surface sèche et la seconde texture représente la même surface complètement mouillée.

4.3 Le modèle de porosité en temps réel

4.3.1 Description du modèle utilisé

Le modèle présenté ici est décrit en détails dans [MDG00]. Ce modèle rajoute un pore déformé à base cylindrique à la représentation classique (micro-géométrie) de la surface utilisée pour décrire l'éclairement local. Ainsi, pour chaque pixel, le comportement de ce pore représente le comportement moyen de l'ensemble des pores projetées sur la surface du pixel comme le montre la figure 4.2. La distribution des pores est supposée uniforme sur la surface. L'influence d'un pore, considéré individuellement, suit quelques principes simples :

- la contribution de l'éclairement incident à la réflexion spéculaire est remplacée par une contribution à la réflexion diffuse, avec une modulation effectuée grâce à un coefficient d'ombrage et de masquage.
- la contribution de l'éclairement incident à la réflexion diffuse est modulée par les pertes éventuelles engendrées par le passage du rayon lumineux dans le pore (multiples rebonds).

Le modèle repose sur l'introduction de nouveaux coefficients spéculaire et diffus appelés k_{s-poro} et k_{d-poro} permettant de prendre en compte la porosité. De manière générique, une FDRB $f_r = k_s F_s + k_d F_d$ modifiée s'exprimera de la manière suivante :

$$f_r = k_{s-poro} F_s + k_{d-poro} F_d$$

avec :

$$k_{d-poro} = k_s (1 - \alpha_{poro} G_p)$$

$$k_{s-poro} = kd(1 - \alpha_{poro} G_p A_p) + k_s \alpha_{poro} G_p (1 - A_p)$$

- α_{poro} est le pourcentage de surface recouverte par des pores (définit de manière classique la porosité)

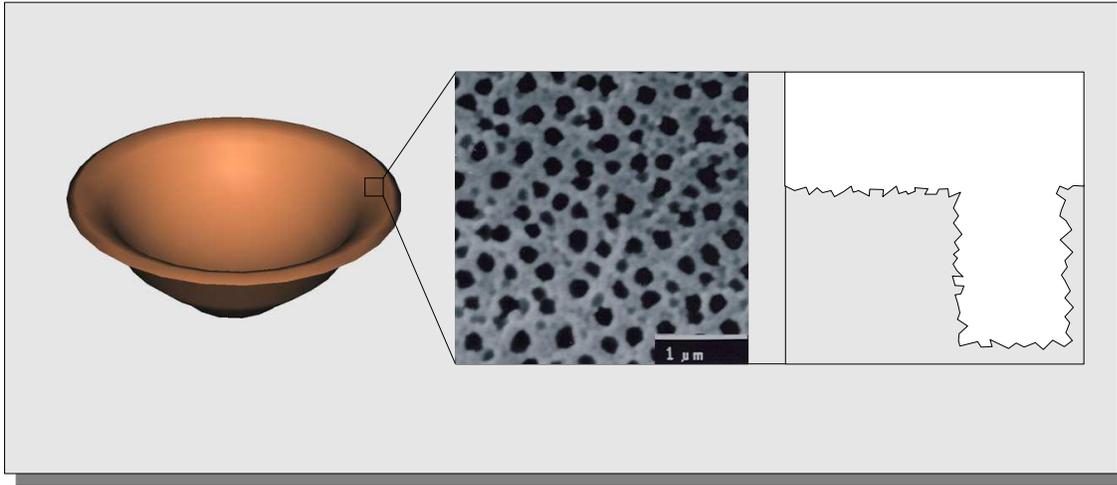


FIGURE 4.2 – Un pixel peut être couvert d'un nombre assez important de pores. Leur comportement moyen est simulé en utilisant un pore unique dont le comportement et les caractéristiques sont définies comme moyen et qui est inséré dans le modèle d'illumination local.

- s_p est le rapport entre la profondeur moyenne d'un pore et le diamètre moyen d'un pore
- G_p est le terme géométrique de masquage et d'ombrage.

$$G_p = \frac{(N.S)}{(N.S) - k.(N.S) + k} \frac{(N.V)}{(N.V) - k.(N.V) + k} \quad (4.1)$$

Avec $k = \frac{2m^2}{\pi}$, m est la pente de surface RMS, N est la normale à la surface, S est la direction de la lumière incidente et V est la direction du point de vue.

- A_p représente les pertes lumineuses totales du aux réflexions de la lumières dans le pore et à la capacité d'absorption lumineuse du matériau considéré. Avec n_b (le nombre moyen de rebonds d'un rayon de lumière dans le pore) et k_a (le pourcentage de lumière totale absorbée) $k_a = 1 - k_s - k_d$, A_p peut alors être écrit comme :

$$A_p = k_a \cdot \frac{1 - (1 - k_a)^{n_b}}{1 - (1 - k_a)} \quad (4.2)$$

$$n_b = s_p \cdot \left[3.7 - 2 \cdot \left(\frac{\theta_i + \theta_r}{2} - \frac{2 \cdot \pi}{s_p + 6} \right) \right] \quad (4.3)$$

4.3.2 Rendu en temps-réel

Le rendu en temps réel de la porosité est effectué en utilisant les capacités des cartes graphiques actuelles. Leur flexibilité nous permet d'appliquer directement le modèle d'éclairage sans aucune approximation. Ces cartes décomposent le processus de rendu en deux parties correspondant à deux programmes distincts exécutés par la carte graphique : le *vertex shader* et le *pixel shader*. Ces programmes sont évalués respectivement au niveau des sommets du maillage et au niveau du pixel affiché.

1. Le *vertex shader* calcule en chaque sommet du maillage des informations qui seront interpolées sur la surface du maillage et utilisées ensuite par le *pixel shader*. Dans notre cas, ces informations sont d'une part les paramètres classiques de l'éclairage, c'est à dire les composantes diffuses et spéculaires F_d et F_s de la FDRB de Blinn-Phong, et d'autre part les informations géométriques (normale, position, coordonnées de texture).
2. Le *pixel shader* correspond à l'implémentation directe du modèle de porosité. En utilisant les valeurs de F_d et de F_s ainsi que les autres informations issues du *vertex shader*, nous calculons l'éclairage comme défini dans le modèle original.

Ainsi, nous devons choisir un modèle de FDRB sur lequel appliquer notre modèle. Ce modèle doit correspondre au critère de séparation diffuse et spéculaire. Pour réaliser nos simulations, nous utilisons une FDRB de Blinn-Phong [JF77] comme FDRB de base. Ce choix est guidé par le fait que ce modèle est très largement utilisé dans le domaine du rendu temps réel. De plus, c'est un modèle simple à mettre en oeuvre et intuitif. Les cartes graphique actuelles sont d'ailleurs optimisées pour évaluer les valeurs prises par ce modèle [Cor]. Ensuite, nous devons calculer une wet texture (voir définition section 4.6.1) afin de localiser les parties du maillage qu'il faudra mouiller pendant la simulation.

Pour terminer, l'étape de rendu est alors composée par :

1. Calculer les composantes k_d et k_s de la FDRB choisie (dans notre cas : Blinn/Phong). Cela est réalisé dans le vertex shader de la carte graphique. Les composantes k_d et k_s calculées sont alors interpolées sur la surface du triangle et utilisées dans le pixel shader.
2. Appliquer le post traitement de FDRB afin de simuler la porosité. Cette tâche est entièrement réalisée dans le pixel shader de la carte.

4.3.3 Résultats

La figure 4.3 montre une comparaison entre un pot en céramique rendu avec le modèle de Blinn-Phong (à gauche) et avec notre modèle de porosité basé sur le même modèle de Blinn-Phong. On peut noter que le comportement attendu est obtenu : après application du modèle de porosité, la partie diffuse de la FDRB de l'objet est augmentée alors que la partie spéculaire est diminuée.

Pour étendre ce modèle de porosité à de nouveaux effets visuels, nous proposons d'utiliser une approche phénoménologique. Celle-ci nous permet d'obtenir des résultats physiquement plausibles tout en conservant un modèle simple et intuitif.

4.4 Pollution des surfaces poreuses par un matériau étranger

Notre modèle est basé sur une constatation simple. Les pores débouchant (nom donné aux pores ayant un coté ouvert sur l'extérieur) pourront être remplis dans certains cas d'un matériau que nous appellerons le matériau étranger. Afin de conserver toute la généricité



(a) Blinn-Phong $k_s = 0.5, k_d = 0.4, \alpha_{poro} = 0.0$ (b) Blinn-Phong + modèle de porosité $k_s = 0.5, k_d = 0.4, \alpha_{poro} = 0.35$

FIGURE 4.3 – Le modèle de porosité appliqué à une poterie.

du modèle, nous allons dans un premier temps raisonner sur un matériau au sens le plus général. Celui ci sera défini via son comportement vis à vis de la lumière et ainsi par ses composantes de réflexion (k_{s-etr}, k_{d-etr}).

Nous allons redéfinir le schéma de l'illumination locale en prenant en compte ces modifications. La figure 4.4 montre ce nouveau schéma.

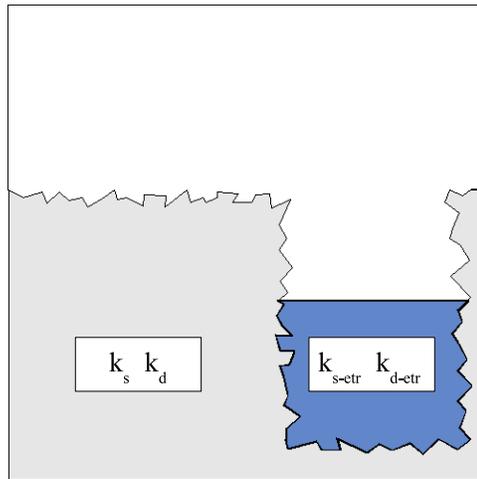


FIGURE 4.4 – Le modèle de l'illumination locale après ajout du matériau étranger

Toujours en gardant à l'esprit notre but de simplicité, nous pouvons en déduire le comportement global de notre surface vis à vis de la lumière. Nous allons introduire un nouveau paramètre P_{rempl} qui représente le pourcentage du volume du pore (moyen) rempli par le matériau étranger (il est donc compris entre 0 et 1). A partir de ce paramètre et de α_{poro} , nous pouvons déduire trois zones au comportement distinct (voir figure 4.5).

Tout d'abord, nous allons prendre en compte l'influence de la surface non poreuse (4.5(a)). Cela est réalisé de la même manière que dans le modèle initial. On considère ensuite que les contributions du pore vont être données par deux parties. La première

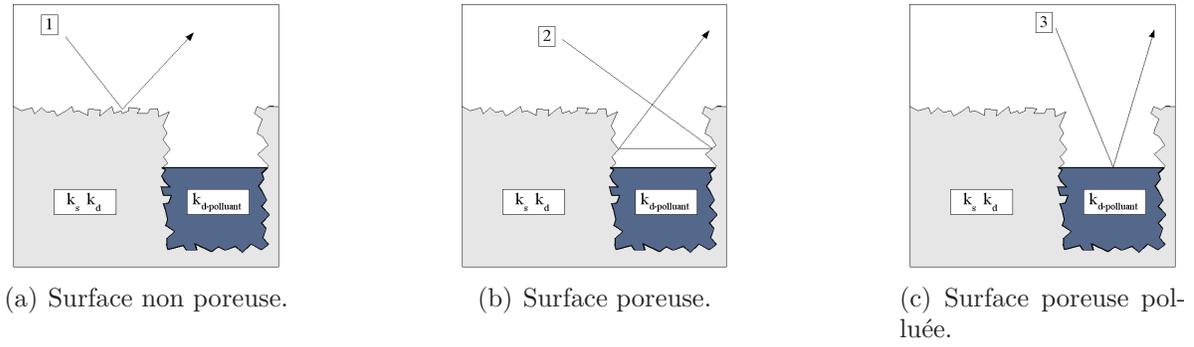


FIGURE 4.5 – Les trois types de contributions prises en compte dans notre modèle.

correspond à la contribution de la partie poreuse non recouverte de matériau étranger. La seconde correspond à la réflexion de la lumière sur le matériau étranger. Dans un but de simplification, nous avons négligé les interactions des différentes parties les unes par rapport aux autres (nous avons notamment négligé les réflexions dues au rebonds qui vont se propager sur plusieurs zones du pore avant de ressortir). Nous pouvons alors procéder à une mise à l'échelle de notre modèle pour obtenir le modèle complet donné par les nouveaux coefficients $k_{d-poro-etr}$ et $k_{s-poro-etr}$:

$$\begin{aligned}
 k_{d-poro-etr} &= k_d \cdot (1 - \alpha_{poro} \cdot G_p) \\
 &+ \left(k_d \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot (1 - A_p) + k_s \cdot (1 - A_p) \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \right) \cdot (1 - P_{rem}) \\
 &+ k_{d-etr} \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \cdot P_{rem} \\
 k_{s-poro-etr} &= k_s (1 - \alpha_{poro} \cdot G_p) + k_{s-etr} \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot P_{rem}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Avec A_p la perte totale d'énergie lumineuse due aux rebonds dans le pore, G_p le coefficient de masquage/ombrage, α_{poro} la portion de surface couverte par la porosité.

Le tableau 4.1 rassemble les contributions et leurs influences :

	Contribution spéculaire	Contribution diffuse
Non poreuse	$k_s (1 - \alpha_{poro} \cdot G_p)$	$k_d \cdot (1 - \alpha_{poro} \cdot G_p)$
Poreuse	-	$k_d \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot (1 - A_p) + k_s \cdot (1 - A_p) \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p$
Matériau étranger	$k_{s-etr} \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p$	$k_{d-etr} \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot (1 - A_p)$

TABLE 4.1 – Résumé des contributions du nouveau modèle

Nous pouvons remarquer qu'aux bornes du modèle on garde une cohérence. Quand le pore est vide, P_{rem} est nul. On retrouve dans ce cas le modèle original défini au paragraphe 4.3.1. Dans le cas où le pore est entièrement rempli, on a $P_{rem} = 1$. Le modèle devient alors une simple combinaison linéaire suivant α_{poro} de la FDRB choisie.

L'introduction d'un matériau étranger dans les pores est courante pour une surface poreuse. Ce phénomène intervient notamment dans deux cas qui sont présentés ici comme exemple d'utilisation de notre modèle. Dans un premier temps, nous allons simuler le vieillissement des surfaces poreuses soumises à la pollution atmosphérique. Dans un second temps, nous allons représenter l'effet du mouillage et du séchage de telles surfaces.

4.5 Pollution atmosphérique des surfaces poreuses

La pollution présente dans l'air, due notamment à la hausse de la combustion de pétrole et de ses dérivés, dégrade beaucoup de constructions réalisées en pierre [Der99]. Cette pollution atmosphérique est un facteur majeur du changement d'aspect et de couleur de leur surface. Dans les sections suivantes, nous décrivons les altérations dues à la pollution, puis nous présentons un modèle permettant de réaliser le rendu d'un tel phénomène.

4.5.1 La pollution atmosphérique

Au cours des deux siècles précédents, la production et la consommation d'énergie ont fortement augmenté. L'utilisation de nouveaux combustibles ont menés à l'émission dans l'atmosphère de soufre et de dérivés soufrés (SO_4) sous forme de particules telles que la suie. Par exemple, la sulfatation des matériaux constituant le patrimoine culturel mondial est une observation courante [RFK98]. Ce processus affecte également la quasi-totalité des constructions urbaines.

Les mécanismes de la pollution atmosphérique sur les pierres poreuses font apparaître trois zones non uniformes, dont la localisation dépend : du type de pollution, du matériau, de la géométrie ou de l'exposition à la pluie. L'observation de telles surfaces polluées met en évidence trois zones distinctes [BPA⁺04,PFMRA98,MF01] : les zones dites "blanches", "noires" et "grises" comme le montre la photo figure 4.6.

La description des effets de la pollution qui utilise ces trois zones est issue du sous domaine de la science des matériaux étudiant ce phénomène. Nous reprenons cette définition classique telle qu'elle a été définie.

Zones grises Ce type de zone définit les parties du matériau protégées de la pluie ou du ruissellement. Le dépôt de particules présentes dans l'atmosphère y provoque un changement de couleur. Cependant, ces particules sont très sensibles au ruissellement : tout *passage* d'eau nettoie la surface de ses impuretés et stoppe le processus de croissance de la couche de pollution.

Phénoménologiquement, seules les parties de l'objet non exposées aux pluies correspondent à cette zone.

Zones noires Le noircissement de la surface est dû à un dépôt de particules carbonées dans les pores du matériau. Ces pores se remplissent de ces particules, elles-mêmes issues de la combustion du bois et du pétrole. Ce dépôt s'accompagne de formation de gypse ($CaSO_4$) qui cimente les particules dans le pore. Les matériaux très poreux et présentant un facteur de rugosité très important sont très sensibles à ce phénomène. Les particules

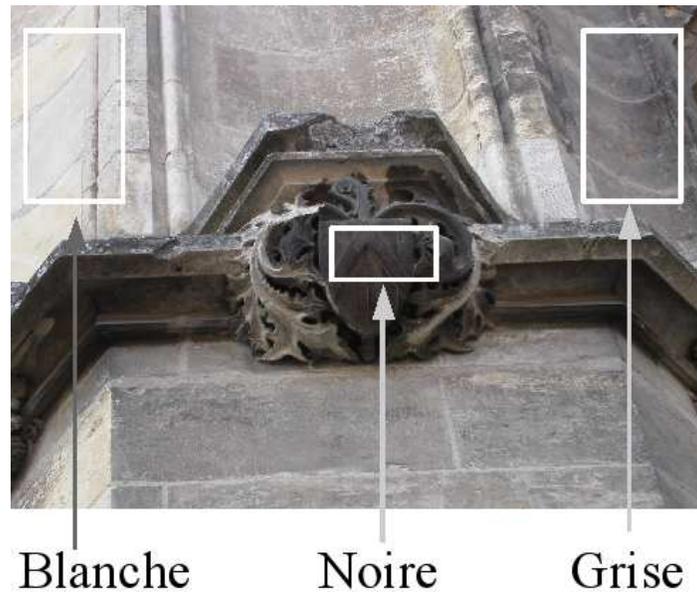


FIGURE 4.6 – Zones de pollution. Sur la partie gauche de l'image, le bâtiment est exposé au nord et à la pluie, tandis que la partie droite en est protégée.

piégées dans le pore ne peuvent être enlevées sans utiliser de procédé de nettoyage chimique ou mécanique. Un ruissellement d'eau, même intense, est sans effet. Ce nettoyage est une opération qui reste coûteuse, quand elle est possible. L'intensité et la rapidité de ce phénomène dépendent de la concentration en particules dans l'atmosphère et des caractéristiques du matériau. On peut également noter qu'une partie du noircissement peut être due au développement d'organismes bactériologiques (tel que des mousses) qui se développent quand l'humidité ambiante est forte. Ici, nous ne prenons pas en compte ce phénomène.

Phénoménologiquement, ce type de pollution se développe dans les creux et les angles saillants de la géométrie de l'objet.

Zones blanches Ce type de zone correspond à l'érosion de la surface soumise à la pluie et au ruissellement. La pluie nettoie la surface qui sans cela aurait été *grise*. Les objets retrouvent alors leur couleurs d'origine car les particules déposées entre deux pluies sont enlevées.

Phénoménologiquement, seules les parties de l'objet soumises directement à la pluie sont concernées par ce phénomène.

Ces considérations phénoménologiques sont à l'origine du modèle présenté ci-après.

4.5.2 Description de la méthode

L'effet du vieillissement sur la géométrie elle-même (l'érosion) intervient assez tard dans le processus de pollution. Notre modèle ne prend pas en compte ce type de dégradation. Ainsi, nous ne simulons que le phénomène de pollution en utilisant comme base le modèle générique. Dans un premier temps nous expliquons comment détecter les trois

zones de vieillissement sur un objet, puis nous modifions le post-traitement défini dans la section 4.4 pour réaliser le rendu de l'objet pollué.

Conceptions des textures représentant les trois zones de pollution La zone blanche est définie comme la partie de l'objet exposée à la pluie. Nous localisons les zones exposées à la pluie en utilisant une texture d'éclairement (*light map*). Nous construisons cette texture en assimilant la pluie à l'émission de lumière blanche issue d'une surface située au dessus de l'objet. Nous obtenons une texture d'éclairement 2D (voir figure 4.7(b)) correspondant aux zones directement exposées à la pluie. Cette texture nous renseigne également sur la localisation des zones grises (non exposées à la pluie) car elles sont complémentaires des zones blanches.

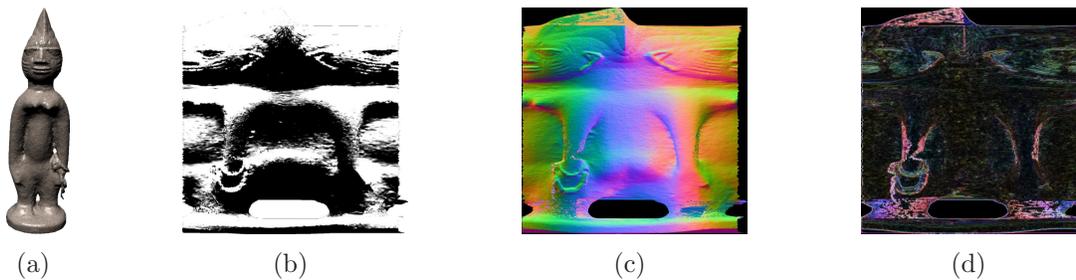


FIGURE 4.7 – Texture d'éclairement (b), de normales (c) et de contours (d) issues d'une statue Africaine (a).

La zone noire correspond à une pollution qui se propage dans les creux et les bosses de la géométrie. Nous devons donc mettre en évidence ces endroits particuliers d'un objet. Dans ce but, nous utilisons la texture de normales de l'objet (voir la figure 4.7(c)). Cette texture est convoluée en utilisant un simple filtre d'extraction de contours (Sobel). Celui-ci permet de localiser les zones préférentielles de dépôt de la pollution, en donnant pour chaque pixel la variation de la normale sur la surface (i.e. creux et bosses). La figure 4.7(d) montre un exemple de cette texture de normales filtrée : les arêtes franches y sont directement visibles. Nous utilisons alors la moyenne des trois canaux de couleurs RVB comme seuil permettant de faire apparaître progressivement la pollution sur l'objet. D'autres méthodes de détection de variation de géométrie, plus précises, pourraient être utilisées ([OBS04]). Dans la mesure où nous devons simplement détecter des *dépôts de croissance de zones*, cette simple convolution s'est avérée suffisante.

Intégration de la pollution dans le modèle de porosité La zone blanche est nettoyée par la pluie. Le rendu est donc effectué en utilisant la FDRB post-traitée originale de l'objet. La zone noire est due à un dépôt de particules de carbone dans les pores. Le gypse cimente ces particules. La figure 4.8 montre l'évolution du dépôt de particules à l'intérieur d'un pore, qui peut être décomposée en trois parties :

- Etat initial : les pores du matériau sont vides. La surface est *propre*
- Etat intermédiaire : les particules se déposent et les pores se remplissent. Le gypse se crée et cimente les particules. L'aspect visuel global de la surface change.

- Etat final : les pores sont complètement remplis par les particules. Le dépôt est stoppé. Le noircissement est au maximum.

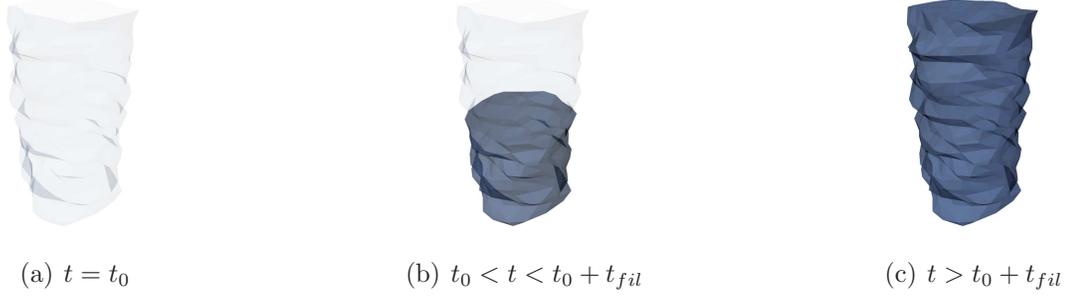


FIGURE 4.8 – Remplissage du pore au cours du temps.

Les particules étant essentiellement composées de dérivés carbonés, nous pouvons en déduire que leur couleur est proche du noir et que leur comportement vis à vis de la lumière est purement diffus. Quand les pores du matériau sont remplis par ces particules, la partie du modèle décrivant l'interaction entre le pore et la lumière est modifiée car la géométrie du pore a changé (leur hauteur diminue). Afin de simplifier l'utilisation du modèle avec nos texture, nous simulons le remplissage graduel des pores au cours du temps par l'utilisation d'un paramètre empirique t_{fil} représentant le temps de remplissage moyen des pores. Le seuil extrait de la texture de contours donne le temps t_0 à partir duquel le pore doit commencer à être rempli. Quand $\Delta t = t - t_0$ devient plus grand que le temps de référence t_{fil} , le pore est plein et le noircissement est au maximum. Durant Δt , la contribution du pore à la réflexion diffuse est remplacée par une contribution du polluant à cette même réflexion. Le terme $\frac{\Delta t}{t_{fil}}$ est équivalent à P_{rem} du modèle générique.

La formulation mathématique du modèle devient :

$$\begin{aligned}
 k_{d-poro-polluted} = & k_d \cdot (1 - \alpha_{poro} \cdot G_p) \\
 & + \left(k_d \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \right. \\
 & + k_s \cdot (1 - A_p) \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \left. \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{t_{fil}} \right) \\
 & + k_{d-pollution} \cdot \alpha_{poro} \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \cdot \frac{\Delta t}{t_{fil}}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Avec A_p la perte totale d'énergie lumineuse due aux rebonds dans le pore, G_p le coefficient de masquage/ombrage, α_{poro} la portion de surface couverte par la porosité et $k_{d-pollution}$ le coefficient diffus des particules de pollution.

4.5.3 Resultats de notre simulation de pollution

Toutes nos expérimentations (concernant l'ensemble de ce chapitre) ont été réalisées en utilisant une NVIDIA GeForce 6800. La complexité de notre méthode dépend du nombre

de pixels affiché à l'écran. Pour une scène de résolution de 1280 par 1024, nous obtenons environ 90 FPS. Pour une scène couvrant moitié moins de pixels, nous obtenons environ 300FPS.

La figure 4.10 montre la pollution progressive d'un bas relief à intervalles de temps réguliers. On peut remarquer que sur les bords de la sculpture, la zone noire s'étend. De même, la zone grise se développe dans la partie basse qui est protégée de la pluie par le relief de la sculpture elle-même.

La figures 4.11 montre l'influence de la porosité sur le modèle. Nous avons fixé le temps t et augmenté progressivement la proportion de pores sur la surface. On peut ainsi noter que plus le pourcentage augmente, plus la pollution se développe vite et plus la couleur devient noire, ce qui est physiquement valide.

Les figures 4.12(a) à 4.12(f) montrent une scène complète (le modèle sibenik) qui vieillit progressivement, en temps réel. La figure 4.13 montre un bas relief dans un matériau différent soumis à une forte pollution.

La figure 4.9 montre les zones de pollution que l'on a voulu représenter. On retrouve bien les trois différentes zones. Le modèle que l'on a proposé décrit correctement les phénomènes présentés dans la théorie de la science des matériaux.

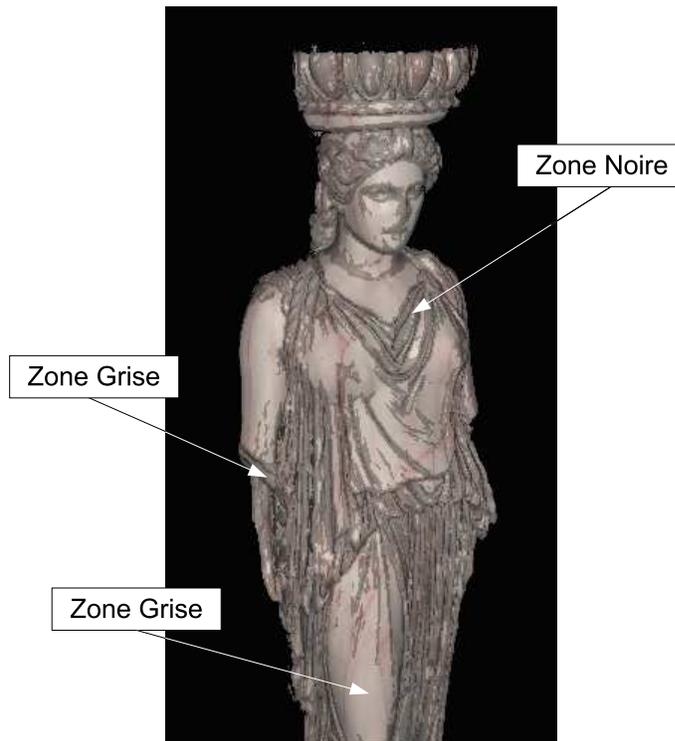
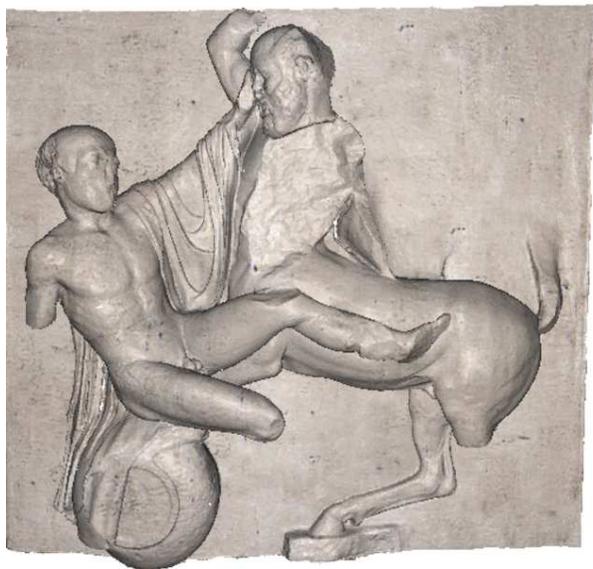


FIGURE 4.9 – Les trois zones de vieillissements



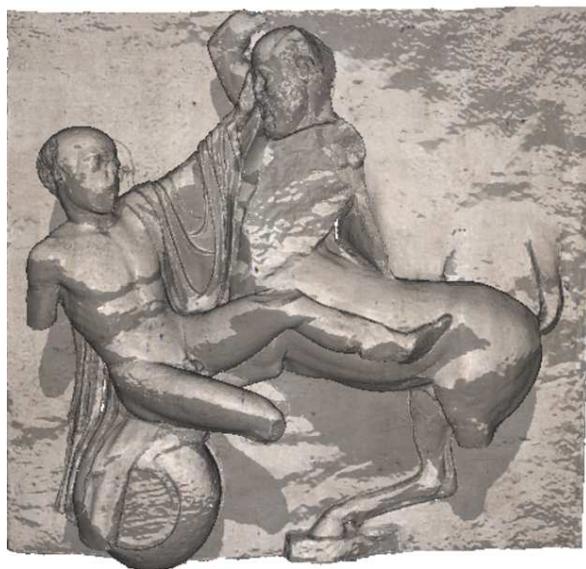
(a) $t = 0$



(b) $t = 0.2$

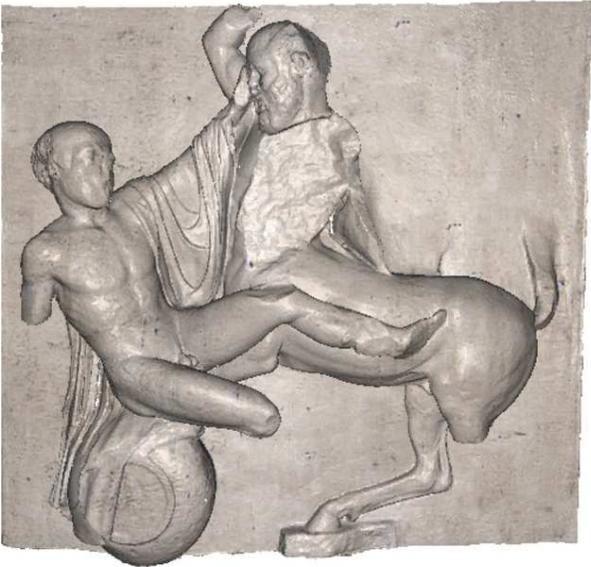


(c) $t = 0.4$

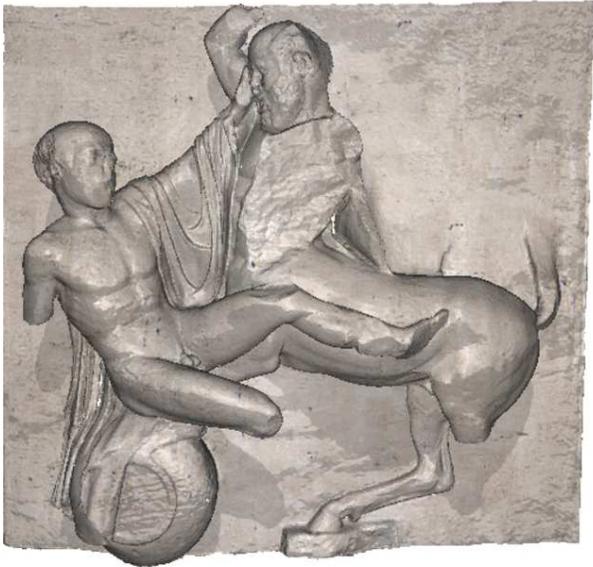


(d) $t = 0.6$

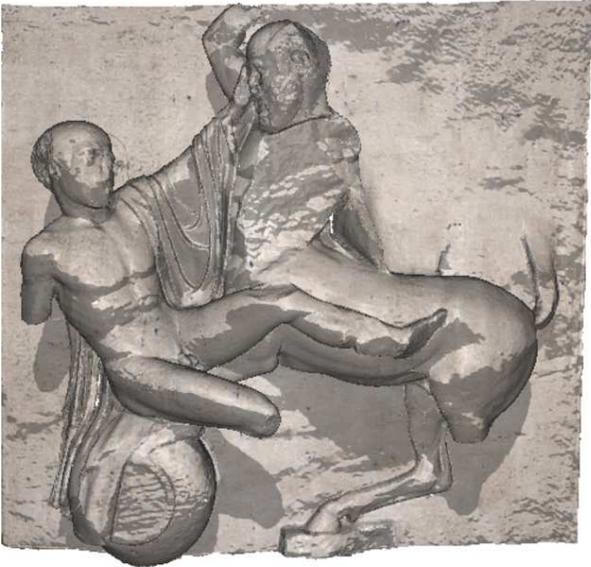
FIGURE 4.10 – Evolution temporelle de la pollution sur un bas relief.



(a) $\alpha_{poro} = 0.0$



(b) $\alpha_{poro} = 0.2$



(c) $\alpha_{poro} = 0.4$



(d) $\alpha_{poro} = 0.6$

FIGURE 4.11 – Influence du paramètre α_{poro} .

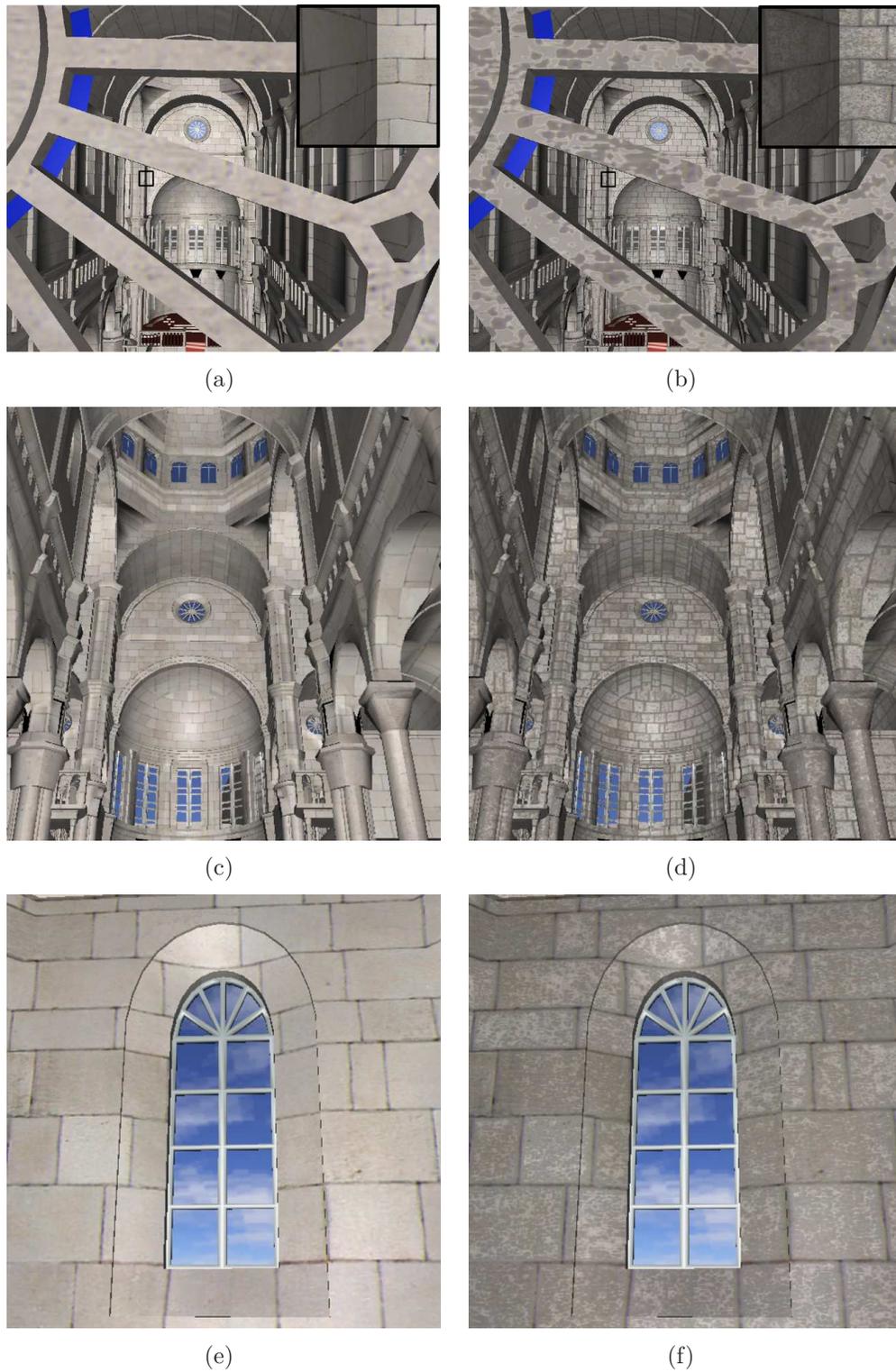


FIGURE 4.12 – Une scène d'intérieur complète (cathédrale).



FIGURE 4.13 – Scène de vieillissement extrême

Dans la prochaine section nous proposons un modèle de rendu phénoménologique de surfaces mouillées.

4.6 Surfaces poreuses mouillées

Notre méthode est basée sur un phénomène simple. Quand une surface poreuse reçoit de l'eau, celle-ci pénètre dans ses pores et modifie l'aspect global de la surface. Nous ne considérons pas la fine couche d'eau pouvant se trouver sur la surface du matériau. (voir section 4.7).

Le modèle de rendu

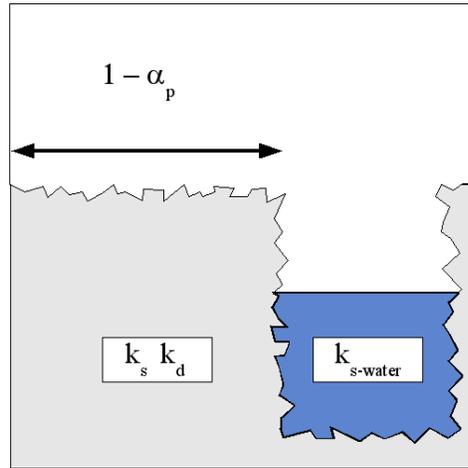


FIGURE 4.14 – Pore partiellement rempli d'eau.

La figure 4.14 montre une surface poreuse dont un pore est partiellement rempli d'eau. Dans cette extension et pour isoler l'influence de la porosité, nous considérons que la partie de surface non poreuse est inchangée. Nous faisons l'approximation que la surface de l'eau prisonnière des pores est proche d'un miroir parfait. Ainsi, la contribution de chaque pore à la réflexion diffuse est remplacée par une contribution progressive à la réflexion spéculaire. Ce phénomène correspond au remplissage progressif du pore et est simulé en utilisant le modèle générique précédemment présenté. Le modèle adapté devient alors :

$$\begin{aligned}
 k_{d-poro-wet} &= k_d \cdot (1 - \alpha \cdot G_p) \\
 &+ \left(k_d \cdot \alpha \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \right. \\
 &\left. + k_s \cdot (1 - A_p) \cdot \alpha \cdot G_p \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{t_{fil}} \right)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$k_{s-poro-wet} = k_s (1 - \alpha \cdot G_p) + k_{s-water} \cdot \alpha \cdot G_p \cdot \frac{\Delta t}{t_{fil}} \tag{4.7}$$

Avec A_p la perte totale d'énergie lumineuse due aux rebonds dans le pore, G_p le coefficient de masquage/ombrage, α la portion de surface couverte par la porosité et $k_{s-poro-wet}$ le coefficient spéculaire de l'eau.

4.6.1 Animation du modèle

La wet texture

Pour accroître le réalisme de notre rendu, nous simulons des interactions courantes faisant intervenir le mouillage et/ou le séchage des surfaces. Dans ce but, nous allons ajouter une texture pour contrôler notre modèle. Nous appelons cette texture : "La wet texture". C'est une texture 2D en niveau de gris texturé sur chaque modèle. Nous pouvons en extraire une valeur et une position sur la surface. Le niveau de gris nous donne une valeur comprise entre 0 (noir) et 1 (blanc). Nous interprétons cette valeur comme le point de départ du mouillage/séchage lors de notre simulation. En temps relatif, les pixels noir seront mouillés en premier (ou séchés en dernier) et les pixels blanc seront mouillés en dernier (ou séchés en premier). Cette valeur va nous permettre d'animer notre modèle en temps réel. La *wet texture* peut alors être interprétée comme le niveau d'eau moyen dans le pore.

Pour comparer nos résultats avec des photos réelles, nous avons également mis au point une méthode simple de comparaison. En utilisant une photo réelle, nous extrayons la position et la forme des flaques d'eau présentes sur la surface. Par exemple, la méthode est utilisée sur des briques à la figure 4.17(a). Ce travail est fait de manière décorélée du système de rendu. Des exemples de textures ainsi extraites peuvent être vu a la figure 4.15. Cette texture est une texture binaire. Afin de simuler un séchage/mouillage de ces textures, nous ajoutons un gradient de couleur dans les formes correspondantes aux flaques sur la surface. Nous extrapolons ainsi empiriquement le phénomène de séchage. Ainsi, on peut observer que dans une goutte, les bords vont sécher en premier. Nous allons alors partir de ces bords pour ajouter un gradient circulaire et ajouter les informations en niveau de gris. De plus, quand la surface est entièrement mouillée, le séchage est aléatoire. Nous créons une texture empirique basée sur cette observation. Un bruit de Perlin en niveau de gris est alors appliqué sur la surface. Nous pouvons alors reconstituer un séchage et un mouillage de surface en utilisant les photos de la surface sèche ou mouillée.

De plus, afin de simuler de la pluie arrivant sur une surface, nous utilisons une autre technique. Dans un premier temps nous calculons un texture d'éclairement de notre scène en appliquant une lumière représentant les points possibles d'arrivée de la pluie (en utilisant Autodesk Maya) :

- Nous positionnons un plan émettant de la lumière au dessus de notre scène dans le modeleur.
- Nous texturons les maillages par la méthode classique de plaquage de texture 2D. (UV mapping)
- Nous calculons la texture de lumière correspondante aux maillages illuminés par le plan d'émission en utilisant Autodesk Maya.

Durant le rendu en temps réel, des gouttes de pluie vont tomber sur le maillage.

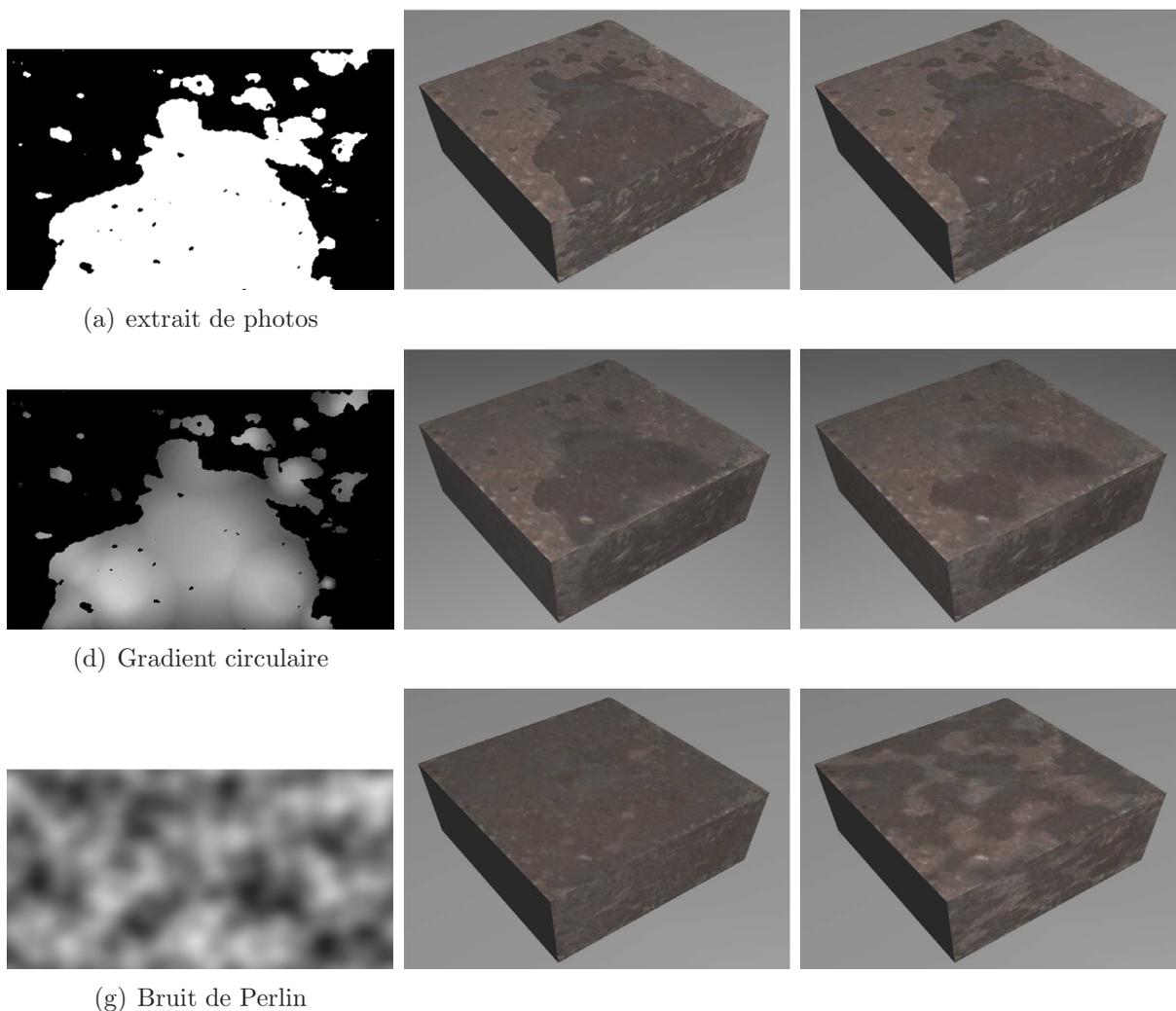


FIGURE 4.15 – Wet texture extraites des photos 4.17(c)(gauche). Exemple utilisant les Wet textures.(droite)

Paramètre de temps de notre animation

Pour notre animation, nous utilisons un temps relatif de simulation t . Comme nous venons de le voir, la wet texture nous donne une valeur entre 0 et 1 nous indiquant le moment où le pixel considéré va commencer à se mouiller. Nous allons appeler ce moment le temps t_0 . Nous introduisons le paramètre t_{fill} lié aux caractéristiques du matériau et représentant le temps moyen de remplissage du pore. Cependant, nous ne pouvons pas le définir précisément car il dépend de nombreux paramètres (pluviométrie, géométrie moyenne des pores, Loi de Jurin). Ce paramètre va également contrôler la dureté du passage entre une surface mouillée et une surface sèche. Par exemple, avec une valeur de 0, les pores vont se remplir instantanément (cas où le volume des pores est très petit par rapport à la pluviométrie). Le passage entre une zone sèche et une zone mouillée se fera alors sans transition. Pour nos simulations nous utilisons une valeur comprise entre 0.10 et 0.50 afin d'avoir des résultats visuels satisfaisants. Les valeurs de Δt peuvent alors être données :

Δt	Value
0	$0 < t < t_0$
$t - t_0$	$t_0 < t < t_0 + t_{fill}$
t_{fill}	$t_0 + t_{fill} < t < 1$

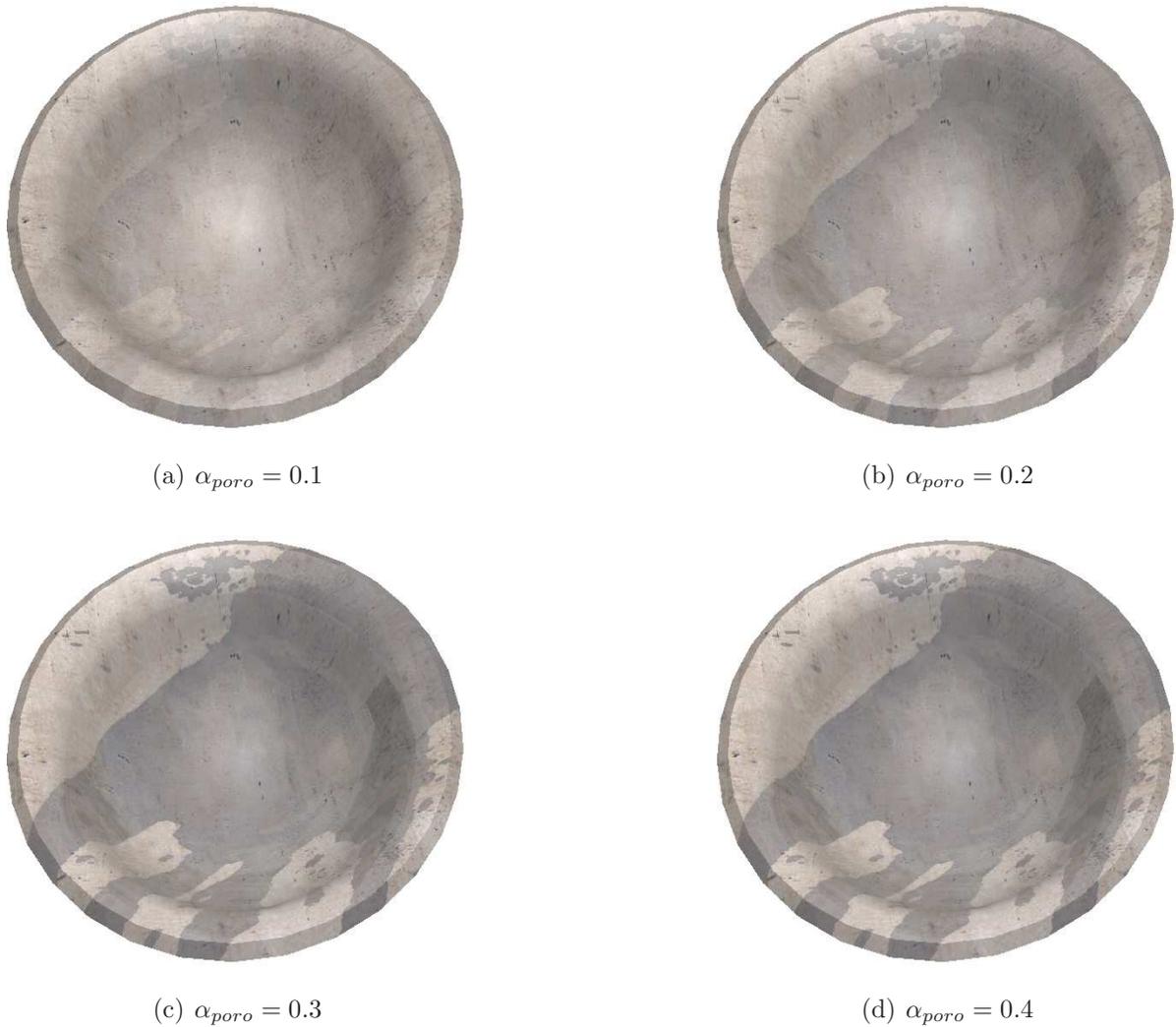
4.6.2 Résultats de la simulation de surface mouillée

Tout d'abord, nous allons comparer notre modèle avec de vrais photos. La figure 4.17(a) montre une photo avec deux briques sèches. La figure 4.17(b) montre les mêmes briques en temps réel en utilisant notre modèle de porosité temps réel.

De l'eau est ensuite appliquée sur ces briques. La figure 4.17(c) montre les résultats de cette interaction humaine. A partir de cette photo, nous extrayons une wet texture par la méthode décrite en 4.6.1 (voir par exemple la figure 4.15). La scène est alors rendue en utilisant notre modèle en temps réel voir 4.17(d).

Les effets de la pluie peuvent également être représentés. La figure 4.18 montre une simulation de pluie tombant sur un bas relief en utilisant le modèle de mouillage et une texture générée comme décrit au paragraphe 4.6.1. La simulation débute sur un modèle poreux sec et se termine avec un bas relief complètement mouillé en accord avec la wet texture. Les gouttes sont stockées dans une texture qui est également en niveau de gris et que l'on appellera la texture de goutte. Cette texture est constituée de lignes et de points et est prise en compte dans un buffer lors du rendu. Ces lignes et ces points représentent l'impact des gouttes de pluies sur le maillage. La valeur RVB de cette texture est combinée avec la valeur issue de la wet map pour obtenir la quantité d'eau réellement tombée sur la surface. La paramétrisation est la même pour les deux textures. De plus, c'est une texture aditionnelle requise uniquement par la simulation de pluie.

Afin de mettre en valeur le rôle de α_{poro} , la figure 4.16 présente un échantillon de 4 images représentant le même pot de fleur dans les mêmes conditions d'éclairage et au même moment. Le seul paramètre variant est α_{poro} . Ce paramètre représente le pourcentage

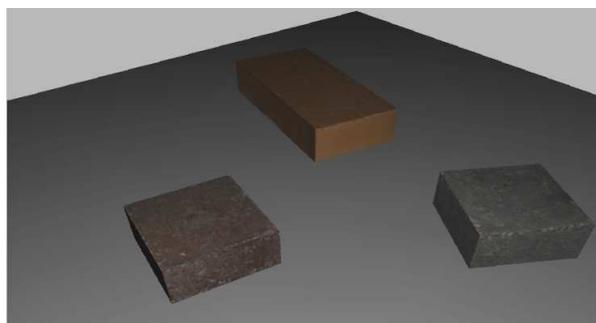
FIGURE 4.16 – Rôle de α_{poro} dans notre modèle

de surfaces couvertes par des pores. Quand celui ci augmente, les effets du mouillage s'amplifient. La surface devient nettement plus spéculaire et plus foncée. La contribution de l'eau au comportement spéculaire remplace une partie du caractère diffus de la surface et est augmenté par l'accroissement du nombre de pores sur la surface.

Afin de comparer nos résultats avec ceux de Jensen, nous avons réalisé une scène similaire à celle du caillou sur la plage de sable que l'on peut retrouver dans [JLD99]. La figure 4.19 montre notre scène représentant un caillou sec (4.19(a)) et le même caillou mouillé (4.19(b)). Nous pouvons donc voir que notre modèle permet un rendu très proche de celui de Jensen.



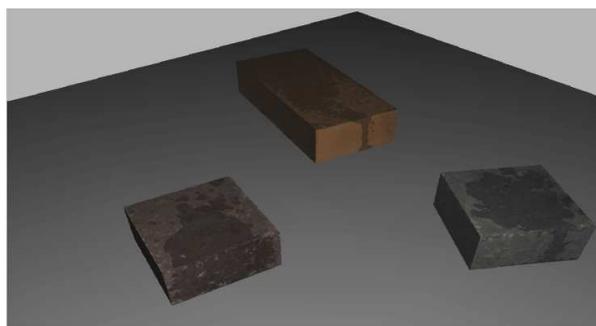
(a) Photo réelle de briques sèches



(b) Rendu en temps réel de briques poreuses



(c) Photo réelle de briques mouillées



(d) Rendu en temps réel de briques poreuses mouillées

FIGURE 4.17 – Comparaison de notre modèle avec des photos réelles.

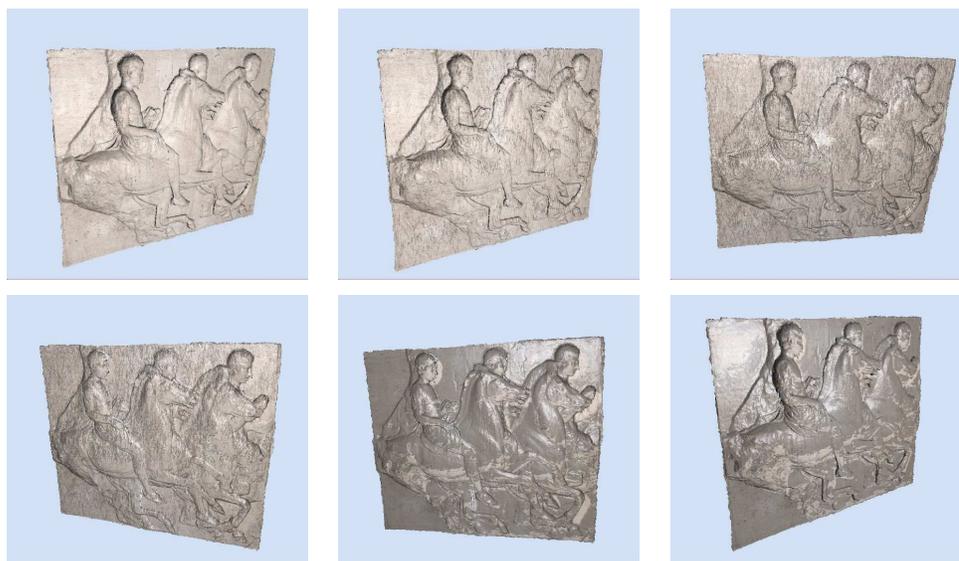


FIGURE 4.18 – Pluie tombant sur un bas-relief



(a) pierre sèche



(b) pierre mouillée

FIGURE 4.19 – Une scène inspirée de [JLD99], montrant une pierre sèche et une pierre mouillée

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une implémentation du rendu de surface poreuse en temps réel. Nous avons également introduit un modèle générique permettant de prendre en compte l'introduction (naturelle ou non) d'un matériau étranger à la surface. De ce modèle générique, nous avons pu tirer des extensions prenant en compte des changements d'aspects courants. Ces extensions permettent de réaliser le rendu de la pollution des surfaces poreuses ainsi que leur aspect mouillé. En sus de leur importance visuelle, ces défauts majeurs peuvent être également d'une grande importance dans d'autres domaines. Ainsi la prédiction de la pollution des monuments publics (cathédrales par exemple) est un enjeu économique dans le secteur du nettoyage. Comme notre modèle est phénoménologique, donc simple et intuitif, il est facile de l'intégrer dans des logiciels de simulations pour des applications d'architecture.

Les phénomènes faisant intervenir le modèle générique sont nombreux. Nous n'avons présenté ici que deux extensions majeures. Cependant, de nombreuses autres extensions pourront être simulées en utilisant ce modèle simple. Par exemple, nous pouvons présenter le phénomène d'efflorescence à la figure 4.20. Les efflorescences sont une fine couche de sel déposés dans les pores de la surface [HACF01]. L'apparition des efflorescences implique un important problème visuel car ces changements rendent le nettoyage de certaines constructions obligatoires. De plus, des dommages sur la construction même peuvent apparaître à cause d'elles.

Autre exemple, le vieillissement de la peinture ou des vernis dépend notamment de la porosité sous-jacente du matériau. L'utilisation du modèle générique permet d'introduire de nouveaux modèles de vieillissements liés à la porosité. Cependant, notre modèle peut être amélioré en décrivant de manière plus précise les phénomènes et les interactions dans le pore. Ce travail doit être fait pour tendre vers un modèle physiquement réaliste. Le modèle ne sera cependant pas utilisable en temps réel. Par ailleurs, la porosité en surface, bien qu'importante, ne doit pas être prise en compte seule pour un calcul efficace et précis de l'interaction locale entre matière et lumière. Des modèles de réflexion volumique peuvent également être induits par la porosité contenue dans le matériau. Ces travaux consistent donc à tendre vers des modèles physiquement robustes pour améliorer la qualité globale des images produites.

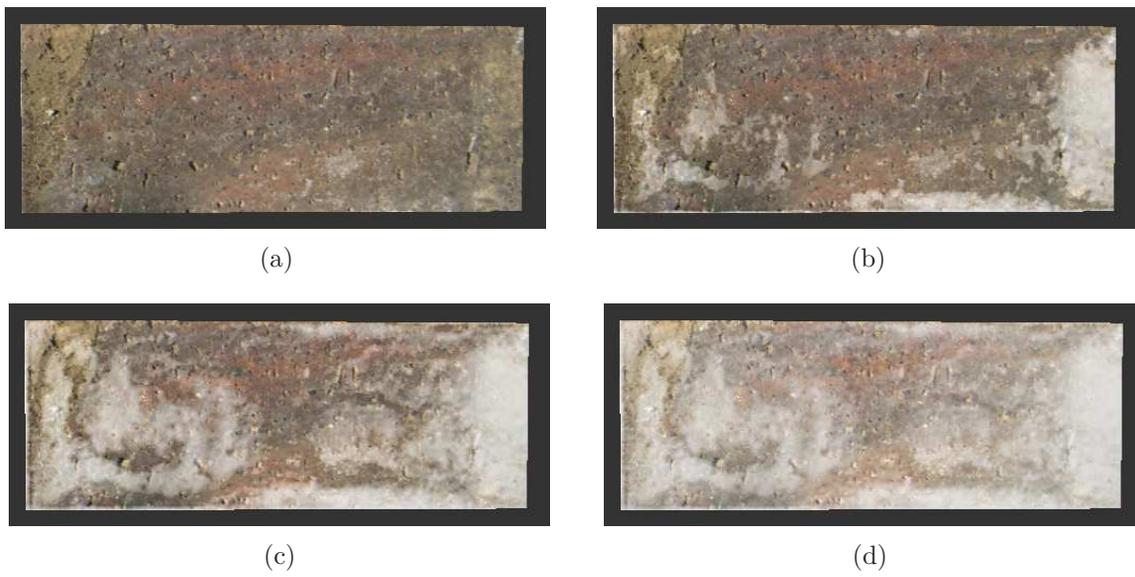


FIGURE 4.20 – Simulation de l'efflorescence

5

Le phénomène de diffusion en électromagnétisme

Dans ce chapitre, nous présentons de manière succincte la manière d’aborder le problème de la réflexion des ondes en électromagnétisme. Dans ce domaine précis, le phénomène de réflexion se limite (ou le terme désigne) uniquement la réflexion sur des conducteurs parfaitement lisses (équivalent électromagnétiques des miroirs parfait). Dès que les surfaces deviennent rugueuses, un autre phénomène est mis en jeu, la diffusion des ondes. Dans un premier temps, nous présentons la problématique de la description de surfaces dans le contexte électromagnétique. Les notions abordées précédemment peuvent se retrouver également dans ce domaine. Dans un second temps, nous introduisons les notions de base concernant la réflexion des ondes, puis nous présentons le phénomène de diffusion de ces mêmes ondes. Les deux méthodes utilisées pour la résolution du problème de la diffusion : les méthodes exactes et les méthodes asymptotiques sont abordées. Nous étudions également plus en détail les deux grandes familles de méthodes asymptotiques. La première méthode est la théorie initialement introduite par Beckmann et Spizzichinno ([BS63]). L’autre famille n’a jamais été utilisée en synthèse d’images. La dernière partie de ce chapitre montre alors la faisabilité de l’utilisation en synthèse d’images d’une méthode issue de cette deuxième famille : la méthode des petites perturbations. Dans la continuité de notre travail sur l’état de surfaces, nous présentons une description de surfaces à base de fractales qui est utilisée en électromagnétisme.

5.1 Problématique croisée de la description de surfaces

L’introduction des FDRBS en synthèse d’images est intimement liée à l’étude de la diffusion des ondes électromagnétiques. Les modèles analytiques sont tous établis à partir de modèles de diffusion électromagnétique reconnus. Les modèles électromagnétiques ont néanmoins toujours eu un temps d’avance. Cet état de fait est notamment dû à l’ancienneté et au développement de l’électromagnétisme par rapport à la synthèse d’images. Cependant, en parallèle, d’autres modèles, spécifiquement adaptés à la synthèse d’images ont fait leur apparition pour modéliser des comportements particuliers de la lumière. L’objet

de cette partie est de présenter comment il serait possible d'utiliser notre étude de la micro géométrie de la surface en synthèse d'images dans le domaine de l'électromagnétisme.

5.1.1 Expression de la FDRB en électromagnétisme

On peut exprimer les propriétés de l'éclairement local en termes électromagnétiques. Tout d'abord, il est possible de définir une FDRB comme la rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente en un point x d'une surface pour une polarisation donnée et une direction donnée par les angles incidents et réfléchis θ_i et θ_r [Yan06]. Cette fonction s'exprime alors par la relation :

$$F_r^{em} = R_{//,\perp}(\theta_i, \theta_r) p(\theta_i, \theta_r) \int_{\Omega} e^{-j\phi_i(h, \theta_i, \theta_r)} p(h) \partial dh \quad (5.1)$$

Avec Φ_i , la phase de l'onde incidente, $R_{//,\perp}$, le coefficient de réflexion de Fresnel (dépend de la polarisation). La loi de probabilité se retrouve dans la terme $p(\theta_i, \theta_r)$. On a ici un terme qui va dépendre entièrement de la description de surface.

Cette définition de la FDRB en utilisant le rapport des énergies électromagnétiques nous amène à diverses applications de notre étude de la micro géométrie de la surface.

Tout d'abord, nous pouvons mettre en avant la notion de rugosité dans ce modèle. La rugosité est apparente dans le terme $p(h)$ et représente la loi de probabilité d'avoir une hauteur spécifique de surface. Cette loi va décrire de manière statistique la surface. On va donc se limiter à ce cas pour notre étude. On peut d'ailleurs faire une comparaison avec le modèle de Beckmann qui utilise une description Gaussienne de la surface et que l'on peut facilement retrouver ici. Nous voyons également que les nouvelles distributions non gaussiennes pourraient également être utilisées. Il est notamment concevable d'utiliser le modèle d'Ashikminn ([APS00]) dans ce cas et de l'adapter à un modèle de diffusion de surfaces rugueuses génériques.

Le point suivant que l'on va aborder est la notion de taille de rugosité. Comme on peut le deviner, la fréquence des ondes est différente entre les deux domaines. On ne parle d'ailleurs pas de la fréquence de la lumière mais plutôt de longueur d'onde. Dans notre cas, cette notion de longueur d'onde est facile et intuitive à utiliser quand on veut la comparer avec les dimensions de la rugosité ou de la porosité. L'étude de la diffusion des ondes électromagnétiques sur des surfaces rugueuses doit prendre en compte l'état complet de la surface. Dans ce but, l'introduction de la notion de porosité est importante.

La porosité, comme nous l'avons expliqué au chapitre 4, concerne de nombreux matériaux. Le modèle de réflexion de la lumière est modifié des lors que la taille du pore devient importante. Un pore non visible aura une taille (diamètre) de l'ordre du micron. La longueur d'onde de la lumière est de l'ordre de la centaine de nanomètre. On a donc un rapport 10 entre ces deux grandeurs. L'ordre de grandeur de la porosité (qu'on appellera macroporosité à cause de sa taille) de matériaux de constructions usuels ou de matériaux que l'on peut rencontrer dans la nature va du millimètre à la dizaine de centimètres. Ainsi, on peut donner deux applications. La première concerne l'étude des routes. L'enrobée de goudron va piéger des cailloux de l'ordre du centimètre. Certains de ces cailloux ne seront pas complètement recouverts ou se détacheront. De petites cavités résulteront de ce processus. Les

longueurs d'ondes de l'ordre du millimètre seront alors concernées et interagiront avec la porosité de ces surfaces. Nous pouvons citer comme application concernée les applications Extrêmement Hautes Fréquences ou TéraHertz. ($f > 300GHz$). La seconde application concerne les radars basses fréquences utilisés pour l'exploration non destructive du sous-sol. (Par l'industrie pétrolière notamment [Ami98]). Les liquides recherchés sont piégés dans les cavités de la surface. Ces cavités ne sont pas, à priori, de la porosité, comme défini en science des matériaux. Cependant, le rapport entre la taille de ces défauts et la longueur d'onde est comparable au rapport que l'on trouve dans notre modèle de porosité. Nous pouvons alors assimiler ces cavités à de la porosité. De plus, les détails de porosité que l'on peut rencontrer dans ce contexte sont assez importants. Ils peuvent alors interagir avec les ondes Radio (Basses fréquences). La figure 5.1 illustre ce type de porosité. Les dimensions de la surface sont de l'ordre de la dizaine de centimètres.



FIGURE 5.1 – Macroporosité d'un sol naturel (Wiliam.A Wisner 1972)

L'étude de l'électromagnétisme est comme nous venons de le montrer liée à nos travaux de recherche. Il est possible de trouver des extensions de nos travaux dans ce domaine. Il est cependant également possible de trouver une réciproque. C'est ce qui est démontré dans les paragraphes suivants.

5.2 La réflexion et la transmission des ondes électromagnétiques

Les fondements de l'électromagnétisme se trouvent dans la théorie de Maxwell.

$$\vec{\text{rot}}\vec{E} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

$$\vec{\text{rot}}\vec{H} - \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (5.3)$$

$$\vec{\text{div}}\vec{E} = 0 \quad (5.4)$$

$$\vec{\text{div}}\vec{H}=0 \quad (5.5)$$

On considère les vecteurs \vec{H} et \vec{E} au point d'observation. Les équations de Maxwell (voir Equation 5.2 à 5.5) définissent le comportement des ondes électromagnétiques dans un milieu de propagation dont les caractéristiques électromagnétiques sont les suivantes :

- permittivité relative $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ qui dépend de la conductivité électrique σ selon $\bar{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega}$
- perméabilité relative $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

Comme dans le cas de la réflexion des ondes lumineuses, à l'interface entre deux milieux homogènes, on retrouve les phénomènes de transmission et de réflexion. Dans notre cas on ne va considérer que le cas d'un conducteur parfait. Nous n'aurons dans ce cas pas de transmission. La figure 5.2 illustre ce phénomène. Les indices ou exposants *inc* et *r* sont utilisés pour identifier les ondes incidentes et les ondes réfléchies. Dans le cas d'un conducteur parfait, l'intégralité de l'onde incidente est réfléchi. La loi qui régit ce phénomène est la loi de Snell-Descartes (l'indice *t* désigne l'onde transmise e) :

$$n_{inc} \sin(\theta_{inc}) = n_t \sin(\theta_t) \quad (5.6)$$

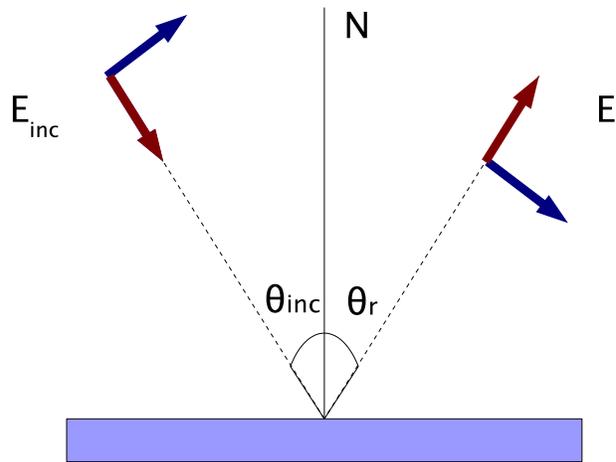


FIGURE 5.2 – Réflexion d'une onde sur un conducteur parfait

5.3 La diffusion des ondes électromagnétiques

Dans la section précédente, nous avons pu voir le phénomène de réflexion des ondes électromagnétiques. Ce phénomène est bien connu dans le cas d'une surface parfaitement plane. Dans le cas réel, la rugosité de la surface va introduire une diffusion de l'onde. Cette diffusion de l'onde est similaire à la réflexion des ondes lumineuses sur une surface rugueuse décrite précédemment. On ne retrouve cependant pas de notion de FDRB à proprement parler. L'étude de ce phénomène est en général réalisée de manière globale et le plus

précisément possible. Nous allons essayer dans ce qui suit de présenter succinctement les différentes méthodes de résolution de ce problème. Le but n'étant pas de faire ici un état de l'art de ces techniques, le lecteur intéressé trouvera dans la littérature de nombreuses références à ce sujet ([TKD00, TKD01, TK01]).

On trouve classiquement deux types d'approche du problème de diffusion. Les méthodes rigoureuses, dites exactes se veulent les plus générales possibles. Ces méthodes sont par exemple la Finite-Difference Time Domain (FDTD), la Finite Element Method (FEM) ou les Equations Intégrales (IE) ou la méthode des moments (MoM). Les méthodes asymptotiques, ou approchées reposent sur des hypothèses de départ simplificatrices qui permettent de représenter un phénomène précis. Elle se divisent en deux familles : les méthodes haute fréquence et les méthodes basse fréquence. Parmi les méthodes haute fréquence, on peut particulariser l'Approximation de Kirchhoff (AK) [BS63, Ogi]. Elle est à la base de la FDRB de He Torrance [HTSG91]. Parmi les méthodes basse fréquence, on trouve la méthode des petites perturbations. Ces méthodes basse fréquence sont bien adaptées quand la longueur d'onde est grande devant le défaut. Dans notre cas, on pourrait alors par cette méthode représenter de manière précise la réflexion des ondes sur des surfaces très spéculaires (typiquement des métaux). Nous allons donc présenter dans la partie suivante, une étude préliminaire sur la méthode des petites perturbations.

5.4 Etude de la méthode des petites perturbations [Yan06]

Ce modèle est historiquement le premier modèle à avoir été étudié dans le cadre de la diffusion des ondes électromagnétiques. Il a d'abord été introduit par [Ray76] dans le domaine acoustique. Le modèle de Rice est communément utilisé dans le cadre des surfaces rugueuses diélectriques [Ric51, SO63]. Ce modèle montre que le champ diffusé par une surface plane à faibles rugosités (La longueur de corrélation τ et σ faibles devant la longueur d'onde λ) peut être représenté par une superposition d'ondes planes et donc peut s'écrire comme une série de perturbations. Cette technique fut appliquée aux surfaces rugueuses diélectriques par Ulaby et Valenzuela [UMF86, GR67].

La surface est caractérisée par la somme de différentes variables aléatoires décrivant la rugosité du sol comme le montre l'équation suivante :

$$z = \sum_{m,n} p(m, n).e^{-ja(mx+ny)} \quad (5.7)$$

avec $a = \frac{2\pi}{L}$ et L la période de la surface. $P(m, n)$ est une variable aléatoire indépendante telle que :

$$\langle P(m, n).P^*(m, n) \rangle = \frac{a^2}{4} W_d(p, q) \quad (5.8)$$

Où p et q sont les nombres d'ondes de la surface en radian respectivement en x et y ($p = \frac{2\pi}{L_x}etq = \frac{2\pi}{L_y}$) avec L_x et L_y les périodicités de surface en x et y) et où $W_d(p, q)$ est le spectre discrétisé de la surface.

Lorsqu'une onde incidente interagit avec le sol diélectrique, une partie de l'onde est transmise, une autre est diffusée dans toutes les directions du milieu 1 (composantes incohérentes) et une autre partie est réfléchie dans la direction spéculaire (composante cohérente) Le champ total dans l'air s'exprime comme la somme des champs incident E_i , cohérent E_{coh} et incohérent E_{incoh}

$$\vec{E} = \vec{E}_{inc} + \vec{E}_{coh} + \vec{E}_{incoh} \quad (5.9)$$

Le SPM caractérise en général son champ électrique total comme suit

$$\vec{E} = \vec{E}^+ \sum A_{mn} \cdot E(m, n, z) \quad (5.10)$$

Où \vec{E}^+ est la somme de l'onde incidente et de l'onde réfléchie et les termes $E(m, n, z)$ sont les ondes diffusées incohérentes dues aux perturbations d'amplitude A_{mn} .

Cette méthode peut être utilisée pour caractériser la réflexion de la lumière sur une surface très peu rugueuse. La figure 5.3 montre les premiers résultats de cette étude.

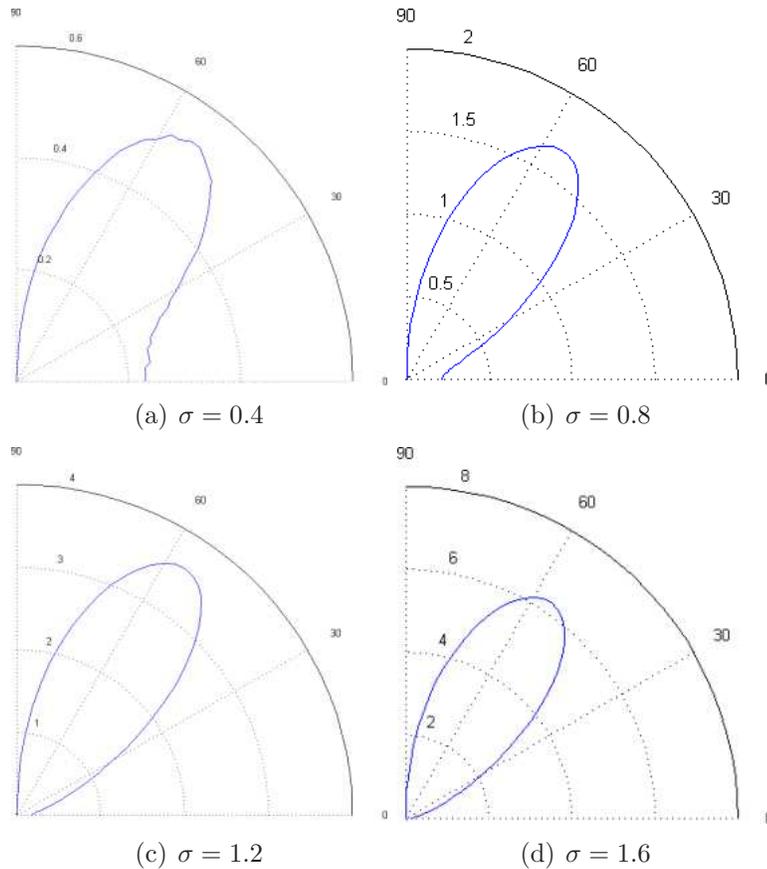


FIGURE 5.3 – Méthode des petites perturbations $0 < \theta < 90, \Phi = 0, \tau = 1$

Nous avons tracé ici l'émissivité totale d'une surface décrite par une description de surfaces gaussiennes (σ variable, $\tau = 1$) de permittivité relative $\epsilon = 17 + i2$. Le tracé se réalise dans le plan vertical ($\Phi = 0$). La surface est arrosée par un onde plane de

polarisation T.E. d'incidence $\Theta_{inc} = 45^\circ$ Comme on peut le voir sur cet ensemble de figure, l'aspect général de l'onde électromagnétique issue de la méthode des petites perturbations ressemble très fort à une FDRB .

Les résultats présentés ici ne sont qu'une étude préliminaire de la conception d'une FDRB à partir de la méthode des petites perturbations. Cependant, elle montre l'intérêt de l'étude de tels modèles pour la synthèse d'images

Les modèles qui viennent d'être présentés reprennent le formalisme classique des descriptions de surface utilisées en synthèse d'images. Cependant, il existe aussi des modèles dont l'étude repose sur une description de surface qui n'a jamais été utilisée en synthèse d'images. La section suivant présente un formalisme à base de fractales.

5.5 Modèles de surface à base de fractales

Mandelbrot a développé plusieurs modèles mathématiques fractals. Le premier paramètre caractérisant ces derniers est la dimension fractale. Pour le cas d'une surface, cette dimension est une notion très proche de la notion de rugosité. En effet, si on génère des surfaces avec une même forme mais avec des dimensions fractales différentes, on remarque une croissance de la rugosité du sol avec cette dimension. Cette notion de dimension fractale nous permettra de caractériser de manière originale la rugosité d'une surface.

Le modèle fractionnaire brownien est une extension de la notion usuelle du mouvement brownien. Le mouvement brownien présente une grande importance historique. Il fut le premier exemple d'un processus physique non dérivable. Une fonction $h(x)$ est une fonction fractionnaire brownienne si :

$$\forall x, \Delta x \quad P_r\left(\frac{h(x + \Delta x) - h(x)}{||\Delta x||^H} < y\right) = F(y) \quad (5.11)$$

où $F(y)$ est une fonction de distribution cumulative indépendante de x . Le paramètre H s'appelle l'exposant de Hust. Cette condition est applicable dans le cas général où x et $h(x)$ sont des vecteurs. Si x et $h(x)$ sont des scalaires, alors la dimension fractale D d'une surface décrite par $h(x)$ s'exprime sous la forme suivante :

$$D = 2 - H \quad (5.12)$$

$H = \frac{1}{2}$ correspond à une fonction brownienne classique.

La fonction brownienne fractionnaire est une fonction continue qui respecte la description statistique établie en 5.11 pour toutes les échelles D_x sur un intervalle $[D_{xmin}, D_{xmax}]$.

Dans ce formalisme, on va représenter la rugosité par une valeur de haut niveau nommée dimension fractale. On va pouvoir de cette manière représenter par un terme unique les surfaces classiquement représentées par une loi gaussienne et une longueur d'auto corrélation. On peut donc voir dans ce terme une manière générique de représenter la rugosité de la surface. Il existe plusieurs méthodes pour le calcul de la dimension fractale tel que la méthode des boîtes de Chen [CC93] couramment utilisée.

5.6 conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux pistes d'étude de la diffusion des ondes électromagnétiques par une surface rugueuse. La première concerne l'étude de modèles de diffusion électromagnétique qui n'ont pas encore été étudiés. Leurs spécificités propres vont permettre de représenter des surfaces parfois peu voire pas étudiées. La seconde piste d'étude concerne la représentation des surfaces qui peut être différente de celles classiquement utilisées en synthèse d'images. On peut également adapter les modèles de diffusion issus de ces descriptions de surfaces afin de concevoir de nouveaux modèles de FDRB prenant en compte plus de comportements comme par exemple la rétro diffusion.

6

Conclusion et Perspectives

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans une étude globale du rendu de phénomènes naturels et plus particulièrement du rendu des surfaces et de leur vieillissement. En effet, afin de renforcer le réalisme des images de synthèse, une étude des défauts pouvant apparaître sur les objets s'est avérée nécessaire. Dans ce contexte, nous avons donc décidé d'étudier de manière précise l'effet de la micro géométrie de la surface sur le calcul de l'éclairage local.

Dans le chapitre 2, nous avons défini la notion de rugosité en synthèse d'images. Pour cela, nous nous sommes en priorité concentré sur les modèles de rugosité invisible à l'oeil nu. En effet, c'est typiquement l'échelle de rugosité qui a une influence forte sur l'aspect visuel et sur le vieillissement. Cette étude nous a amené à considérer la rugosité comme une notion physique à part entière. Nous avons alors du chercher dans un domaine connexe (la science des matériaux) pour trouver des définitions correspondant à l'usage en synthèse d'images. Nous avons pu isoler plusieurs types de rugosité utilisée à la fois en synthèse d'images et en science des matériaux. Cependant, il existe aussi des utilisations de la rugosité en synthèse d'images qui ne correspondent pas à une définition bien identifiée. Ce sont en général des modèles de rugosités issus de l'expérimentation et utilisé dans des modèles phénoménologiques. On a pu ainsi voir qu'il existait de nombreuses définitions de la rugosité en synthèse d'images.

Cependant, l'étude présentée au chapitre 3 essaye de donner un lien entre ces différentes rugosité. Nous avons notamment remarqué que les rugosités utilisées étaient issues de descriptions statistiques de surfaces. Or, on sait que cette description statistique est caractérisée par une loi de distribution. Dans notre cas, la loi que l'on retrouve est la loi Normale (ou Gaussienne). D'une part, nous avons essayé de trouver un lien entre les différentes définitions de la rugosité. D'autre part nous avons utilisé cette distribution Gaussienne comme vecteur commun de description de surface. Cette étude montre notamment que toutes les rugosités utilisées en images de synthèses trouvent leurs fondements dans la théorie statistique de Gauss. Nous nous sommes donc naturellement tourné vers une autre manière de représenter une surface statistique. Ainsi, nous proposons d'utiliser les distributions dites uniforme, exponentielle, de Cauchy, de Rayleigh et de Simpson afin de décrire l'état de la surface. Cela nous amène à produire de nouveaux types de reflet spéculaire.

Dans le chapitre 4, nous nous sommes intéressé à un autre aspect de la représentation

des surfaces. Dans un but de réalisme physique, nous devons prendre en compte d'autres phénomènes que la rugosité pour représenter le plus fidèlement possible le comportement de la lumière. Nous avons choisi d'étudier la porosité comme élément majeur de l'aspect visuel de nombreuses surfaces. Les surfaces en questions sont nombreuses et variées. Les matériaux de construction sont un exemple fréquemment rencontré de ce type de surface. En plus d'avoir une influence visuelle nette comme les précédentes études l'ont montré ([MDG00]), la porosité va influencer la façon dont va vieillir une surface. Nous avons étudié un certain nombre de phénomènes liés à la porosité. Nous en avons déduit un modèle générique permettant de prendre en compte de nombreux phénomènes physiques variés liés à la porosité. Nous avons également présenté deux extensions que nous avons détaillées. Ces extensions concernent la simulation de la pollution des surfaces par l'introduction de particules de pollution dans les pores de la surface. Cela induit un changement visuel majeur de la couleur de la surface. Notre modèle permet de prendre en compte en temps réel, ce changement d'aspect. Un autre phénomène que nous avons étudié est le phénomène de mouillage et de séchage des surfaces poreuses. Le changement d'aspect est lié à une interaction de la matière avec un liquide (nous avons pris en compte de manière l'interaction de la surface avec de l'eau qui résulte d'une pluie ou d'une interaction humaine). Le modèle générique nous a ainsi permis d'effectuer le rendu en temps réel de ce type de phénomène.

Enfin, le chapitre 5 présente de manière succincte l'étude effectuée dans le domaine de la diffusion des ondes électromagnétiques. Ce domaine est historiquement très proche de celui de l'étude des FDRB. De nombreuses FDRB analytiques ont été déduites de modèle de diffusion existant et établi. Dans notre but de réunir le plus d'informations possibles sur l'utilisation de la géométrie de la surface, nous avons décidé de regarder du côté de ce domaine pour pouvoir réaliser des comparaisons. Nous avons pu déduire de cette étude deux choses. Tout d'abord, il existe encore des nombreux modèles de diffusion que l'on pourrait utiliser pour réaliser de nouvelles FDRB. Chacun de ces modèles a ses spécificités propres et pourrait apporter des nouveautés au niveau du rendu. Nous avons commencé à étudier le modèle de petites perturbations. Ce modèle est classique dans le domaine de la diffusion des ondes électromagnétiques. Cependant, il n'a jamais été étudié en synthèse d'images. De plus, nous pouvons également voir que d'autres modèles de représentation de surfaces ont été utilisés. La description de surface à bases de fractales, bien qu'ancienne n'a à notre connaissance jamais été étudié dans une optique d'éclairage local. Il serait ainsi intéressant de voir comment à partir de cette représentation et des modèles électromagnétiques qui leurs sont associés on pourrait en déduire de nouvelles BRDF.

Ce travail offre de nombreuses perspectives. Nous avons présenté à la fin de chaque chapitre un instantané du futur de chacune de ces études. Les perspectives que nous allons présenter ici concernent la globalité de l'étude. Le temps consacré à l'étude des modèle de diffusion électromagnétique utilisés en propagation indoor nous a fait découvrir un domaine d'étude proche de l'étude du lancer de rayons. Les logiciels de propagation d'ondes basés "*rayons*" ont prouvé leur intérêt majeur dans l'étude des canaux radio mobiles. Des problématiques communes apparaissent et il serait utile de voir comment se résolvent ces problèmes dans un domaine et de l'adapter à l'autre. Par exemple, la propagation des ondes sous surfaciques a fait l'objet d'études poussées dans le domaine

de l'image. En effet, ce phénomène a une influence majeure sur l'aspect visuel de certaines matières comme par exemple la peau. Dans ce cas précis, l'effet de propagation interne au matériau est inhérent à sa structure poreuse. Les pores vont venir conduire la lumière dans le matériau. La lumière ainsi conduite va ressortir en un autre point de l'objet. Un phénomène identique va être mis en jeu lorsque l'onde électromagnétique va rencontrer certains murs creux. Un autre exemple est basé sur les temps de calcul souvent long des méthodes exactes. L'utilisation de modèles simplifiés comme celui de Phong pourrait permettre d'ouvrir de nouvelles voies d'étude comme le placement rapide d'antennes dans les zones non arrosées ou la détermination en première passe de l'endroit exact à étudier dans une étude plus globale.

A

Pixel Shader et Vertex Shader pour la porosité

A.1 Pixel Shader pour les surfaces mouillées

```
struct Vert
{
    float4 pos      : POSITION;
    float2 coefs    : TEXCOORD0;
    float2 tc0      : TEXCOORD1;
    float3 norm     : TEXCOORD2;
    float3 objpos   : TEXCOORD3;
    float3 R        : TEXCOORD4;
};

struct Pix
{
    float3 col : COLOR0;
};

Pix main( Vert I,
          // textures
          const uniform sampler2D  colorMap : register(s0),
          const uniform sampler2D  wetMap   : register(s2),
          const uniform samplerCUBE envMap   : register(s3),
          const uniform sampler2D  dropsMap : register(s5),
          // constant parameters
          const uniform float4 time      : register(c0),
          const uniform float3 camPos    : register(c8),
          const uniform float3 lightPos  : register(c9),
          const uniform float4 phong    : register(c10),
          // ka, kd, ks, exp
```

```

const uniform float3 ambCol    : register(c11),
const uniform float4 param    : register(c12)
// ksWater, poreFillingTime
)
{
    // Globals
#define M_PI 3.14159265358979323846
float alphaPoro = 0.3; // [0..1]
float sp        = 2.0; // [1..10]
float m         = 0.08; // [0..1]
float ks = phong.z;
float kd = phong.y;
float kr = 1.0;
float3 finalCol;
// Porosity reflectance computation
float3 cameraDirection
= normalize( camPos - I.objpos );
float3 lightDirection
= normalize( lightPos - I.objpos );
float k = sqrt( 2.0 * m * m / M_PI);
float k1 = dot( I.norm, cameraDirection);
float k2 = dot( I.norm, lightDirection );
// Check BDRF definition domain
if( k1 <= 0.0 || k2 <= 0.0 )
{
    finalCol.rgb = 0.0;
}
else
{
    // Shadowing/masking terms
float Gp = ( k1 * k2 )
/ ( ( k1 - k * k1 + k )
* ( k2 - k * k2 + k ) );
float ka = 1.0 - ks - kd ;
float nb = sp *
( 3.7 - 2.0 * pow( (acos(k2)
+ acos(k1))/2.0) -
(2.0 * M_PI) / (sp + 6.0), 2.0 ) );
float Ap = ka * ( 1.0
- pow( 1.0 - ka, nb ) )
/ ( 1.0 - ( 1.0 - ka ) );

    // Porous surface
float alphaGp = alphaPoro * Gp;
float poroCoef =

```

```

alphaGp * ( 1.0 - Ap );
float ksporo =
ks * ( 1.0 - alphaGp );
float kdporo = kd * ( 1.0 - alphaGp * Ap )
+ ks * alphaGp * ( 1.0 - Ap);

// Diffuse color
float3 diffColor =
tex2D( colorMap, I.tc0 ).gbr;

// Lightmap
float3 waterExposure =
tex2D( wetMap, I.tc0 ).rgb;
#ifdef USE_DROPSMAP
waterExposure *=
tex2D( dropsMap, I.tc0 ).r;
#endif
float t0 = waterExposure.r;
float t = 1.0 - time.x;

// Interpolated diffuse and
// specular Phong components
#define diff          I.coefs.x
#define spec          I.coefs.y
#define ksWater       param.x
#define poreFillingTime param.y

if( t0 > t )
{
float poreFillingPercentage
= ( t0 - t ) / poreFillingTime;
poreFillingPercentage
= clamp( poreFillingPercentage, 0.0, 1.0 );

finalCol = diff * (
kd * ( 1.0 - alphaGp ) * diffColor
+ kd * alphaGp * ( 1.0 - Ap )
* diffColor * ( 1.0 - poreFillingPercentage )
+ ks * alphaGp * ( 1.0 - Ap )
* diffColor * ( 1.0 - poreFillingPercentage ) )
+ spec * ( ks * ( 1.0 - alphaGp )
+ texCUBE( envMap, I.R ).rgb * ksWater
* alphaGp * poreFillingPercentage );
}
else

```

```
    {
        finalCol = diff * diffColor
        * kdporo + spec * ksporo ;
    }
}

Pix OUT;
OUT.col = finalCol + ambCol;

return OUT;
}
```

A.2 Vertex Shader pour les surfaces mouillées

```
struct appdata
{
    float4 position : POSITION;
    float3 normal   : NORMAL;
    float2 uv0      : TEXCOORD0;
};
struct Vert
{
    float4 pos      : POSITION;
    float2 coefs    : TEXCOORD0;
    float2 uv0      : TEXCOORD1;
    float3 norm     : TEXCOORD2;
    float3 objpos   : TEXCOORD3;
    float3 R        : TEXCOORD4;
};
Vert main(
    appdata IN,
    const uniform float4x4 mat
    : register(c0), // camera
    const uniform float3  camPos
    : register(c8),
    const uniform float3  lightVec
    : register(c9),
    uniform float4  phong
    : register(c10), // ka kd ks exp
    const uniform float4  uvScale
```

```

: register(c14),
const uniform float4x4 o2w
: register(c15) // object to world
    )
{
    Vert OUT;
    // screen and obj position
    OUT.pos    = mul( mat, IN.position );
    OUT.objpos = IN.position.xyz;
    // normal
    OUT.norm = IN.normal;
    // environment map coords
    float3 I = IN.position.xyz - camPos;
    OUT.R = mul( (float3x3)o2w,
reflect( I, IN.normal ) );
    // blinn/phong lighting
    float3 eye   = -1.0 * I;
    float3 light = lightVec - IN.position.xyz;
    float3 half  = normalize( light + eye );
    float  diffuse = dot( IN.normal,
normalize(light) );
    float  specular = pow( dot( IN.normal,
half ), phong.w );
    OUT.coefs = float2( diffuse, specular );
    // texture coords
    OUT.uv0 = IN.uv0 * uvScale.xy;
    return OUT;
}

```

A.3 Pixel Shader pour les surfaces mouillées

```

struct Vert
{
    float4 pos      : POSITION;
    float2 coefs    : TEXCOORD0;
    float2 uv0      : TEXCOORD1;
    float3 norm     : TEXCOORD2;
    float3 objpos   : TEXCOORD3;
};

struct Pix

```

```

{
    float3 col : COLOR0;
};

Pix main( Vert I,
    const uniform sampler2D tex0      : register(s0),
    const uniform sampler2D tex1      : register(s1),
    const uniform sampler2D lightMap  : register(s2),
    const uniform float4   seuil      : register(c0),
    const uniform float3   camPos     : register(c8),
    const uniform float3   lightPos   : register(c9),
    uniform float4   phong      : register(c10), // ka kd ks exp
    const uniform float3   ambCol     : register(c11)
)
{
    // Globals
    // -----
    #define M_PI          3.14159265358979323846
    #define FILLINGTIME  0.15
    float  alphaPoro = 0.4; // (0.. 1) default = 0.8 si 0 => pas poreux (phong)
    float  sp        = 2.0; // (1..10) default = 2 (géométrie)
    float  m         = 0.19; // (0.. 1) default = 0.08 (rugosité) 0.5 = très rugueux (pent
    float  ks        = phong.z - 0.000000000001;
    float  kd        = phong.y - 0.000000000001; // needed ! (Cgc bug)
    float3 finalCol;

    // Porosity reflectance computation
    // -----
    float3 cameraDirection = normalize( camPos   - I.objpos );
    float3 lightDirection  = normalize( lightPos - I.objpos );
    float  k  = sqrt( 2.0 * m * m / M_PI);
    float  k1 = dot( I.norm, cameraDirection);
    float  k2 = dot( I.norm, lightDirection );

    // Check BDRF definition domain
    if( k1 <= 0.0 || k2 <= 0.0 )
    {
        finalCol.rgb = 0.0;
    }
    else
    {
        // Shadowing/masking terms
        // -----
        float Gp = ( k1 * k2 ) / ( (k1 - k * k1 + k) * ( k2 - k * k2 + k ) );
        float ka = 1.0 - ks - kd;
    }
}

```

```

float nb = sp * ( 3.7 - 2.0 * pow( ((acos(k2) + acos(k1))/2.0) - (2.0 * M_PI) /
float Ap = ka * ( 1.0 - pow( 1.0 - ka, nb )) / (1.0 - ( 1.0 - ka ));

// Porous surface
// -----
float alphaGp = alphaPoro * Gp;
float poroCoef = alphaGp * (1.0 - Ap );
float ksporo = ks * ( 1.0 - alphaGp );
float kdporo = kd * ( 1.0 - alphaGp * Ap ) + ks * alphaGp * (1.0 - Ap);

// Interpolated Phong lighing coefs
float2 coefs = I.coefs;
float diff = coefs.x;
float spec = coefs.y;

// Colors texture
float3 texCoul = tex2D( tex0, I.uv0 ).gbr;

// Sobel value
float3 val = tex2D( tex1, I.uv0 ).gbr;
float t0 = ( val.r + val.g + val.b ) / 3.0;

float t = 1.0 - seuil.x;
t = 0.2 + t * 0.8;
if( t0 > t )
{
    float kdPollu = 0.8;
    float3 polluColor = float3( 0.1, 0.1, 0.1 );

    float poreFillingPercentage = (t0 - t) / FILLINGTIME;
    poreFillingPercentage = clamp( poreFillingPercentage, 0.0, 1.0 );

    finalCol = diff * ( kd * ( 1.0 - alphaGp ) * texCoul
+ alphaGp * kd * (1.0 - Ap) * ( 1.0 - poreFillingPercentage ) * texCoul
+ ks * ( 1.0 - Ap ) * alphaGp * texCoul * ( 1.0 - poreFillingPercentage )
+ kdPollu * alphaGp * polluColor * poreFillingPercentage )
+ spec * ksporo;
}
else
{
    // Lightmap value
    float3 lmCoul = tex2D( lightMap, I.uv0 ).rgb;
    t0 = 1.0 - ( lmCoul.r + lmCoul.g + lmCoul.b ) / 3.0;

```

```
    if( t0 > t )
    {
        float kdPollu = 0.8;
        float3 polluColor = float3( 0.5, 0.5, 0.5);

        float poreFillingPercentage = (t0 - t) / FILLINGTIME;
        poreFillingPercentage = clamp( poreFillingPercentage, 0.0, 1.0 );

        finalCol = diff * ( kd * ( 1.0 - alphaGp ) * texCoul
        + alphaGp * kd * (1.0 - Ap) * ( 1.0 - poreFillingPercentage ) * texCoul
        + ks * ( 1.0 - Ap ) * alphaGp * texCoul * ( 1.0 - poreFillingPercentage )
        + kdPollu * alphaGp * polluColor * poreFillingPercentage )
        + spec * ksporo;
    }
    else
    {
        finalCol = texCoul * diff * kdporo + spec * ksporo;
    }
}

Pix OUT;
OUT.col = finalCol.rgb + ambCol;

return OUT;
}
```

A.4 Vertex Shader pour les surfaces mouillées

```
struct appdata
{
    float4 position : POSITION;
    float3 normal   : NORMAL;
    float2 uv0      : TEXCOORD0;
};

struct Vert
{
    float4 pos      : POSITION;
    float2 coefs    : TEXCOORD0;
}
```

```
float2 uv0      : TEXCOORD1;
float3 norm     : TEXCOORD2;
float3 objpos   : TEXCOORD3;
};

Vert main(
    appdata IN,
    const uniform float4x4 mat      : register(c0),
    const uniform float3  camPos    : register(c8),
    const uniform float3  lightPos  : register(c9),
    const uniform float4  phong     : register(c10), // ka kd ks exp
    const uniform float4  uvScale   : register(c14)
)
{
    Vert OUT;

    // screen and object space position
    OUT.pos      = mul( mat, IN.position );
    OUT.objpos   = IN.position.xyz;

    // normal
    OUT.norm     = IN.normal;

    // blinn lighting
    float3 eye    = camPos    - IN.position.xyz;
    float3 light  = lightPos  - IN.position.xyz;
    float3 half   = normalize( light + eye );
    float  diffuse = dot( IN.normal, normalize(light) );
    float  specular = pow( dot( IN.normal, half ), phong.w );
    OUT.coefs     = float2( diffuse, specular );

    // texture coords
    OUT.uv0      = IN.uv0 * uvScale.xy;

    return OUT;
}
```


Bibliographie

- [Ami98] Garg Amitabh. *Imbibition Assisted Recovery of Hydrocarbons/NAPLs from Naturally Fractured Reservoirs*. Ph.d. thesis, engineering - materials science and mineral engineering, u.c. berkeley edition, 1998.
- [APS00] Michael Ashikmin, Simon Premoze, and Peter Shirley. A microfacet-based brdf generator. In *SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 65–74, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [AS00] Mickeal Ashikhmin and Peter Shirley. An anisotropic phong light reflection model. In *Journal of graphics tools*, volume 5, pages 25–32, 2000.
- [BC96] B. Bhushan and S. Chilamakuri. Non-Gaussian surface roughness distribution of magnetic media for minimum friction/stiction. *Journal of Applied Physics*, 79 :5794–5796, April 1996.
- [B.G67] B.G.Smith. Geometrical shadowing of a random rough surface. volume 15, pages 668–671, 1967.
- [Bli82] J. F. Blinn. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. In *Computer Graphics*, volume 16, pages 21 – 29, 1982.
- [BPA⁺04] A. Baulig, J. J. Poirault, P. Ausset, R. Schins, T. Shi, D. Baralle, P. Dorlhene, M. Meyer, R. Lefèvre, A. Baeza-Squiban, and F. Marano. Physico-chemical characteristics and biological activities of seasonal atmospheric particulate matter sampling in two locations of paris. In *Environmental Science and Technology*, volume 22, pages 5985 – 5992, 2004.
- [BS63] Petr Beckmann and André Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, volume 4 of *International Series of Monographs on Electromagnetic Waves*. Pergamon Press, 1963.
- [BS90] C. J. Brinker and G. W. Scherer. Sol-gel science. Harcourt Brace and Company Publishers, SanDiego, 1990.
- [CC93] J. M. Chen, S. S.and Keller and R.M Crossover. On the calculation of fractal features from images. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(10), 1993.
- [Cor] NVIDIA Corporation. <http://developer.nvidia.com>.
- [Der99] Mickaël Derbez. Rôle des apports atmosphériques dans l’altération de calcaires tendres en environnement urbain : La cathédrale de Tours. *Doctorat de l’université de Paris XII - Val de Marne*, 1999.

- [DH96] J. Dorsey and P. Hanrahan. Modeling and rendering of metallic patinas. In *ACM SIGGRAPH*, pages 387 – 396, 1996.
- [DPH96] J. Dorsey, H. Pedersen, and P. Hanrahan. Flow and changes in appearance. In *ACM SIGGRAPH*, pages 411 – 420, 1996.
- [fS] International Organization for Standardization. Ics 17.040.20 : Properties of surfaces. International Organization for Standardization.
- [GR67] Valenzuela G. R. Depolarization of em waves by slightly rough surfaces. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 15(4) :552–557, 1967.
- [HACF01] L. Hennetier, J. V. Almeida, A. M. S. Correia, and V. M. Ferreira. Efflorescence and its quantification in ceramic building materials. In *Br. Ceram. Trans.*, volume 100, pages 72 – 76, 2001.
- [HHP⁺92] Xiao D. He, Patrick O. Heynen, Richard L. Phillips, Kenneth E. Torrance, David H. Salesin, and Donald P. Greenberg. A fast and accurate light reflection model. In *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 253–254. ACM Press, 1992.
- [HTSG91] Xiao D. He, Kenneth E. Torrance, François X. Sillion, and Donald P. Greenberg. A comprehensive physical model for light reflection. In *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 175–186. ACM Press, 1991.
- [JAH⁺99] Dorsey J., Edelman A., Jensen H., Legakis J., and Pedersen H. Modeling and rendering of weathered stone. In *ACM SIGGRAPH*, pages 225 – 234, 1999.
- [JF77] Blinn James F. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 192–198. ACM Press, 1977.
- [JLD99] Henrik Wann Jensen, Justin Legakis, and Julie Dorsey. Rendering of wet material. In Lischinski and Larson [LL99], pages 273–282. Proc. 10th Eurographics Rendering Workshop, Granada, Spain, June 21–23, 1999.
- [KL05] Csaba Kelemen and Szirmay-Kalos László. A microfacet based coupled specular-matte brdf model with importance sampling. In *Eurographics Conference*, pages 25–34. Eurographics Association, 2005.
- [Lew94] Robert R. Lewis. Making shaders more physically plausible. volume 13, pages 1–13, 1994.
- [LFTG97] Eric Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth Torrance, and Donald Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. In *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–126, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [LGR⁺05] J. Lu, A. S. Georghiadis, H. Rushmeier, J. Dorsey, and C. Xu. Synthesis of material drying history : Phenomenon modeling, transferring and rendering. *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, pages 9–16, 2005.

-
- [LL99] Dani Lischinski and Greg Ward Larson, editors. *Rendering Techniques '99*, Eurographics. Springer-Verlag Wien New York, 1999. Proc. 10th Eurographics Rendering Workshop, Granada, Spain, June 21–23, 1999.
- [LRR04] Jason Lawrence, Szymon Rusinkiewicz, and Ravi Ramamoorthi. Efficient BRDF importance sampling using a factored representation. In *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2004)*, August 2004.
- [MDG00] S. Merillou, J.-M. Dischler, and D. Ghazanfarpour. A BRDF post-process to integrate porosity on rendered surfaces. In *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, volume 6, pages 306–318, 2000.
- [MDG01a] S. Merillou, J.-M. Dischler, and D. Ghazanfarpour. Corrosion : Simulating and rendering. In *Graphics Interface*, pages 167 – 174, 2001.
- [MDG01b] S. Merillou, J.-M. Dischler, and D. Ghazanfarpour. Measuring, modeling and rendering. In *The Visual Computer*, volume 17, pages 30 – 45, 2001.
- [MF01] Striegel M. F. Materials and cultural resources. In *National Center for Preservation Training and Technology*, 2001.
- [Mil88] G. S. P. Miller. From wire-frames to furry animals. In *Proceedings on Graphics interface '88*, pages 138–145. Canadian Information Processing Society, 1988.
- [MPBM03] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :759–769, 2003.
- [NDM05] Addy Ngan, Frédo Durand, and Wojciech Matusik. Experimental analysis of brdf models. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, pages 117–226. Eurographics Association, 2005.
- [NDM06] Addy Ngan, Frédo Durand, and Wojciech Matusik. Image-driven Navigation of Analytical BRDF Models. In Tomas and Wolfgang [TW06], pages 399–407.
- [NKON90] Eihachiro Nakamae, Kazufumi Kaneda, Takashi Okamoto, and Tomoyuki Nishita. A lighting model aiming at drive simulators. In *SIGGRAPH '90 : Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 395–404, New York, NY, USA, 1990. ACM Press.
- [NNSK99] László Neumann, Attila Neumann, and László Szirmay-Kalos. Compact metallic reflectance models. *Computer Graphics Forum*, 18(3) :161–172, September 1999. ISSN 1067-7055.
- [OBS04] Yutaka Ohtake, Alexander Belyaev, and Hans-Peter Seidel. Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. *ACM Trans. Graph.*, 23(3) :609–612, 2004.
- [Ogi] J. A. Ogilvy. *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces*. Institute of physics publishing edition.

- [PB95] C.Y Poon and B Bhushan. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, afm, and non-contact optical profiler. *Wear*, 190(1) :76–88, 1995.
- [PFMRA98] Ausset P., Bannery F., Del Monte M., and Lefèvre R.-A. Recording of pre-industrial atmospheric environment by ancient crusts on stone monuments. In *Atmospheric Environment*, volume 32, pages 2859 – 2863, 1998.
- [PFPHD03] Dutré Philip, Suykens Frank, Christensen Per H., and Cohen-Or Daniel, editors. *Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, Leuven, Belgium, 2003. Eurographics Association.
- [PPD01] E. Paquette, P. Poulin, and G. Drettakis. Surface aging by impacts. In *Graphics Interface*, pages 175 – 182, 2001.
- [PPD02] E. Paquette, P. Poulin, and G. Drettakis. The simulation of paint cracking and peeling. In *Graphics Interface*, pages 59 – 68, 2002.
- [QRP02] Hu Q. and Ewing R. P. Pore connectivity effects on solute transport in rocks. In *Proceedings of the symposium "Bridging the Gap between Measurement and Modeling"*, pages 25 – 28, Berkeley, March 2002.
- [Ray76] J Rayleigh. *The Theory of Sound*. Dover publications edition, 1876.
- [RFK98] Van Grieken R., Delalieux F., and Gysels K. Cultural heritage and the environment. In *Pure and Applied Chemistry*, volume 70, page p. 2327, 1998.
- [Ric51] S. O. Rice. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces. *Comm Pure Appl Math*, (4) :351–378, 1951.
- [Sch93] Christophe Schlick. A Customizable Reflectance Model for Everyday Rendering. In *Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, number Series EG 93 RW, pages 73–84, Paris, France, 1993.
- [Sch94] Christophe Schlick. An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. *Computer Graphics Forum*, 13(3) :233–246, 1994.
- [SO63] Rice S. O. Reflection of em from slightly rough surfaces. *Interscience*, 1963.
- [ST95] Hsu S. and Wong T. Simulating dust accumulation. In *IEEE Computer Graphics and Applications*, volume 15, pages 18 – 22, 1995.
- [Sta99] Jos Stam. Diffraction shaders. 1999.
- [TAE04] Germer Thomas A. and Marx Egon. Ray model of light scattering by flake pigments or rough surfaces with smooth transparent coatings. *Applied Optics*, 2004.
- [TK01] L Tsang and J.A Kong. *Scattering of Electromagnetic Waves : Volume III : Advanced Topics*. John wiley and sons edition, 2001.
- [TKD00] L Tsang, J.A Kong, and K.H Ding. *Scattering of Electromagnetic Waves : Volume I : Theories and Applications*. John wiley and sons edition, 2000.

-
- [TKD01] L Tsang, J.A Kong, and C.O Ding, K.Hand Ao. *Scattering of Electromagnetic Waves : Volume II : Numerical Simulations*. John wiley and sons edition, 2001.
- [TS67] Kenneth E. Torrance and E.M Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughned surfaces. *Journal of the optical society of America*, 57(9), September 1967.
- [TTWYPA97] Wong T. T., Ng W. Y., and Heng P. A. A geometry dependent texture generation framework for simulating surface imperfections. In *Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering*, pages 139 – 150, 1997.
- [TW06] Akenine-Möller Tomas and Heidrich Wolfgang, editors. *Eurographics Workshop/ Symposium on Rendering*, Nicosia, Cyprus, 2006. Eurographics Association.
- [UMF86] F. T. Ulaby, R.K Moore, and A.K Fung. *Microwave Remote Sensing : Active and Passive, Volume II : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Artech house edition, 1986.
- [WAT92] Stephen H. Westin, James R. Arvo, and Kenneth E. Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. In *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 255–264. ACM Press, 1992.
- [WHML03] Matusik Wojciech, Pfister Hanspeter, Brand Matthew, and McMillan Leonard. Efficient isotropic brdf measurement. In Philip et al. [PFPHD03], pages 241–248.
- [WN90] Becket W. and Badler N. Imperfection for realistic image synthesis. In *Journal of Visualization and Computer Animation*, volume 1, pages 26 – 32, 1990.
- [Yan06] COCHERIL Yann. *Prise en compte de la diffusion sur des surfaces rugueuses dans une simulation du canal radioélectrique*. Ph.D. Thesis, UNIVERSITE DE POITIERS (Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées) edition, 2006.
- [YHXE05] Liu Youquan, Zhu Hongbin, Liu Xuehui, and Wu Enhua. Real-time simulation of physically based on-surface flow. *The Visual Computer (Pacific Graphics 2005 issue)*, 2005.

Résumé

L'objet des travaux de recherche présentés dans cette thèse est l'étude de l'influence de la micro géométrie des surfaces sur le rendu réaliste. Dans un premier temps, nous étudions la géométrie de la surface. Cette étude nous a permis de réaliser l'état de l'art de la notion de rugosité en synthèse d'images. Cette étude nous a également conduit à introduire un nouveau paramètre générique permettant de prendre en compte l'aspect de la surface dans les calculs locaux d'éclairéments (FDRB) en synthèse d'images. Nous avons également réalisé certaines de nos simulations en se basant sur des nouvelles distributions de rugosité. L'étude de la micro géométrie nous a mené vers la conception un modèle de rendu complet du changement d'aspect de certaines surfaces (dérivée de l'étude de la porosité surfacique). De cette manière, des phénomènes physiques comme le vieillissement des matériaux utilisés pour les constructions humaines ont pu être simulés de manière originale grâce à cette méthode. Nous avons également réalisé une étude croisée des modèles de réflexions en synthèse d'images et en propagation de canaux de télécommunication indoor. Cette étude nous a permis de dégager certaines pistes d'études croisées dans ces deux domaines.

Mots-clés: Rugosité, porosité, éclairément, FDRB

Abstract

Our goal is to study influence of surface's micro-geometry on rendering. First, we study the physical geometry of a surface. This lead us to realize a state of the art of roughness in rendering and to introduce a new generic parameter taking into account surface aspect in the local shading computation (BRDF). We also use some new roughness's distributions to compute some simulations. This study lead us to make a rendering model of visual changes in surface's aspect derived from porosity. We simulate the aging of porous media used in human being's construction using this new simulation based on porosity. To finish, we study a cross-over between indoor wave's propagation and reflection models used in images synthesis. This let us to find some original way of researches.

Keywords: Roughness, porosity, shading, BRDF

