

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider BISKRA

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'informatique

N° d'ordre :

Série :



Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de docteur en sciences

Option : Informatique

Occultation ambiante basée sur l'échantillonnage
préférentiel multiple pour la génération des ombres
douces en temps réel

Par

Abd El Mouméne Zerari

Soutenu le : 04/ 11 /2018

Devant le jury :

Cherif Foudil	Professeur	Université de Biskra	Président
Babahenini Med Chaouki	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
Taleb ahmed Abdelmalik	Professeur	Université de Valenciennes	Examineur
Moussaoui Abdelouahab	Professeur	Université de Sétif 1	Examineur
Chikhi Salim	Professeur	Université de Constantine 2	Examineur
Bitam Salim	Professeur	Université de Biskra	Examineur

Dédicaces

À mes chers parents,

Mon frères Et Mes sœurs,

Ma femme et mes enfants,

Et à la mémoire de notre chère collègue Nesrine Ouannes

Remerciements

Je tiens premièrement à me prosterner en remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance approfondi à mon professeur Mr. Mohamed Chaouki Babahenini, mon directeur de thèse, qui s'est toujours montré à l'écoute et était très disponible tout au long de la réalisation de cette thèse. Je lui remercie infiniment et chaleureusement encore pour son implication à la réalisation de ce travail de recherche et pour le support qu'il m'a apporté, sa patience, et la pertinence de ses conseils m'ont été d'une aide précieuse tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres de jury : Pr Foudil Cherif, Pr Abdelmamik Ahmed-Taleb, Pr Moussaoui Abedelouahab, Pr Salim Chikhi et Dr Salim Bitam pour m'avoir honoré par leur évaluation de ce travail.

Je voudrais aussi remercier les membres du laboratoire de recherche en informatique (LESIA) à commencer par le chef du laboratoire, Mr. Mohamed Chaouki Babahenini, sans oublier tous mes collègues.

Mes remerciements vont aussi aux enseignants du département d'informatique de l'université de Biskra.

Enfin, mes remerciements qui ne vont jamais être suffisants à mes parents pour leur soutien et patience avec moi tout au long de la réalisation de ce travail. Mes remerciements aussi à mes sœurs et mon frère Mohamed pour leur aide. Rien de tout ceci ne serait possible sans leurs sacrifices et leurs encouragements.

Résumé

L'occultation ambiante dans l'espace écran est considérée comme une technique de rendu en temps réel dans le domaine de l'approximation de l'illumination globale. Son objectif principal est la génération des images visuellement correctes, imitant le plus possible l'apparence des objets dans le monde physique. Bien qu'elle nous permette de visualiser les détails de la scène 3D via les ombres douces, elle exige souvent un nombre important d'échantillons par pixel, ce qui limite son utilisation spécialement dans les applications basées sur le changement interactif de la scène virtuelle.

Le travail de cette thèse s'inscrit dans ce contexte, et propose une nouvelle technique approximative pour accélérer la création des ombres douces en temps réel dans l'algorithme d'illumination globale. Deux contributions ont ainsi été développées :

La première consiste à générer des ombres douces physiquement correctes qui peuvent être appliquées dans le rendu temps réel. Pour cela nous suggérons d'utiliser de multiples filtres PCF implémentés sur le GPU pour réduire davantage le nombre d'échantillons de la source de lumière surfacique, ce qui permet d'éviter les artefacts visuels et de diminuer le coût de calculs causés par la création de carte d'ombre.

La deuxième est basée sur la méthode de l'occultation ambiante dans l'espace écran (Screen-Space Ambient Occlusion (SSAO)). Nous avons remarqué que les algorithmes actuels souffrent de difficultés liées au grand nombre d'échantillons, pour cela, nous proposons une amélioration du SSAO en l'intégrant à une technique d'échantillonnage préférentiel multiple (Multiple Importance Sampling) qui combine une méthode d'échantillonnage stratifié avec une méthode d'échantillonnage par d'importance, permettant de réduire le nombre d'échantillons.

L'évaluation expérimentale démontre que nos techniques peuvent produire des images de haute qualité en temps réel et sont significativement plus rapides que les techniques traditionnelles.

Mots clés: Ombres douces, GPU, Illumination globale, Rendu en temps réel, SSAO.

Abstract

Screen space ambient occlusion is considered as a real-time rendering technique in the field of approximation of global illumination. Its main objective is the generation of visually correct images, imitating as much as possible the appearance of objects in the physical world. Although it allows us to view the details of the 3D scene through soft shadows, it often requires a large number of samples per pixel, which limits its use especially in interactive change-based applications of the virtual scene.

The work of this thesis fits in this context, and proposes a new approximate technique to accelerate the creation of soft shadows in real time on the global illumination algorithm. Two contributions have been developed:

The first is to generate physically correct soft shadows that can be applied in real-time rendering. For this, we suggest using multiple PCF filters implemented on the GPU to further reduce the samples number of the surface light source, which avoids visual artifacts and reduces the cost of computations caused by creating of the shadow map.

The second is based on the Screen-Space Ambient Occlusion (SSAO) method. We have noticed that the current algorithms suffer from difficulties related to a large number of samples, for that we propose an improvement of the SSAO by integrating it with a technique of multiple importance sampling which combines a stratified sampling method with a importance sampling method, allowing to reduce the number of samples.

Experimental evaluation demonstrates that our techniques can produce high quality images in real time and are significantly faster than traditional techniques.

Keywords: Soft Shadows, GPU, Global Illumination, Real-Time Rendering, SSAO.

ملخص

يعتبر حجب الإضاءة المحيطة في فضاء الشاشة بمثابة تقنية عرض في الوقت الحقيقي في مجال تقريب الإضاءة الشاملة. هدفها الرئيسي هو توليد صور بصرية صحيحة ، تقليد قدر الإمكان ظهور الأشياء في العالم المادي .على الرغم من أنه يسمح لنا بتصور تفاصيل المشهد ثلاثي الأبعاد من خلال الظلال الناعمة ، إلا أنه يتطلب في كثير من الأحيان عددًا كبيرًا من العينات لكل بكسل ، مما يحد من استخدامه خاصة في التطبيقات التي تعتمد على التغيير التفاعلي للمشهد الافتراضي.

يتلاءم عمل هذه الرسالة مع هذا السياق ، ويقترح تقنية تقريبية جديدة لتسريع إنشاء الظلال الناعمة في الوقت الحقيقي في خوارزمية الإضاءة الشاملة. تم تطوير مساهمتين:

الأولى تتمثل في توليد ظلال ناعمة صحيحة فيزيائيا يمكن تطبيقها في الوقت الحقيقي .لهذا نقترح استخدام العديد من مرشحات PCF المنفذة على وحدة معالجة الرسومات لزيادة تقليل عدد عينات مصدر الضوء السطحي ، والذي يتجنب التمرجات المرئية ويقلل من تكلفة الحسابات الناتجة عن إنشاء خريطة الظل.

الثانية تعتمد على طريقة الإضاءة المحيطة في فضاء الشاشة (SSAO) . لقد لاحظنا أن الخوارزميات تعاني حاليا من الصعوبات المتعلقة بعدد كبير من العينات، لهذا نحن اقترح تحسين SSAO من خلال دمجها مع تقنية أخذ العينات التفضيلية المتعددة التي تجمع بين طريقة أخذ العينات الطبقيّة وطريقة أخذ العينات حسب الأهمية، لتقليل عدد العينات.

يوضح التقييم التجريبي أن تقنيتنا يمكن أن تنتج صورًا عالية الجودة في الوقت الفعلي وهي أسرع بكثير من التقنيات التقليدية.

الكلمات المفتاحية: الظلال الناعمة، وحدة معالجة الرسومات، والإضاءة الشاملة ، الإضاءة في الوقت الحقيقي ، حجب الإضاءة المحيطة في فضاء الشاشة.

Publications et Communications

Les publications et les communications relatives à cette thèse sont les suivantes :

Publications

1. Abd El Mouméne Zerari and Mohamed Chaouki Babahenini. *Screen Space Ambient Occlusion Based Multiple Importance Sampling for Real-Time Rendering*. Published in: *Journal 3D Research*. Volume 9, issue 1, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13319-017-0152-9>

Communications

1. Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini, Naima Bahi and Sarra Khemliche. Fast Soft Shadow with Screen Space Ambient Occlusion for Real Time Rendering. In *Proceedings of the first Mediterranean Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. Pages 71-77. At Tebessa, Algeria on November 22-23, 2016. <https://doi.org/10.1145/3038884.3038896>.

Workshops

1. Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini. Génération des ombres douces en temps réel. *Le Premier workshop Images, Graphiques et Vie Artificielle*, 08,09-10 Juin 2013, BISKRA Algérie.
2. Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini, Naima Bahi, Sarra Khemliche. Génération des ombres douces en temps réel. *Le Deuxième workshop Images, Graphique et Vie Artificielle Biskra*, 16,17-18 Juin, BISKRA Algérie, 2014.
3. Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini, Naima Bahi, Sarra Khemliche, Ombres douces avec source de lumière surfacique. *La quatrième Journées Doctorales en Informatique*, Université de 8 Mai 1945-Guelma, 03-04 décembre 2014.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des abréviations	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction Générale.....	1
1 Cadre de la Thèse et Problématique	1
2 Motivations.....	3
3 Objectifs et Contributions.....	4
4 Organisation de la thèse.....	5
Chapitre : 1 Illumination Globale : Contexte théorique.....	7
1.1 Introduction	7
1.2 Définitions de base	8
1.2.1 Grandeurs géométriques : l'angle solide	9
1.2.2 Grandeurs radiométriques.....	10
1.2.3 Colorimétrie.....	12
1.3 Propagation de la lumière	13
1.3.1 Réflexion de la lumière.....	13
1.3.2 Réfraction de la lumière	14
1.3.3 Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle	15
1.4 L'équation de rendu.....	17
1.4.1 Formulation de l'équation de Kajiya en termes de surfaces.....	18
1.5 La méthode de Monte-Carlo.....	20
1.5.1 Concepts de la théorie des probabilités	21
1.5.2 Intégration de Monte-Carlo	22
1.5.2.1 Méthode de transformation inverse	23

1.5.2.2	Échantillonnage stratifié	24
1.5.2.3	Échantillonnage par importance	25
1.5.2.4	Techniques d'échantillonnage combinées.....	26
1.6	Algorithmes d'illumination globale.....	27
1.6.1	La radiosité	27
1.6.2	Le tracé de chemins	27
1.6.3	Le lancer de photons.....	28
1.6.4	Le modèle Metropolis.....	28
1.6.5	La radiosité instantanée	29
1.7	Techniques de l'illumination globale interactive et en temps réel.....	29
1.7.1	Illumination globale basée image	30
1.7.2	Problèmes d'illumination globale en temps réel	32
1.7.3	L'occultation ambiante.....	33
1.7.4	Bilan	34
1.8	Conclusion	34
Chapitre : 2 Les ombres		36
2.1	Introduction	36
2.2	Généralités sur les ombres	36
2.2.1	Importance des ombres	37
2.2.2	Qu'est-ce qu'une ombre?.....	38
2.3	Classification des ombres	40
2.4	Ombres en temps réel	42
2.4.1	Espace objet et espace image	43
2.4.2	Le volume d'ombre	43
2.4.3	Shadow Mapping : (placage d'ombre)	44
2.4.4	Bilan	47
2.5	Les ombres douces	48
2.5.1	Travaux connexes sur les ombres douces en temps réel	50
2.5.2	Ombres douce physiquement correcte	52
2.5.3	Ombres douces rapides et précises avec échantillonnage adaptatif de la source de lumière surfacique	53
2.6	Conclusion	53

Chapitre 3 : L'occultation ambiante	54
3.1 Introduction	54
3.2 De l'équation du rendu à l'occultation ambiante.....	54
3.2.1 Éclairage direct.....	54
3.2.2 Lumière ambiante	55
3.2.3 Obscurance ambiante.....	56
3.2.4 Occultation ambiante.....	57
3.3 Méthodes d'occultation ambiante	60
3.3.1 Méthodes basées sur l'espace objet.....	60
3.3.2 Méthodes basées sur l'espace écran.....	60
3.3.3 Synthèse.....	61
3.4 Les techniques de l'occultation ambiante dans l'espace écran.....	61
3.4.1 Les techniques traditionnelles de SSAO	62
3.4.1.1 Crytek Ambient Occlusion	62
3.4.1.2 Starcraft II Ambient Occlusion	63
3.4.1.3 L'occultation ambiante basée sur l'horizon	64
3.4.1.4 Occultation ambiante dans l'espace écran utilisant la cohérence temporelle..	66
3.4.1.5 Alchemy Ambiante Obscurance	67
3.4.1.6 Approximation séparable de l'occlusion ambiante	68
3.4.1.7 Angle based SSAO	69
3.4.2 Les méthodes récentes de SSAO.....	70
3.4.3 Synthèse.....	71
3.4.4 Classification des méthodes de SSAO.....	72
3.5 Conclusion.....	73
Chapitre 4 : Rendu d'ombre douce physiquement correcte en temps réel basé sur multiples PCF	74
4.1 Introduction	74
4.2 Schéma général de la technique du rendu d'ombre douce physiquement correcte en temps réel basée sur multiples PCF.....	75
4.3 Description détaillée de la technique	76
4.3.1 L'algorithme du Shadow Mapping.....	76
4.3.2 Approximation d'ombres douces avec échantillonnage de la source de lumière surfacique	77

4.3.2.1	Simplification de l'équation du rendu pour des calculs d'ombres.....	77
4.3.2.2	Calcul d'ombre douce.....	78
4.3.2.3	Approximation de la source de lumière surfacique pour le calcul d'ombre douce	80
4.3.2.4	Subdivision de la lumière surfacique	80
4.3.3	Raffinement adaptatif de la densité d'échantillonnage	81
4.3.3.1	Génération des cartes d'ombre.....	81
4.3.3.2	Évaluation de subdivision.....	81
4.3.3.3	Produire des points d'échantillonnage additionnels	82
4.3.4	Évaluation de l'information de carte d'ombre	83
4.3.4.1	Affectation des poids de contribution de carte d'ombre	83
4.3.4.2	Visualisation d'ombre douce en utilisant n cartes d'ombre.....	83
4.3.4.3	Filtrage par multiples PCF.....	84
4.4	Résultats et évaluation	85
4.4.1	Résultats visuels	85
4.5	Conclusion.....	89
Chapitre :5 Occultation ambiante dans l'espace de l'écran basée sur l'échantillonnage préférentiel multiple.....		90
5.1	Introduction	90
5.2	Présentation de la technique	91
5.3	Description de la technique	92
5.3.1	Première passe de rendu: générer le G-Buffer.....	93
5.3.2	Deuxième passe de rendu: Calculer SSAO et l'ombrage	94
5.3.2.1	Générer un noyau d'échantillon basé sur des estimateurs de Monte-Carlo	94
5.3.2.2	Calculer SSAO	98
5.3.3	Troisième passe de rendu: étape de filtrage.....	101
5.4	Tests et évaluation	102
5.4.1	Outils et matériels utilisés	102
5.4.2	Les métriques utilisées pour la validation	103
5.4.3	Résultats et comparaison	104
5.5	Conclusion.....	116
Conclusion générale		117

Bibliographie 118

Liste des abréviations

OA	Occultation Ambiante
SSAO	Screen Space Ambient Occlusion
PDF	Probability Density Function
CDF	Cumulative Distribution Function
GPU	Graphics Processing Unit
SM	Shadow Map: carte d'ombre
SMg	Shadow Mapping
FPS	Frame Per Seconde: Taux d'affichage
PCF	Percentage Closer Filtering
SLP	Source de lumière ponctuelle
HBAO	Horizon Based Ambient Occlusion
TSSAO	Screen Space Ambient Occlusion using Temporal Coherence
IG	illumination global
VPL	Virtual Point Lights
epp	échantillons par pixel
MIS	Multiple Importance Sampling
EPM	échantillonnage préférentiel multiple
GLSL	OpenGL Shading Language

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Les quantités radiométriques et photométriques	12
Tableau 1.2 - Comparaison entre les techniques d'approximation de l'illumination globale.	33
Tableau 2.1 - Synthèse sur les techniques de shadow Mapping et volume d'ombre	47
Tableau 3.1 - Comparaison entre les différentes méthodes d'occultation ambiante en temps réel	71
Tableau 5.1 - Spécifications de chaque scène et temps de calcul de différents objets en utilisant la méthode du Tracé de chemins avec 256 spp.....	103
Tableau 5.2 - Les valeurs RMSE entre les images de référence et les images de la technique proposée.	113

Liste des figures

Figure 1.1 : La courbe de sensibilité de l'œil normalisée par la CIE	8
Figure 1.2 : Notion d'angle solide	9
Figure 1.3 : Illustration de l'angle solide	10
Figure 1.4 : Angle solide dans le système de coordonnées sphériques	10
Figure 1.5 : Différentes quantités radiométriques	11
Figure 1.6 : Fonctions de réponses colorimétriques d'un observateur standardisé par la CIE.....	12
Figure 1.7 : La réflexion de la lumière.	14
Figure 1.8 : Géométrie pour la réfraction de la lumière	15
Figure 1.9 : Illustration de la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF).....	16
Figure 1.10 : Configuration pour l'expression surfacique de l'équation du rendu.....	18
Figure 1.11 : Source de lumière surfacique.....	19
Figure 1.12 : Un exemple de l'échantillonnage avec 6×6 échantillons..	25
Figure 1.13 : Le choix de la fonction de densité de probabilité est très important pour la réduction de la variance.	25
Figure 1.14 : Les VPL sont distribués à l'intérieur d'une scène et créés à l'intersection avec la géométrie de la scène	29
Figure 1.15 : Les composants de reflective shadow map (profondeur, positions, normal, flux)	31
Figure 1.16 : Une scène illuminée à l'aide d'Imperfect shadow maps	31
Figure 1.17 : Occultation ambiante	33
Figure 2.1 : Même les objets en dehors de la vue peuvent projeter des ombres visibles qui peuvent nous aider à établir une compréhension plus complète de la scène.....	37
Figure 2.2 : L'importance des ombres pour la compréhension d'une scène	38
Figure 2.3 : L'ombre apporte une information sur la géométrie cachée	38
Figure 2.4 : L'ombre portée permet de mieux comprendre la forme du sol.....	38

Figure 2.5 : L'ombre permet de révéler la présence d'autres objets	38
Figure 2.6 : Différentes ombres présentes dans une scène	39
Figure 2.7 : Exemples d'ombres réalistes obtenues avec une méthode d'illumination globale.	40
Figure 2.8 : Ombre dure vs. Ombre douce	41
Figure 2.9 : Ombres directes générées en fonction du type de la source	42
Figure 2.10 : Comportement de la pénombre en fonction de la taille de la source	42
Figure 2.11 : Illustration en 2D des volumes d'ombre	44
Figure 2.12 : Principe de l'algorithme de base de shadow mapping.....	44
Figure 2.13 : Diagramme illustrant l'algorithme de shadow mapping.....	45
Figure 2.14 : Exemple des valeurs de profondeur d'une image	46
Figure 2.15 : Exemple de l'utilisation du PCF	47
Figure 2.16 : Image sans filtre PCF (à gauche), image avec filtre PCF (à droite)	47
Figure 2.17 : L'influence de la taille de la lumière surfacique sur le résultat de l'ombre douce	49
Figure 2.18 : L'ombre de deux objets n'est pas une simple combinaison des deux ombres prises séparément.....	50
Figure 2.19 : Images obtenues par illumination d'un même modèle	52
Figure 3.1 : Un exemple d'une scène éclairée. À gauche: un éclairage direct. Au milieu: un éclairage indirect. Droite: un éclairage direct et un éclairage indirect.	55
Figure 3.2 : Une scène éclairée en utilisant : uniquement un éclairage direct (à gauche), uniquement une lumière ambiante (au milieu) et uniquement un éclairage direct avec lumière ambiante	55
Figure 3.3 : Accessibilité d'un point par obscurance.....	57
Figure 3.4 : Lancer de rayon pour résoudre l'intégrale.....	58
Figure 3.5 : Le tampon de profondeur est une approximation de la géométrie 3D d'une scène	62
Figure 3.6 : Crytek Ambient Occlusion	63
Figure 3.7 : Screen Space Ambient Occlusion dans Crysis	63
Figure 3.8 : Résultats de la méthode SSAO dans Starcraft II.....	64
Figure 3.9 : Les échantillons verts et rouges sont visibles et occlus, respectivement.....	64
Figure 3.10 : Occultation ambiante basée sur l'horizon	65
Figure 3.11 : L'occultation ambiante sans ombrage.	66
Figure 3.12 : Comparaison entre SSAO et TSSAO	66

Figure 3.13 : A gauche: l'éclairage de l'environnement. À droite : éclairée par la méthode d'Alchemy, calculée à partir de 12 échantillons par pixel à 1280 * 720 en 3 ms.	67
Figure 3.14 : Alchemy Ambiante Obscurance	68
Figure 3.15 : Exemples de d'occultation ambiante séparable.....	68
Figure 3.16 : Motif de l'échantillon apparié	69
Figure 3.17 : Motif de l'échantillon apparié de Mittring	70
Figure 4.1 : Vue d'ensemble de la technique proposée d'ombre douce utilisant multiples filtres PCF.....	75
Figure 4.2 : Subdiviser une source de lumière surfacique par notre stratégie d'échantillonnage.....	80
Figure 4.3 : Le calcul de la taille de la pénombre dans une configuration générale	82
Figure 4.4: Multiples filtres PCF (avec un noyau de 3x3) appliqué à chaque source de lumière ponctuelle	84
Figure 4.5 : Comparaison visuelle.....	86
Figure 4.6: Une scène rendue en utilisant notre technique et la méthode de [Sch+12]	87
Figure 4.7 : Comparaison visuelle entre notre résultat et l'image de référence	87
Figure 4.8 : Comparaison visuelle entre la technique proposée et l'image créée par la méthode de Schwärzler.....	88
Figure 4.9 : La scène Sponza rendu avec deux configurations différentes	89
Figure 5.1 : Vue d'ensemble de notre technique SSAO en utilisant différents types de méthodes de réduction de la variance.....	92
Figure 5.2 : Le processus du G-Buffer	93
Figure 5.3 : Différentes stratégies d'échantillonnage avec 24 échantillons.....	95
Figure 5.4 : Direction d'un échantillon dans un hémisphère.....	99
Figure 5.5 : Échantillonnage autour de l'hémisphère.	100
Figure 5.6 : Un exemple du filtre bilatéral	102
Figure 5.7 : Les valeurs de la métrique HDR-VDP-2.	104
Figure 5.8 : Évolutivité lorsque le nombre d'échantillons augmente avec la méthode de tracé de chemins pour la scène Dragon (le temps du rendu en seconde)..	105
Figure 5.9 : Résultats qualitatifs choisis pour plusieurs scènes et techniques.....	106
Figure 5.10 : L'influence du concept ambiant dans une scène 3D.....	107

Figure 5.11 : Une scène rendue par la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM en utilisant 24 epp	108
Figure 5.12 : Avec 24 epp. Comparaison des images rendues entre la méthode originale d'Alchemy (image (a), (b) et (c)) et notre version améliorée de la technique Alchemy (image (d), (e) et (f)).....	109
Figure 5.13 : Avec 24 epp. Comparaison d'images rendues par la méthode de Mittring avec différents scènes et entre nos images rendues en utilisant la technique proposée.....	110
Figure 5.14 : Comparaison des images rendues en utilisant 24 spp, obtenu par différentes méthodes.....	111
Figure 5.15 : Résultats RMSE pour différentes méthodes selon différentes scènes de rendu avec 24 ssp.....	112
Figure 5.16 : Résultats RMSE pour différentes méthodes utilisant 24 epp, selon différentes scènes. Les images de référence sont générées par la méthode du tracé de chemins en utilisant 256 epp.	113
Figure 5.17 : Métrique HDR-VDP-2 entre les images de référence et celles obtenues avec la technique proposée pour les quatre scènes de tests.	115
Figure 5.18 : Une scène complexe avec plusieurs modèles 3D différents, éclairée par la technique proposée basée sur l'EPM utilisant 24 epp (01 FPS).....	116

Introduction générale

1 Cadre de la Thèse et Problématique

La génération d'images de synthèse basées sur l'éclairage réaliste d'une scène 3D, tel que le transport de la lumière dans un environnement virtuel, est accomplie par le biais d'algorithmes de l'illumination globale. Ce vaste domaine a de nombreuses applications telles que la conception architecturale, les jeux vidéo, l'industrie cinématographique, la visualisation médicale et scientifique. Par conséquent, de nombreux efforts de recherche ont été concentrés sur le développement d'algorithmes de l'illumination globale en rendu temps réel, précis et robustes au fil des ans.

La simulation du transport lumineux est très complexe. Les rayons sont émis depuis les sources de lumière, réfléchies une ou plusieurs fois entre les différentes géométries de la scène, qui possèdent elles-mêmes différents matériaux, avant de finalement atteindre un observateur ou un capteur. Afin de générer des images réalistes, il faut calculer l'énergie qui atteint un pixel en accumulant les rayons en provenance des sources de lumière directes (éclairage direct) et des sources de lumières indirectes (éclairage indirect). L'éclairage indirect prend en compte toutes les interactions possibles entre un rayon lumineux et une surface ce qui permet de simuler des effets compliqués tels que les ombres, les réfractions et les caustiques. Comme il n'existe pas en général de solutions analytiques à ce calcul, les chercheurs se sont concentrés sur l'utilisation de méthodes numériques (par exemple, éléments finis ou Monte-Carlo) afin d'estimer l'énergie qui arrive au pixel.

Actuellement, nous pouvons obtenir des taux de génération d'images suffisantes uniquement par l'approximation de l'illumination globale. Pour cela on utilise des techniques permettant d'approcher la solution exacte, telle que l'occultation ambiante (OA). Lorsque la lumière se déplace à travers une scène, certains endroits sont plus dissimulés que d'autres. L'effet de faire apparaître ces zones est appelé l'occultation ambiante, qui prend en compte la visibilité mais pas la lumière et permet de comprendre la forme de la scène 3D via les ombres douces.

L'ombre est un concept de plus en plus populaire qui contribue grandement à satisfaire la demande croissante en réalisme dans le domaine de l'informatique graphique. Le calcul d'une ombre dure revient, pour chaque pixel, à résoudre un problème simple de visibilité entre deux points. En revanche, le calcul d'une ombre douce impose de connaître, pour chaque pixel, la proportion de la source lumineuse qui est visible du point. Il s'agit donc d'un problème de visibilité point-surface. Les ombres générées par les méthodes de l'illumination globale ne sont pas adaptées au rendu temps réel, par contre les méthodes d'approximation de l'illumination globale [Rit+12] peuvent générer des ombres en temps réel. Cependant, les ombres peuvent être créées facilement via deux méthodes très connues dans le domaine qui sont la carte d'ombre [Wil78] (Shadow Map) et le volume d'ombre [Cro77] (Shadow Volume).

L'occultation ambiante permet la simulation des ombres douces qui se produisent dans les fissures des objets 3D lorsqu'un éclairage indirect est projeté dans la scène. Les ombres douces calculées à partir de l'occultation ambiante peuvent aider à définir la séparation entre les objets de la scène et ajouter un autre niveau de réalisme.

On appelle occultation ambiante dans l'espace objet, lorsque le calcul dépend de la géométrie locale de la scène, elle est réalisée en projetant les rayons dans toutes les directions d'un point de l'espace objet centré dans l'hémisphère supérieur pour calculer le facteur d'occultation ambiante. Le problème avec cette méthode est que le nombre élevé de rayons lancés à partir de l'espace objet peut être coûteux à calculer.

En général, les méthodes d'OA ne sont pas pratiques pour le rendu en temps réel des scènes 3D complexe. L'occultation ambiante en temps réel était hors de portée jusqu'à ce que l'occultation ambiante de l'espace écran (SSAO) soit proposée. L'occultation ambiante est approchée par la méthode SSAO dans l'espace écran. D'abord introduite dans les jeux par Crytek [Mit07] et largement utilisée dans les applications en temps réel, SSAO est entièrement calculée dans l'espace écran, simple à mettre en œuvre et indépendante de la géométrie de la scène.

Par conséquent, la méthode de SSAO peut être ajoutée à un large éventail d'applications graphiques informatiques. Plusieurs techniques de SSAO [Mit07; Mit12; SV16; FM08; JWPJ16; MCG+11; BSD08] sont disponibles. Elles ont toutes le même principe fondamental, qui est basé sur l'approximation des points de l'espace monde visible en échantillonnant les profondeurs des pixels voisins dans l'espace écran. Ces techniques ont le pouvoir d'accélérer l'étape de rendu et conviennent aux applications en temps réel. Cependant, l'efficacité de la méthode de SSAO traditionnelle dépend principalement du nombre d'échantillons par pixel et de la méthode d'échantillonnage. Un nombre réduit d'échantillons sont utilisés pour obtenir les performances souhaitées, mais du bruit apparaît dans le résultat. Ce bruit peut être éliminé par un processus de filtrage ou en ajoutant des échantillons supplémentaires pour converger vers un résultat de meilleure qualité. Cette addition conduit directement à la dégradation des performances. Les méthodes traditionnelles de SSAO sélectionnent également des échantillons aléatoires uniformes, ce qui conduit à un problème dans la distribution de l'échantillon. Nous essayons de trouver un compromis entre qualité visuelle et performance.

Dans les applications en temps réel, les ombres douces doivent être calculées très efficacement pour des scènes dynamiques. L'utilisation de méthodes d'illumination globale

serait trop lente pour résoudre ce problème. Par conséquent, les méthodes de création d'ombres en rendu temps réel sont une solution très efficace en informatique graphique.

Pour générer une ombre douce physiquement correcte à partir d'une source de lumière surfacique, il faut échantillonner la source de lumière surfacique en n échantillons, où chaque échantillon de la source représente une source de lumière ponctuelle. Une carte d'ombre est créée pour chaque lumière ponctuelle à partir d'une position de vue dans une passe de rendu de la scène, par conséquent, n passe de rendus seront nécessaires pour générer l'ombre douce. Si ce nombre est important cela augmente le temps de calcul. Pour des applications interactives, il faut réduire le temps de calcul en réduisant le nombre d'échantillons. Plusieurs travaux sont réalisés pour réduire le nombre d'échantillons pour obtenir des résultats plus rapides et en temps réel. Une méthode qui y parvient a déjà été développée par Schwärzler et al. [SCH+12], mais seulement en réduisant le nombre d'échantillons par la technique de subdivision adaptative de source de lumière. L'idée principale est de commencer par quelques échantillons sur la zone de la lumière et en ajoutant plus de points d'échantillonnage si nécessaire. Le problème avec cette méthode est que la taille des zones de pénombre peut changer radicalement en peu de temps, le nombre d'échantillons nécessaires peut également varier considérablement, ce qui rend cette approche inadaptée aux applications interactives. Un autre problème est l'utilisation *du Hardware occlusion queries* [BMH98] qui produit une latence due au transfert de données entre le CPU et le GPU.

Cette thèse représente une tentative dans la voie d'explorer les implications de l'occultation ambiante de l'espace écran pour la résolution de problèmes du domaine du rendu temps réel tel que l'approximation de l'éclairage globale et la génération d'ombres douces, en procédant à l'accélération de techniques existantes.

2 Motivations

Il existe de nombreuses méthodes en synthèse d'images qui tentent de visualiser la forme 3D des objets là où la lumière n'atteint pas. Cependant, peu parviennent à fournir le sens de la profondeur qui est impératif pour aider à percevoir les détails. Pour cela, l'utilisation de techniques d'approximation d'illumination globale, telles que l'occultation ambiante de l'espace écran est adéquate pour le rendu des scènes 3D en temps réel car elle permet d'améliorer la compréhension des objets en apportant des ombres douces, consistant à atténuer la lumière en considérant l'occultation résultante de la présence des structures voisines. Visuellement, elle permet d'assombrir les zones naturellement difficiles d'accès à la lumière. Cela a pour effet de faire apparaître le relief des objets, là où les objets sans l'application de cette technique apparaîtraient entièrement plats.

Les méthodes du type Monte-Carlo sont populaires durant les trente dernières années parce qu'elles sont indépendantes de la géométrie de la scène. Cette propriété est très importante afin d'estimer un éclairage réaliste puisque la propagation de la lumière peut introduire des problèmes de haute dimension au fur et à mesure que les rayons se réfléchissent entre les différentes surfaces. L'idée centrale lors de l'utilisation des méthodes de Monte-Carlo est d'utiliser des échantillons de bonne qualité pour l'estimation. La probabilité de générer de tels échantillons doit être corrélée à l'énergie qui atteint un

pixel. Évidemment, plus un grand nombre d'échantillons sont requis pour l'estimation, plus les calculs seront coûteux. Ainsi, il est nécessaire pour un rendu temps réel avec des algorithmes de l'illumination globale réaliste, d'utiliser au maximum des échantillons de bonne qualité pour l'estimation. En revanche, il est très difficile d'obtenir des échantillons de bonne qualité puisque nous ne connaissons pas exactement la relation entre la lumière, provenant des sources de lumière, et l'énergie qui atteint le capteur (ou l'observateur). Parfois, nous ne pouvons qu'approximer la relation entre ces dernières, et assigner une probabilité, de générer des échantillons de manière aussi cohérente que possible, à l'énergie que recevra un pixel donné. La façon d'approximer cette relation de manière efficace reste une question ouverte.

En outre, l'utilisation des modèles d'intégration de Monte-Carlo pour des problèmes du rendu temps réel tel que les ombres douces et l'occultation ambiante dans l'espace écran ne permettent pas uniquement d'accélérer les modèles existants, mais offrent également la possibilité d'ouvrir de nouveaux horizons pour des expérimentations qui n'ont pas été tentées auparavant en raison du volume de calcul intensif qu'elles engendrent.

3 Objectifs et Contributions

En infographie les modèles de l'illumination ont pour objectifs de décrire l'interaction de la lumière avec les objets d'une scène virtuelle jusqu'à ce qu'elle atteigne l'œil de l'observateur. Les objectifs généraux de ce travail de recherche obéissent à deux axes :

- Le premier étant d'étendre la méthode de création d'ombres douces physiquement correcte en temps réel de Schwärzler et al. [SCH+12] en réduisant davantage le nombre d'échantillons nécessaires et en accélérant le calcul sans sacrifier la qualité de l'image.
- Le deuxième, quant à lui, consiste à fournir une nouvelle technique de rendu de la méthode de SSAO pour sélectionner les échantillons qui contribuent le plus à l'image finale, et de faciliter la compréhension de la forme et de la structure 3D, tout en produisant une visualisation en temps réel. Ensuite, d'étudier l'impact des méthodes de Monte-Carlo dans la résolution des problèmes de l'illumination globale et des problèmes des ombres douces en temps réel, et de mener de nouvelles expérimentations pour prendre en charge la complexité inhérente des scènes 3D.

Différentes contributions avec des issues principales sont traitées dans cette thèse :

- Nous proposons une nouvelle technique pour générer les ombres douces physiquement correctes à partir d'une source de lumière surfacique basée sur multiples filtres PCF afin de minimiser le nombre de cartes d'ombre nécessaires pour obtenir des ombres douces de haute qualité en rendu temps réel.

- Nous nous intéressons à accélérer le temps de calcul de l'algorithme SSAO sans affecter la qualité visuelle des résultats. Dans ce contexte, de nombreux modèles d'intégration de Monte-Carlo existent, mais avec des stratégies d'échantillonnage différentes, telles que l'échantillonnage stratifié [Rub81], l'échantillonnage par importance [OZ00] et l'échantillonnage préférentiel multiple [Vea97]. Notre technique vise à réduire ce nombre d'échantillons en privilégiant les échantillons les plus significatifs. Nous avons remplacé la stratégie d'échantillonnage aléatoire uniforme par les techniques : d'échantillonnage préférentiel multiple (EPM) [ZB18], d'échantillonnage par importance et d'échantillonnage stratifié [ZER+16]. Ce qui nous a permis d'améliorer la qualité visuelle en ajoutant plus de détails aux zones où la lumière directe n'atteint pas. Nous avons appliqué nos techniques d'optimisation à différentes approches populaires, telles que Crytek [Mit07], Mittring [Mit12] et Alchemy [MCG+11], ce qui nous a permis d'obtenir de meilleurs résultats visuels en moins de temps.

4 Organisation de la thèse

Dans cette section, nous proposons un résumé des différents chapitres composant ce manuscrit tout en précisant les principaux résultats obtenus.

Le premier chapitre de cette thèse est dédié à la présentation des définitions détaillées de la théorie sur l'illumination globale, les grandeurs radiométriques, les grandeurs photométriques, la propagation de la lumière, jusqu'à l'équation de rendu de Kajiya. Ensuite, nous présentons les méthodes de Monte-Carlo de base et les méthodes de Monte-Carlo pour l'illumination globale, puis nous décrivons quelques algorithmes de l'illumination globale de base et quelques algorithmes de l'illumination globale en temps réel. Enfin, un bilan des travaux sur les techniques d'approximation de l'illumination globale.

Le second chapitre présente un état de l'art sur les travaux relatifs aux ombres en informatique graphique. Ces travaux sont classés en deux catégories, la première concerne les travaux se focalisant sur les ombres indirects générés par les méthodes l'illumination globale. Une deuxième partie sur les ombres directs générés par les méthodes de l'illumination directe, puis nous fournissons aussi une analyse de ses travaux. À la fin, nous présentons certaines méthodes de création d'ombres douces en temps réel dans le domaine de l'art.

Le troisième chapitre présente un état de l'art sur les travaux relatifs aux méthodes d'occultation ambiante. Ces travaux sont classés en deux catégories, la première concerne les travaux se focalisant sur les méthodes basées sur l'espace objet. Une deuxième partie sur les méthodes basées sur l'espace écran. À la fin, nous présentons un bilan de ses travaux.

Le quatrième chapitre présente notre première proposition, elle introduit une nouvelle technique de création d'ombres douces physiquement correctes avec l'introduction de multiples filtres PCF en rendu temps réel. Nous commençons une description générale de notre technique, suivie des différents détails de chaque partie de

notre technique. À la fin, nous présentons nos résultats avec une étude comparative avec la méthode de Michael Schwärzler et al. [SCH+12].

Le cinquième chapitre concerne la deuxième proposition qui entre aussi dans le cadre du rendu temps réel des algorithmes d'approximation de l'illumination globale dans l'espace écran. Nous décrivons nos propositions qui sont de nouvelles techniques de la méthode de SSAO basé sur l'échantillonnage préférentiel multiple, l'échantillonnage par importance et l'échantillonnage stratifié. Le modèle de l'échantillonnage préférentiel multiple consiste à utiliser une approche qui combine l'échantillonnage d'importance avec l'échantillonnage stratifié afin de réduire davantage les échantillons nécessaires pour la méthode de SSAO. Nous présentons nos techniques en détaillant chaque partie de notre système. À la fin, nous présentons nos résultats avec une étude comparative avec différentes méthodes de SSAO existant dans le domaine.

Enfin, le dernier chapitre présente la conclusion de ce manuscrit, il met en exergue l'apport de cette thèse, les limites de l'approche élaborée ainsi que les perspectives potentielles.

Chapitre 1

Illumination Globale : Contexte théorique

1.1 Introduction

Le calcul de l'illumination globale a pour objectif de simuler le plus fidèlement possible les effets d'éclairage dans un environnement virtuel, afin de produire des images qualifiées de réalistes. La simulation des phénomènes d'éclairage global nécessite tout d'abord de disposer d'une conception réaliste et précise de la scène, à savoir :

- le type et la position des sources lumineuses ;
- la modélisation géométrique et la position des objets ;
- la couleur et les propriétés des matériaux.

Par la suite, la scène va servir de support aux modèles d'interactions lumineuses telles que les réflexions, les transmissions et les absorptions. Ces interactions incluent toutes les combinaisons de diffus, de spéculaire, des effets d'ombrage, des effets caustiques et de la transmission de la couleur des objets sur d'autres par réflexion diffuse. De fait, la simulation réaliste des phénomènes d'éclairage nécessite une compréhension approfondie des effets réels des phénomènes lumineux et de leur propagation dans la scène 3D. Elle est basée essentiellement sur la théorie corpusculaire, la physique de la réflexion et l'optique géométrique.

Durant ces trente dernières années, différentes classes d'algorithmes de l'illumination globale sont proposées. Parmi celles-ci, nous nous intéressons, dans nos travaux de recherche, aux méthodes dites de Monte-Carlo. La méthode de Monte-Carlo permet d'estimer la solution des équations intégrales de l'illumination par pondération d'un ensemble d'évaluations stochastiques. L'intégration des méthodes stochastiques au calcul de l'illumination globale a contribué au développement d'algorithmes robustes et efficaces pour tous les types de transferts lumineux. Cependant l'aspect stochastique et récursif de ces méthodes augmente considérablement le coût en termes de temps de calcul. De plus, bien que ces méthodes convergent vers une solution de haute qualité, elles ne

possèdent pas un critère qui permette d'arrêter le calcul du rendu d'une manière automatique.

Dans la première partie de ce chapitre, nous introduisons quelques notions de base des modèles physiques de la lumière ainsi que les unités photométriques principales utilisées en images de synthèse. Nous parlons aussi de l'équation fondamentale de calcul du rendu proposé par Kajiya [Kaj86]. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons le principe des méthodes de l'illumination globale de type Monte-Carlo et nous discutons des problèmes qui nous occupent, à savoir la réduction du temps de calcul et l'utilité d'un critère d'arrêt automatique des algorithmes stochastiques du rendu réaliste. Nous verrons ensuite les principales techniques de l'illumination globale interactive et en temps réel. Finalement, nous terminons ce chapitre par un bilan sur les techniques de l'illumination globale interactive et en temps réel.

1.2 Définitions de base

L'objet des approches de calcul d'éclairage photoréaliste, appliquées à la synthèse d'images, est de modéliser les aspects visuels d'un rayonnement lumineux tels qu'ils sont vus par l'œil humain. La photométrie est la science qui permet de mesurer le rayonnement lumineux tel qu'il est ressenti par la vision. Les entités utilisées en photométrie sont dérivées des entités radiométriques.

La radiométrie mesure l'énergie rayonnante émise par une source ou reçue par un détecteur sans se soucier de la sensibilité de l'œil. On distingue la radiométrie de la photométrie, qui mesure l'énergie des radiations en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain. La base des unités photométriques est la courbe de sensibilité spectrale de l'observateur de référence CIE (est l'abréviation de la Commission Internationale de l'Eclairage.). Cette courbe, illustrée dans la figure 1.1, montre que l'œil humain n'est sensible qu'aux radiations dont la longueur d'onde est comprise entre 380 nm (bleu) et 780 nm (rouge). De plus, un maximum de sensibilité en vision de jour est observé pour 555 nm. En dehors de cette plage toutes les radiations sont invisibles.

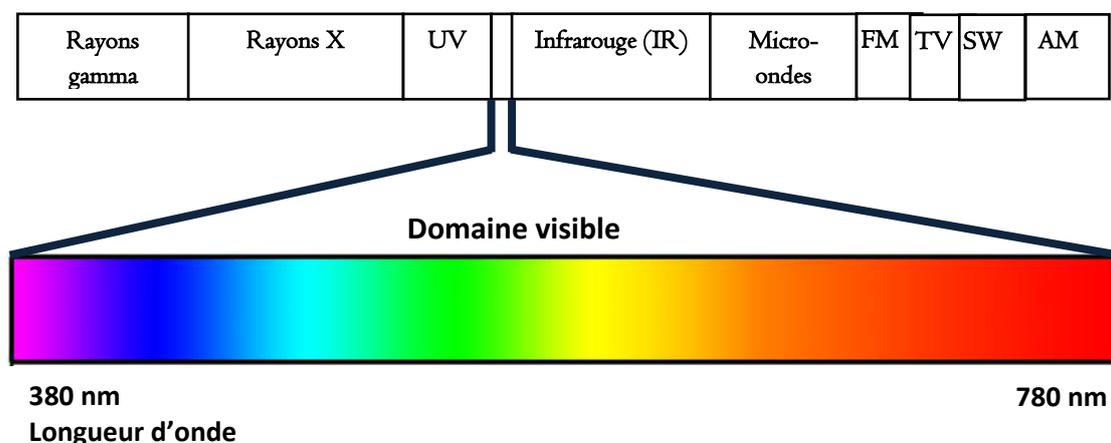


Figure 1.1: La courbe de sensibilité de l'œil normalisée par la CIE.

Nous commençons dans cette section par la définition de la notion géométrique de l'angle solide. Cette notion permet de définir des grandeurs photométriques appliquées au calcul du rendu que nous détaillons par la suite.

1.2.1 Grandeurs géométriques : l'angle solide

Un angle solide est l'analogie tridimensionnelle de l'angle plan ou bidimensionnel. L'angle solide d'une source lumineuse mesure la surface qui serait directement éclairée si cette source était placée au centre d'une sphère de rayon unité. C'est le rapport de la surface d'une partie d'une sphère sur le rayon au carré. Son unité est le stéradian noté sr . La notion d'angle solide intervient en particulier dans la définition de la luminosité et de ses grandeurs dérivées. Dans le domaine de l'illumination globale, l'angle solide représente un ensemble de directions autour d'une sphère.

Pour calculer l'angle solide sous lequel on voit un objet à partir d'un point donné, on projette l'objet sur une sphère de rayon r centrée en ce point. Si la surface que cette projection fait sur la sphère est A , l'angle solide sous lequel l'observateur voit l'objet est par définition : $\omega = \frac{A}{r^2}$. Le champ visuel total de l'observateur correspond à l'aire totale de la sphère $\Omega_{4\pi}$ tel que $A = \frac{4\pi R^2}{r^2}$, d'où $\omega = 4\pi sr$.

Dans le cas infinitésimal, un angle solide élémentaire $d\omega$ détermine sur la sphère de rayon r une surface élémentaire infiniment petite $dA \cos\theta$, d'où

$$d\omega = \frac{dA \cos\theta}{r^2} \quad (1.1)$$

Comme présenté dans la figure 1.2, θ est l'angle entre la normale en dA et la direction de dA vers o le centre de la sphère.

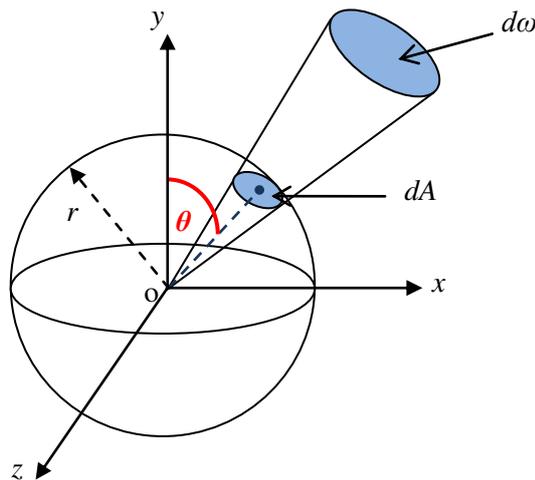


Figure 1.2: Notion d'angle solide [Tak09].

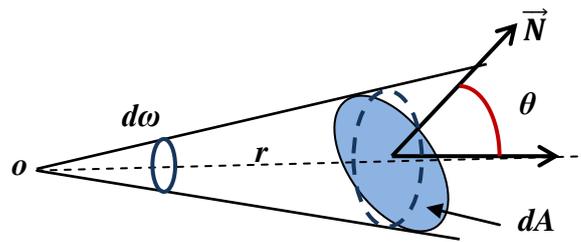


Figure 1.3 : Illustration de l'angle solide: $d\omega$ est un angle solide différentiel projeté sur une aire différentielle dA [Tak09].

La figure ci-dessous 1.3 illustre un exemple d'angle solide. De plus, l'angle solide peut également être représenté dans le système de coordonnées sphériques. Cette représentation est populairement utilisée dans le domaine du rendu car nous l'intégrons autour d'une sphère (hémisphère). La formule est décrite comme suit :

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1.2)$$

La figure suivante illustre l'angle solide dans le système de coordonnées sphériques.

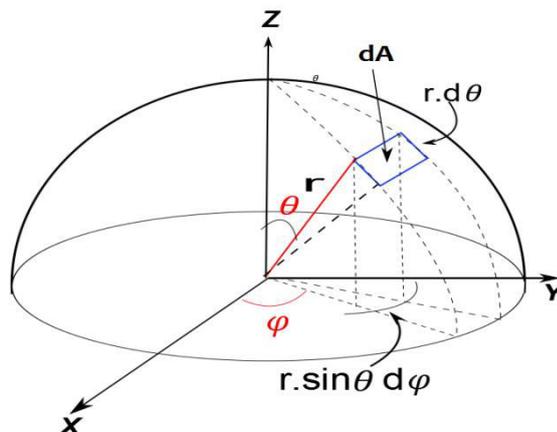


Figure 1.4 : Angle solide dans le système de coordonnées sphériques [Tak09].

1.2.2 Grandeurs radiométriques

Le domaine de la radiométrie décrit les quantités nécessaires à la mesure du rayonnement électromagnétique. Les quantités radiométriques sont utilisées dans les algorithmes d'illumination globale pour mesurer la manière dont les photons se propagent et interagissent avec différents médias dans une scène. Les grandeurs radiométriques sont des mesures physiques qui caractérisent les différents phénomènes lumineux. Dans le domaine de l'infographie, nous utilisons ces quantités pour définir l'équation du rendu. Nous discutons maintenant des quantités radiométriques de base, qui sont également résumées dans le tableau 1.1 et illustrées à la figure 1.5.

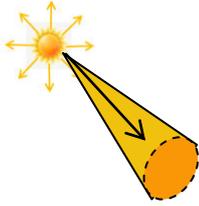
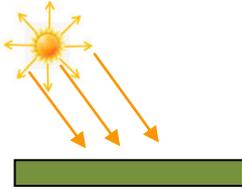
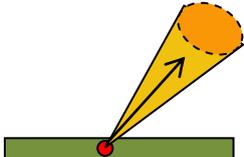
Flux Φ , watts	Intensité I , watts/sr	Irradiance E , watts/m ²	Radiance L , watts/(sr · m ²)
			
A	B	C	D

Figure 1.5 : Différentes quantités radiométriques. (A): le flux, (B) : l'intensité, (C) : l'irradiance et (D) : la radiance.

A. Le flux rayonnant (la puissance lumineuse)

La quantité radiométrique la plus élémentaire est le flux rayonnant ou la puissance rayonnante. Il exprime l'énergie du rayonnement électromagnétique Q (en joules) propagée par unité de temps (secondes). Elle est notée par ϕ et mesurée en Watts [$W = J \cdot s^{-1}$]. flux radiant est donné par:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

B. L'intensité rayonnante

L'intensité radiante I est le flux radiant ϕ émis par une source lumineuse ponctuelle par unité d'angle solide ω . Elle est mesurée en $W \cdot sr^{-1}$. L'intensité est donnée par:

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (1.4)$$

C. L'irradiance

L'irradiance E exprime le flux radiant ϕ reçue par l'unité de surface illuminé A . L'unité d'irradiance est le watt/m². Le terme correspondant en photométrie est appelé l'illuminance et est donné en lux = lumen/m². L'irradiance est donnée par:

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (1.5)$$

D. La radiance

Radiance: est le flux radiant ϕ par unité d'angle solide ω par unité de surface A :

$$L(x \rightarrow \omega) = \frac{d\phi}{d\omega dA(x) \cos\theta} \quad (1.6)$$

Où θ est l'angle entre la normale de la surface A et la direction ω . La luminance est mesurée en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.

Radiométrie			Photométrie		
Quantité	Symbole	Unités	Quantité	Symbole	Unités
Flux radiant	ϕ	W	Flux lumineux	ϕ	lm
Intensité radiante	I	W/sr	Intensité lumineuse	I	lm/sr
Irradiance	E	W/m ²	Illuminance	E	lm/m ²
Radiance	L	W/(m ² .sr)	Luminance	L	lm/(m ² .sr)

Table 1.1. Les quantités radiométriques et photométriques.

Le tableau 1.1 montre la nomenclature des quantités radiométriques et leurs correspondants dans les quantités photométriques.

1.2.3 Colorimétrie

La simulation de l'impression d'une onde lumineuse sur l'observateur nécessite de prendre en compte la réponse de l'œil humain. L'œil humain est sensible aux radiations électromagnétiques comprises entre 380 nm et 780 nm. Ainsi, il perçoit la manière dont un objet coloré absorbe, réfléchit et diffuse la lumière qu'il reçoit. La compréhension de la neurophysiologie de l'œil a permis de modéliser l'observateur par les fonctions colorimétriques de l'observateur standard, présentées dans la figure 1.6, qui sont définies par la commission internationale de l'éclairage en 1924.

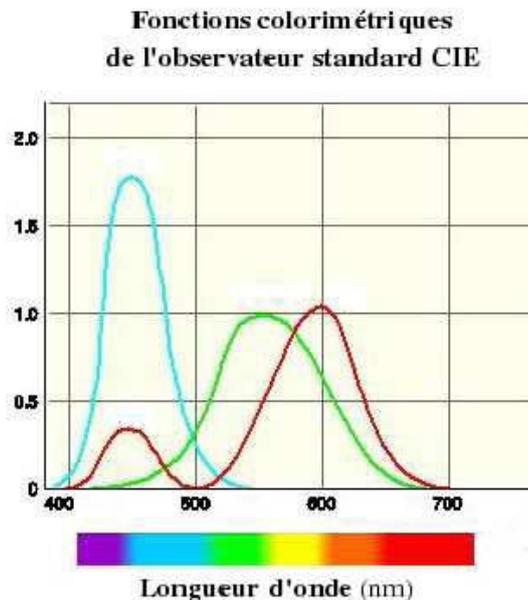


Figure 1.6: Fonctions de réponses colorimétriques d'un observateur standardisé par la CIE.

D'autre part, l'objet coloré est caractérisé par ses fonctions spectrales. Elles définissent la capacité de la matière à absorber et diffuser certaines longueurs d'onde de la lumière blanche incidente. La commission internationale de l'éclairage CIE 1931 a défini 3 grandeurs appelées X, Y et Z, caractérisant un objet coloré perçu par un observateur standard sous un éclairage normalisé. Il existe d'autres espaces colorimétriques tels que

l'espace RVB et l'espace Lab. L'espace de couleur RVB dépend de la technologie du périphérique d'affichage, pour lequel chaque couleur affichable est représentée comme un mélange additif des trois primaires de base : le rouge, le vert et le bleu. Développé en 1976, l'espace Lab est basé sur une transformation mathématique du système CIE 1931. Il caractérise une couleur à l'aide d'un paramètre correspondant à la luminance et de deux paramètres de chrominance qui décrivent la couleur. Il est spécialement étudié pour que les distances calculées entre les couleurs correspondent aux différences perçues par l'œil humain.

1.3 Propagation de la lumière

L'utilisation des grandeurs photométriques pour mesurer les phénomènes d'éclairage nécessite de comprendre l'interaction entre les rayons lumineux et les objets. Le comportement de la lumière au contact d'un matériau dépend des propriétés des surfaces de ce matériau par rapport à la lumière, ainsi que des longueurs d'onde de cette lumière. Les rayons lumineux se propagent depuis les sources lumineuses et arrivent sur des surfaces. Ils sont alors soit réfléchis, réfractés (ils pénètrent dans le matériau) ou absorbés (ils se transforment en un autre type d'énergie).

Depuis l'antiquité, l'origine et la nature de la lumière n'ont pas cessé d'intéresser les scientifiques. Au moyen-âge, Ibn al-Haytham offre la première description scientifique du fonctionnement de l'œil. Il s'est opposé à la théorie antique selon laquelle l'œil émet des rayonnements qui explorent les objets et provoquent les différents aspects de la vision.

Il mentionne ainsi dans son ouvrage *Kitāb al-Manāzīr* [SS03] que la vision est provoquée par la lumière qui arrive sur l'œil et non pas produite par l'œil. Par la suite, Descartes a rassemblé, dans son ouvrage *Dioptrique* (1637), les lois fondamentales de l'optique géométrique. Ces lois, nommées en France lois de Snell-Descartes, en référence au mathématicien hollandais Willebrord Snell Van Royen, décrivent deux types de phénomènes : la réflexion et la réfraction de la lumière [Wad07; DPA94]. Enfin, Pierre Fermat en 1657 décrit le principe du chemin optique d'un rayon lumineux. Le principe de Fermat permet de retrouver la plupart des résultats de l'optique géométrique, en particulier les lois de la réflexion et les lois de la réfraction [Per97].

1.3.1 Réflexion de la lumière

La réflexion est le changement de direction que subit un rayon lumineux incident. Ce rayon est renvoyé par la surface réfléchissante dans une direction symétrique à la direction d'incidence par rapport à la normale. Selon les propriétés des matériaux, il existe principalement deux types de réflexion : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse, correspondant respectivement aux surfaces brillantes et mates.

A. Réflexion spéculaire

Dans le cas d'un matériau brillant, une partie de la lumière incidente est réfléchi dans la direction théorique définie par les lois de Descartes ou, plus généralement, à l'intérieur d'un cône centré autour de cette direction. Plus l'angle entre la direction d'observation et la

direction théorique augmente, plus la quantité de lumière observée diminue. Dans le cas d'une surface lisse, on observera un pic spéculaire; dans le cas d'une surface moins lisse, ce sera un lobe (décroissance plus lente de l'intensité lumineuse en fonction de l'angle à l'axe du cône). La réflexion est dite parfaitement spéculaire si elle obéit aux lois de Snell-Descartes. La surface réfléchissante renvoie un seul rayon réfléchi. L'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi. Le plan contenant le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence, comme le présente la figure 1.7.a, est dit plan d'incidence. L'angle orienté θ_1 pris entre la normale au point d'incidence et le rayon incident est dit angle d'incidence. L'angle orienté θ_2 pris entre la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi est dit angle de réflexion. La loi de Descartes de la réflexion s'énonce ainsi :

- le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence
- les angles incident θ_1 et réfléchi θ_2 vérifient : $\theta_1 = -\theta_2$.

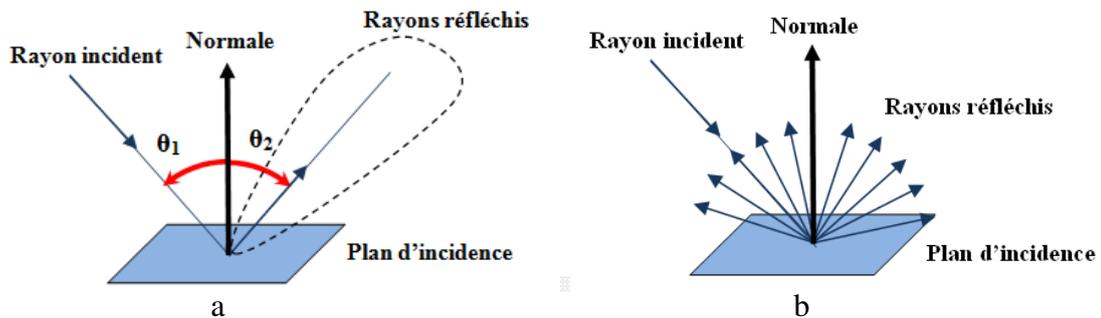


Figure 1.7: La réflexion de la lumière. (a) Réflexion spéculaire, (b) réflexion diffuse [Tak09].

B. Réflexion diffuse

La réflexion diffuse intervient sur les interfaces mates. Le rayon lumineux incident est absorbé et réémis de manière non cohérente, dans plusieurs directions indépendantes. L'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis. La réflexion diffuse peut être parfaitement diffuse quand l'intensité de la lumière diffusée est la même d'une direction à l'autre (figure 1.7.b).

1.3.2 Réfraction de la lumière

La réfraction est le changement de direction que subit un rayon lumineux incident en passant à travers une interface qui sépare deux milieux. Chaque milieu homogène est caractérisé par sa capacité à ralentir la lumière. On modélise cette capacité par l'indice de réfraction n qui s'exprime sous la forme : $n = \frac{c}{v}$, où v est la vitesse de la lumière dans ce milieu et c est la vitesse de la lumière dans le vide.

En optique géométrique, la réfraction décrite par Descartes est présentée dans la figure 1.8. L'angle orienté θ_1 représente l'angle d'incidence. L'angle orienté θ_2 entre la

normale au point d'incidence et le rayon réfracté est dit angle de réfraction. La loi de la réfraction de Descartes s'énonce ainsi :

- le rayon réfracté est dans le plan d'incidence
- les indices de réfraction n_1 et n_2 de chacun des milieux et les angles incident θ_1 et réfracté θ_2 sont liés par la relation : $n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$.

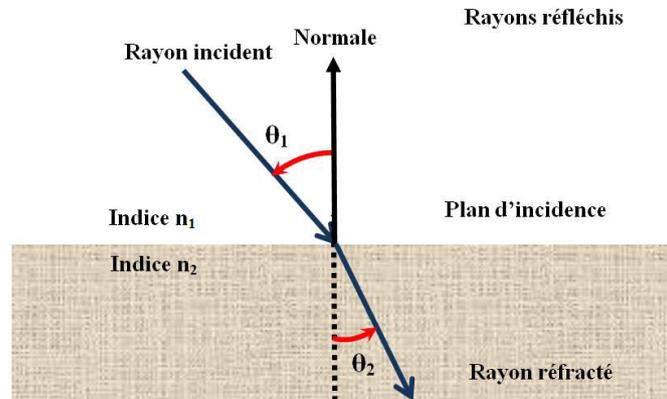


Figure 1.8: Géométrie pour la réfraction de la lumière [Tak09].

1.3.3 Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle

Pendant le rendu, une représentation correcte des propriétés du matériau est nécessaire pour modéliser et visualiser avec précision chaque objet différent dans l'environnement virtuel. En radiométrie, ceci est accompli par des fonctions de diffusion. Edward Nicodemus [Nic65] introduit en radiométrie la notion de fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (en anglais : *Bidirectional Reflectance Distribution function*, BRDF) pour modéliser les propriétés réfléchissantes d'un matériau. La BRDF décrit comment la lumière incidente est dispersée à un point de surface sur un hémisphère qui est orienté par rapport à sa normale. L'intensité de la réflexion varie selon la position de la source lumineuse et l'angle suivant lequel la surface est observée.

Elle se limite à la modélisation de la réflexion lumineuse sur une surface homogène: une telle interface sépare deux milieux homogènes. La BRDF ne modélise en effet ni le phénomène de réfraction ni celui de réflexion dans des milieux hétérogènes. Cette fonction mesure la répartition de l'énergie reçue en un point d'une surface en fonction de l'angle d'incidence. La BRDF, illustrée dans la figure 1.9, est une propriété locale importante car elle influe sur l'éclairage global de la scène provenant des inter-réflexions entre les objets. Elle est définie par l'équation 1.7 comme le rapport entre la luminance réfléchie dans une direction donnée et l'éclairement provenant d'une direction incidente. Son unité est l'inverse du stéradian sr^{-1} .

$$f_r(x, \omega_i, \omega_o) = \frac{\text{radiance}}{\text{irradiance}} = \frac{dL_o(x \rightarrow \omega_o)}{dE(x \leftarrow \omega_i)} = \frac{dL_o(x \rightarrow \omega_o)}{L_i(x \leftarrow \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1.7)$$

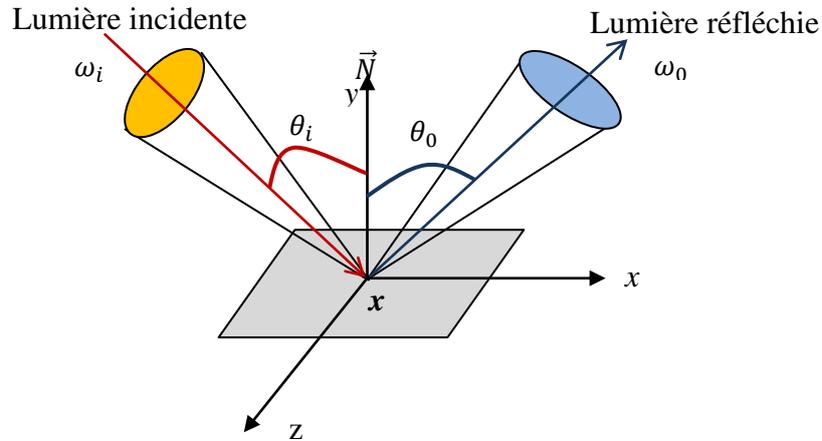


Figure 1.9: Illustration de la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) [Tak09].

Propriétés de la BRDF

Pour qu'un rendu soit réaliste physiquement plausible, les modèles de la BRDF doivent vérifier les lois de la physique, à savoir : la non-négativité, la réciprocité et la conservation de l'énergie.

A. Non-négativité

La BRDF est une valeur scalaire strictement positive telle que :

$$\forall x, \omega_i, \omega_0: f_r(x, \omega_i, \omega_0) > 0 \quad (1.8)$$

B. Conservation de l'énergie

La propriété de conservation d'énergie exprime que pour toutes les directions ω_i et ω_0 sur l'hémisphère Ω_+ , la quantité d'énergie totale qui est réfléchie ne peut pas être supérieure à l'énergie de la quantité incidente. La propriété d'énergie de conservation est donnée par:

$$\int_{\Omega_+} f_r(x, \omega_i, \omega_0) \cos\theta_i d\omega_i \leq 1 \quad (1.9)$$

C. Principe de réciprocité d'Helmoltz

Une BRDF caractérisant la réflectance doit être symétrique. Cette condition signifie que la BRDF est indépendante de la direction du flux lumineux : les directions d'éclairage et d'observation sont donc interchangeables, d'où sa qualification de fonction bidirectionnelle.

$$f_r(x, \omega_i, \omega_0) = f_r(x, \omega_0, \omega_i) \quad (1.10)$$

Cette symétrie rend possible le suivi inverse des rayons lumineux depuis l'œil de l'observateur vers la source lumineuse. Cette propriété, que nous détaillerons plus tard, constitue la base des algorithmes du rendu réaliste de type Monte-Carlo.

1.4 L'équation du rendu

Dans cette section, nous présentons les origines de l'équation du rendu qui modélise physiquement le problème de distribution de l'éclairage dans une scène 3D.

La tâche principale dans le domaine de l'infographie est la création d'images photoréalistes. La génération d'images nécessite un calcul précis de la répartition de la lumière dans une scène 3D. Du point de vue mathématique, la synthèse d'image photoréaliste est équivalente à la solution de l'équation du rendu. En 1986, Kajiya [Kaj86] a formulé la première modélisation mathématique qui rassemble les interactions lumineuses liées à l'éclairage global dans la scène sous la forme de l'équation du rendu. Cette équation est devenue la base du calcul de l'illumination globale unifiant tous les algorithmes de rendu. En effet, elle permet de retrouver toutes les composantes de la luminance y compris celles considérées dans les algorithmes du rendu réaliste proposés auparavant (le tracé de chemin et la radiosité). L'énergie totale $L(x \rightarrow \omega)$ émise par une portion de surface est la somme de la radiance propre émise L_e (comme pour une source de lumière) et de la réflexion L_0 de toute la lumière qui arrive sur cette surface :

$$L(x \rightarrow \omega) = L_e(x \rightarrow \omega) + L_0(x \rightarrow \omega) \quad (1.11)$$

L'énergie qui arrive sur une portion de surface dans une portion d'angle solide $d\omega_i$ s'exprime de la façon suivante: $L(x \leftarrow \omega_i) \cos(\theta_i)$, où θ_i est l'angle entre la normale N_x à la surface au point x et la direction ω_i .

La réflexion est contrôlée par la BRDF, elle est définie comme la proportion d'énergie émise après réflexion dans une direction $dL_0(x \rightarrow \omega_0)$. En utilisant la définition de la BRDF (1.7), on peut déduire la radiance sortante dL_0 en un point x dans une direction différentielle $d\omega$ comme:

$$dL_0(x \rightarrow \omega_0) = f_r(x, \omega_i, \omega_0) L_i(x \leftarrow \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (1.12)$$

Pour trouver la radiance dans tout le domaine de la direction, nous intégrons l'équation 1.12:

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_0) L_i(x \leftarrow \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (1.13)$$

Pour générer la formule de Kajiya, on ajoute la luminance propre L_e à un point x (1.14):

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_0) L_i(x \leftarrow \omega_i) \cos(\theta_i) d\omega_i \quad (1.14)$$

Où \vec{N}_x est la normale de la surface au point x , et Ω représente l'hémisphère au dessus de la surface du point x .

L_o : décrit la radiance (luminance) émise en un point x d'une surface et dans une direction ω_o . Tout simplement, il quantifie la lumière quittant un point dans une direction donnée.

L_e : est la radiance propre émise (sortant) (comme pour une source de lumière).

L_i : est la radiance entrant (réflexion de toute la lumière qui arrive sur cette surface). En principe, cette radiance entrant peut elle-même dépendre de la radiance sortant L_o à un point de la scène différente.

f_r est une fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF). Elle décrit comment une grande partie de la lumière entrante de la direction ω_i se reflète dans la direction ω_o à un point x donné.

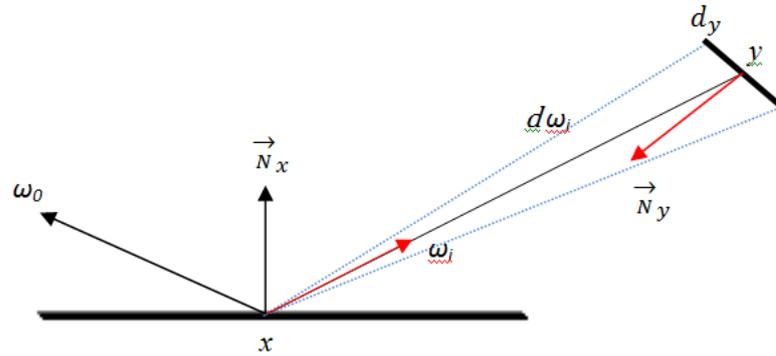


Figure 1.10: Configuration pour l'expression surfacique de l'équation du rendu [PB07].

1.4.1 Formulation de l'équation de Kajiya en termes de surfaces.

L'équation de kajiya [Kaj86] peut être reformulée en termes de surfaces, il est plus facile de l'intégrer sur une lumière surfacique S plutôt que l'angle solide.

Pour un point x qui voit y le long de ce segment, l'échange d'énergie ne sera pas entravé par la géométrie de la scène (i.e. en ne tenant pas compte des milieux participants), la luminance sortante d'un point restera identique jusqu'à ce qu'elle atteigne une autre surface. D'une manière simple, on peut donc évaluer la luminance incidente L_i de la manière suivante (Symétrie entre de surface) :

$$L_i(x, x \rightarrow y) = L_o(y, y \rightarrow x) \quad (1.15)$$

La reformulation surfacique de l'équation du rendu (équation 1.14) est basée sur la transformation de l'angle solide en fonction d'unité de surface différentielle. Nous pouvons exprimer l'angle solide en utilisant l'unité de surface d_s en utilisant l'expression suivante:

$$d\omega = \frac{\cos\theta' ds}{\|x-y\|^2} \quad (1.16)$$

Où d_s est l'unité de surface de la source de lumière, θ' est l'angle entre la normale N_y de la source de lumière surfacique et le vecteur de la source lumineuse vers la surface qui est éclairé, $\|x-y\|^2$ est la distance euclidienne entre x et y .

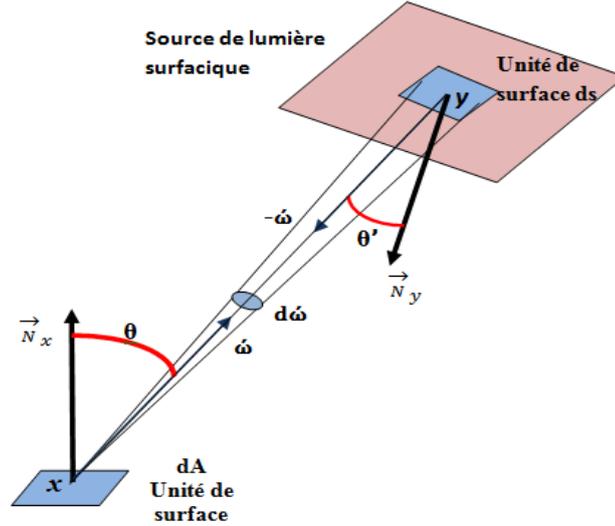


Figure 1.11: Source de lumière surfacique. La lumière incidente de la direction $\vec{\omega}$ à partir d'unité d'angle solide $d\vec{\omega}$ est émis à partir de l'unité de surface ds à une distance $\|x-y\|$ centrée au point x [PB07].

L'intégration sur les directions comme indiqué dans l'équation (1.14) peut être réinterprétée. Elle correspond à une intégration sur une sphère centrée en x sur laquelle toute la géométrie environnante est projetée comme on le voit à partir de x . Nous pouvons donc effectuer un changement de variables et d'une manière équivalente intégrer sur les surfaces de la scène S au lieu des directions sur un hémisphère en utilisant les formules (1.15 et 1.16), conduisant à :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_S f_r(x, x \rightarrow y, \omega_0) L_0(y, y \rightarrow x) G(x, y) V(x, y) ds \quad (1.17)$$

Démonstration :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_0) L_i(x \leftarrow \omega_i) \cos(\theta_i) d\omega_i$$

On applique le changement de variables et on obtient :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_{\Omega} f_r(x, x \rightarrow y, \omega_0) L_i(x, x \rightarrow y) \cos(\vec{N}_x, x \rightarrow y) d\omega_i$$

On remplace $L_i(x, x \rightarrow y)$ par $L_0(y, y \rightarrow x)$ et on obtient :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_{\Omega} f_r(x, x \rightarrow y, \omega_0) L_0(y, y \rightarrow x) \cos(\vec{N}_x, x \rightarrow y) d\omega_i$$

On remplace par la formule (1.16) et on obtient :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_S f_r(x, x \rightarrow y, \omega_0) L_0(y, y \rightarrow x) \frac{\cos(\vec{N}_x, x \rightarrow y) \cos(\vec{N}_y, y \rightarrow x) ds}{\|x-y\|^2}$$

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_S f_r(x, x \rightarrow y, \omega_0) L_0(y, y \rightarrow x) \frac{\cos(\theta) \cos(\theta') ds}{\|x-y\|^2}$$

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_e(x \rightarrow \omega_0) + \int_S f_r(x, x \rightarrow y, \omega_0) L_0(y, y \rightarrow x) G(x, y) V(x, y) ds$$

Avec :

- $G(x, y)$ est le terme géométrique défini par :

$$G(x, y) = \frac{\cos(\theta) \cos(\theta_r)}{\|x-y\|^2} \quad (1.18)$$

- $V(x, y)$ est la fonction de visibilité définie telle que :

$$V(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x \text{ et } y \text{ sont mutuellement visible} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (1.19)$$

L'équation du rendu est basée physiquement et décrit l'équilibre de l'énergie dans une scène. Bien qu'elle soit un bon modèle de transport d'éclairage, la résolution de l'équation est analytiquement difficile. Le rendu photoréaliste vise à trouver des moyens efficaces pour rapprocher et résoudre cette équation, qui dépend d'une façon inhérente sur elle-même parce que la lumière sortant à un moment donné pourrait finir par être la lumière entrante pour un autre point. Cette dépendance rend le calcul particulièrement difficile. Il est pratiquement impossible de trouver une solution analytique à l'équation de rendu, en particulier pour les scènes géométriques complexes.

Dans la section précédente, nous avons présenté quelques concepts mathématiques de base qui sont utilisés dans le domaine de l'illumination globale. Dans la section suivante, nous allons démontrer un moyen efficace de résoudre l'équation du rendu en utilisant l'intégration de Monte-Carlo, qui peut être une solution robuste car elle est basée sur un échantillonnage aléatoire.

1.5 La méthode de Monte-Carlo

Les méthodes de Monte-Carlo (MC) se basent sur un échantillonnage stochastique pour approcher une solution numérique dont la solution analytique est très complexe. En 1946, Nicholas Metropolis et Stanislas Ulam [MU49] ont nommé la méthode de Monte-Carlo. Cette méthode est devenue un outil probabiliste indiscutable notamment pour évaluer les intégrales multidimensionnelles difficiles à résoudre analytiquement.

Dans les problèmes d'illumination globale, nous devons estimer la distribution de la lumière dans un monde virtuel, exprimée par l'équation du rendu (voir la section 1.4). La méthode de Monte-Carlo est introduite en synthèse d'images par Kajiya [Kaj86], pour résoudre l'équation intégrale de l'illumination globale. Dans sa forme générale, ceci implique l'estimation d'une intégrale de haute dimension définie d'une fonction potentiellement discontinue et inconnue de la lumière entrante (radiance) pour laquelle il n'existe pas de solution de forme fermée. En l'absence d'une forme analytique, l'intégrale est approximée en utilisant des techniques d'intégration numérique. Les méthodes numériques sont généralement classées comme déterministes et stochastiques.

Les techniques déterministes, rapprochent l'intégrale en tant que somme sur n partitions sur le domaine d'intégration. Elles donnent de bons résultats mais avec des taux de convergence très élevés.

Le modèle de l'illumination peut être traité comme une procédure stochastique de simulation au lieu d'un modèle déterministe. C'est là que se situe l'idée fondamentale des méthodes de Monte Carlo, qui formulent une solution à un problème comme un paramètre de variables aléatoires. L'intégration de Monte-Carlo est très puissante en raison de sa simplicité, l'évaluation de toute intégrale multidimensionnelle complexe se transforme en un simple problème du calcul d'espérance mathématique. De plus, son taux de convergence est indépendant du nombre de dimensions et, surtout, il ne pose aucune restriction sur la continuité ou la forme de l'intégral. Son principal inconvénient est qu'elle souffre d'une grande variance et qu'un grand nombre d'échantillons sont habituellement requis pour assurer la convergence.

Dans les algorithmes d'illumination, cela se manifeste généralement sous forme de bruit de haute fréquence. Par conséquent, un grand nombre d'échantillons est nécessaire pour réduire la variance et converger vers la solution attendue. Pour augmenter le taux de convergence, on utilise habituellement des techniques de réduction de la variance. Par exemple, l'échantillonnage par importance est utilisé afin de distribuer des échantillons vers des zones qui contribuent davantage à la valeur intégrale finale. Une autre source de variance est due à l'utilisation de nombres aléatoires, qui peuvent produire agglutination sous un nombre fini d'essais. Pour réduire ces erreurs, diverses techniques utilisent des méthodes basées sur la distribution stratégique d'échantillons, comme l'échantillonnage stratifié.

1.5.1 Concepts de la théorie des probabilités

Les processus stochastiques sont basés sur l'idée de nombres aléatoires. Une variable aléatoire est une variable générée par un processus aléatoire, basée sur un ensemble de résultats probables. Chaque fois qu'une expérience est effectuée, la valeur de variable aléatoire est choisie parmi les résultats donnés, où chaque résultat est associé à une certaine probabilité.

A. La fonction de densité de probabilité (PDF)

On appelle fonction de densité de probabilité ou densité de probabilité sur un intervalle I , toute fonction f continue, positive sur I et dont l'aire totale du domaine délimité par une courbe et l'axe des abscisses est égale à 1.

Autrement dit : f est une densité de probabilité sur l'intervalle $[a; b]$ lorsque :

- 1) f est continue sur I ;
- 2) f est positive sur I ; c'est-à-dire pour tout $x \in I : f(x) \geq 0$;
- 3) $\int_a^b p(x)dx = 1$

La fonction de densité de probabilité (PDF) est notée $p(x)$.

B. La fonction de distribution cumulative (CDF)

Une variable aléatoire continue X est une variable qui prend ses valeurs dans des résultats infiniment infinis s_k de son domaine. Définissons la fonction de distribution de probabilité d'une variable aléatoire continue $X \in [a; b]$, la probabilité affectée à une telle variable x dans le petit intervalle $[a; b]$, elle est notée par $p(x)dx$.

$$CDF(X) = P(X) = P(x \in [a; b]) = \int_a^b p(x)dx. \quad (1.20)$$

C. L'espérance

L'espérance d'une variable aléatoire continue X , définie sur un domaine Ω , est:

$$E[X] = \int_{\Omega} x_i p(x_i) dx_i \quad (1.21)$$

Où $p(x)$ est la fonction de densité de probabilité, ou PDF, décrivant la probabilité d'occurrence de chaque résultat de la variable aléatoire. De plus, nous pouvons exprimer l'espérance d'une fonction de variable aléatoire comme:

$$E[f(x)] = \int_{\Omega} f(x)p(x)x_i \quad (1.22)$$

D. La variance

La variance est l'écart (la différence) d'une variable aléatoire par rapport à sa moyenne. La variance d'une variable aléatoire X est définie comme:

$$V[X] = \sigma^2 = E[(X - E[X])^2] \quad (1.23)$$

En d'autres termes:

$$V[X] = \sigma^2 = E[X^2] - E[X]^2 \quad (1.24)$$

1.5.2 Intégration de Monte-Carlo

Les méthodes de Monte-Carlo peuvent générer des valeurs d'intégrale estimées directement et rapidement en évaluant le résultat d'échantillons stochastiques choisis dans le domaine d'intégration. La valeur approchée de l'intégrale est alors obtenue en faisant la moyenne des valeurs obtenues pour chaque échantillon.

Supposons que nous devons évaluer l'intégrale I d'une fonction $f(x)$ sur un domaine Ω :

$$I = \int_{\Omega} f(x)dx \quad (1.25)$$

L'approche de Monte-Carlo approche l'intégrale I en sélectionnant N échantillons aléatoires avec une certaine fonction de densité de probabilité. L'estimateur de Monte-Carlo est donné par:

$$\hat{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{p(x_i)} \quad (1.26)$$

Où \hat{I} est l'estimateur de la fonction cible et x_1, \dots, x_N sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

La précision de l'estimation obtenue dépend du nombre et de la distribution des échantillons choisis dans le domaine d'intégration : si les échantillons sont choisis de manière uniforme sur le domaine d'intégration, nous obtenons alors des estimateurs non-biaisés. Lorsque le nombre d'échantillons tend vers l'infini, l'estimation converge vers le résultat correct. Des estimateurs biaisés existent également, où la valeur attendue de l'estimateur n'est pas la bonne. Cependant, un estimateur biaisé peut converger vers la solution correcte à mesure que le nombre d'échantillons approche de l'infini. Dans ces cas, l'estimateur est considéré comme biaisé mais cohérent. Dans divers scénarios, ces types d'estimateurs sont préférés car ils sont plus simples et plus rapides à calculer. La variance σ^2 de l'estimateur de Monte-Carlo est:

$$\sigma^2[\hat{I}] = \frac{1}{N} \int_{\Omega} \left(\frac{f(x)}{p(x)} - I \right)^2 p(x) dx \quad (1.27)$$

Ce qui montre que la variance est proportionnelle à $\frac{1}{N}$. Par conséquent, l'erreur diminue à une vitesse de $O\left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)$. En d'autres termes, le nombre d'échantillons doit être augmenté de 4 pour que l'erreur soit réduite de 2.

Néanmoins la variance de l'estimateur, dépend grandement de la distribution des échantillons. Par exemple, si tout l'échantillonnage est effectué au même endroit dans le domaine, le résultat ne sera pas correct. Il existe cependant plusieurs techniques pour réduire la variance de l'estimateur de manière significative.

1.5.2.1 Méthode de transformation inverse

L'utilisation de l'intégration de Monte-Carlo nécessite de choisir des points aléatoires dans un certain domaine. Il existe diverses méthodes pour sélectionner des points aléatoires tels que les méthodes de transformation inverse, de rejet et de Metropolis [VG97]. Dans cette partie, nous décrivons la méthode de transformation inverse qui sera utilisée dans notre travail pour générer les échantillons.

Le but de cette méthode est de générer des variables aléatoires qui correspondent à une certaine PDF. Pour cela, nous devrions calculer la fonction de distribution cumulative (CDF).

De plus, nous définissons la fonction CDF pour deux types de distributions, les distributions discrètes et continues [Bab+17]. Nous définissons les fonctions CDF et PDF dans le domaine discret comme:

$$CDF(i) = \sum_{j=1}^i PDF(j) \quad (1.28)$$

Et :

$$PDF(i) = CDF(i + 1) - CDF(i) \quad (1.29)$$

Pour la distribution continue, les fonctions PDF et CDF sont décrites comme suit:

Nous appelons $p(x)$ la fonction de distribution de probabilité de la variable x , définie sur l'intervalle $[x_{min}; x_{max}]$, on peut échantillonner une variable aléatoire x qui est distribuée selon p à partir d'un ensemble de nombres aléatoires uniformes $\zeta_i \in [0; 1]$.

L'inverse est produit en deux phases:

1. Intégrer la PDF $p(x)$ pour obtenir la Fonction de Distribution Cumulative (CDF)

$$P(x) = \int_{x_{min}}^x p(x)dx \quad (1.30)$$

2. Inverse $P(x)$ en utilisant un nombre aléatoire uniforme $\zeta_i \in [a,b]$, $x_i = P^{-1}\zeta_i$.
Où P^{-1} est la fonction inverse du CDF P .

1.5.2.2 Échantillonnage stratifié

L'échantillonnage stratifié [Cox85] consiste à diviser le domaine d'intégration $D \in [0,1]$ en n régions non chevauchantes $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$. Chaque région est appelée une strate, et ils doivent complètement couvrir le domaine d'origine:

$$\cup_{i=1}^n D_i = D \quad (1.31)$$

Pour prélever des échantillons de D , nous tirerons des échantillons de chaque D_i , en fonction des densités p_i dans chaque strate. Un exemple simple est le sur-échantillonnage d'un pixel. Avec un échantillonnage stratifié, la zone autour d'un pixel est divisée en une grille $k \times k$, et un échantillon est tiré de chaque cellule de la grille. C'est mieux que de prendre des échantillons aléatoires de k^2 . Ces régions doivent couvrir complètement la zone d'origine. Dans chacun des sous-domaines, l'intégrale doit être évaluée séparément. L'estimation de Monte-Carlo est donnée par :

$$\langle I \rangle = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{v_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{f(x_j)}{p(x_j)} \quad (1.32)$$

où N_i est le nombre de sous-domaines, N_j est le nombre d'échantillons dans le sous-domaine i , et $v_i = \int_{D_i} (f(x)/p(x))p(x) dx$.

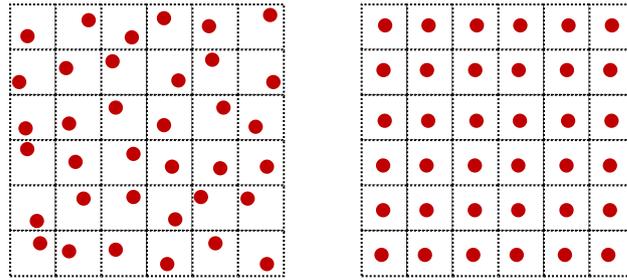


Figure 1.12: Un exemple de l'échantillonnage avec 6×6 échantillons. À gauche échantillonnage stratifié et à droite échantillonnage régulier.

1.5.2.3 Échantillonnage par importance

Comme nous l'avons déjà expliqué, les approches de Monte-Carlo souffrent d'une forte variance. Une source majeure de variance est due au choix de la fonction de densité de probabilité [OZ00]. La PDF la plus simple est la distribution de probabilité uniforme, c'est à-dire où chaque échantillon a une probabilité égale d'être sélectionné au cours de l'intégration domaine.

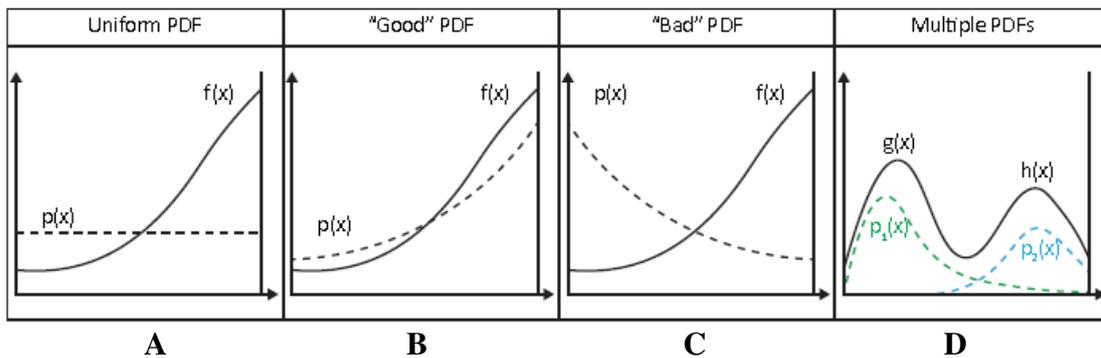


Figure 1.13: Le choix de la fonction de densité de probabilité est très important pour la réduction de la variance [Var16].

La figure 1.13 montre l'importance de la PDF pour la réduction de la variance. L'image de (A) montre la PDF la plus simple ($p(x)$), choisit des échantillons uniformément sur le domaine d'intégration, ce qui peut conduire à une grande variance. Les images (B) et (C) montrent que l'efficacité des techniques d'échantillonnage par importance dépend du choix de la PDF. Une bonne PDF doit correspondre autant que possible à la forme de f , en distribuant plus d'échantillons vers des zones où l'intégral a des valeurs élevées. L'image (C) montre comment on peut utiliser un échantillonnage préférentiel multiple dans les cas où $f(x)$ contient des pics provenant de plus d'une fonction, où les échantillons sont distribués sur la base de plus d'une PDF.

Une telle PDF peut conduire à une variance élevée si une fonction contient des pics élevés dans plusieurs régions, car une quantité énorme d'échantillons serait nécessaire pour atteindre ces zones et converger vers la valeur attendue de l'intégrale (voir à gauche de la figure 1.13). Idéalement, la PDF optimale est celle qui définit la variance à zéro.

Malheureusement, une telle PDF nécessite une connaissance de l'intégrale que nous essayons de calculer :

$$\bigcup_{i=1}^n D_i = D \quad (1.33)$$

L'échantillonnage par importance basé sur une simple PDF pourrait ne pas toujours être bénéfique. Considérons le cas où l'intégral est constituée du produit de plus d'une fonction, par exemple $\int g(x) h(x) dx$, et une seule PDF ne peut pas être facilement dérivé de celle-ci. La distribution d'échantillons basés, par exemple, sur g , entraînerait une convergence lente dans les zones où la forme de l'intégral est dominée par h , car la PDF de g donnerait une très faible contribution (image (A) de la figure 1.13).

Dans ces cas, une stratégie très puissante consiste à combiner plusieurs fonctions de distribution multiple, connues sous le nom d'échantillonnage préférentiel multiple. Dans cette technique, les échantillons sont extraits de distributions multiples et pondérés en conséquence pour chacun d'eux, ce qui entraîne une réduction significative de la variance.

1.5.2.4 Techniques d'échantillonnage combinées

Combiner différentes stratégies d'échantillonnage ensemble conduit à une meilleure approximation de l'intégrale de l'équation de rendu. Veach [Vea97] a proposé une technique d'échantillonnage préférentiel multiple (EPM) (en anglais Multiple Importance Sampling (MIS)) qui permet de combiner deux (ou plus) stratégies de rendu, afin d'obtenir un estimateur efficace avec une faible variance autant que possible. C'est une technique qui suit l'idée de diviser pour régner: au lieu d'échantillonner le produit entier, cette technique combine différentes techniques d'échantillonnage par importance avec des poids.

Dans cette partie, nous décrivons la technique d'échantillonnage préférentiel multiple et nous montrons comment nous l'appliquons dans le domaine du rendu. Veach [Vea97] a introduit une formulation qui permet d'approximer l'intégration de Monte-Carlo comme suit:

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \omega_i(x_{ij}) \frac{f(x_{ij})}{p_i(x_{ij})} \quad (1.34)$$

Où F est l'estimateur EPM, k est le nombre de stratégies (estimateurs), n est le nombre d'échantillons, $f(x_{ij})$ est la contribution du chemin de la lumière, $p_i(x_{ij})$ est la probabilité associée à l'estimateur $f(x_{ij})$ et $\omega_i(x_{ij})$ est le poids de chaque échantillon.

Les poids $\omega_i(x_{ij})$ sont utilisés pour déterminer quelle stratégie est plus robuste et efficace que les autres. La fonction de l'heuristique de la balance permet de calculer $\omega_i(x_{ij})$ comme suit:

$$\omega_i(x_{ij}) = \frac{p_i(x_{ij})}{\sum_{k=1}^m p_k(x_{ij})} \quad (1.35)$$

Où m est le nombre de stratégies.

Dans cette section, nous avons présenté quelques concepts et formules mathématiques de base qui sont utilisés efficacement pour résoudre l'équation du rendu en utilisant l'intégration de Monte-Carlo, dans le domaine de l'illumination globale. Comme nous allons le montrer dans les sections qui suivent, il existe plusieurs approches basées sur l'intégration de Monte-Carlo pour résoudre l'intégrale du transport de la lumière.

1.6 Algorithmes de l'illumination globale

Dans cette section, nous discutons des algorithmes les plus populaires pour aborder le problème du transport de la lumière. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses techniques du rendu basées sur les méthodes de Monte-Carlo sont développées. Le tracé de chemins introduit par Kajiya [Kaj86] est l'une des techniques de Monte-Carlo les plus classiques pour résoudre le problème du transport de la lumière. Les méthodes de l'illumination globale tentent soit de résoudre entièrement l'équation de rendu, en considérant tous les chemins de lumière possibles, ou des cas particuliers.

Notez que nous ne nous concentrons pas sur les méthodes interactives dans cette section, mais plutôt sur les approches originales qui ont significativement influencé le domaine de l'infographie. Les travaux antérieurs sur les méthodes interactives et en temps réel, qui font l'objet de cette thèse, sont présentés dans la section 1.7.

1.6.1 La radiosité

La méthode de radiosité est initialement introduite par Goral et al. [Gor+84]. Cette approche vise à calculer les inter-réflexions diffuses en utilisant une méthode des éléments finis: chaque surface de la scène considérée (y compris les sources de lumière) est subdivisée en patches, pour lequel l'éclairage est supposé constant. La méthode de radiosité consiste à calculer le transfert de lumière entre les patches. Le système pourrait être résolu numériquement, en utilisant l'élimination Gaussienne, l'itération de Jacobi et Gauss-Siedel [CG85] ou l'utilisation de la relaxation de Southwell [GCS94]. Même si cette méthode fournit des résultats de haute qualité, elle nécessite des surfaces finement subdivisées, d'où un temps de calcul élevé. De plus, l'utilisation d'éléments finis peut conduire à des artefacts de maillage. De nombreuses méthodes sont proposées pour la subdivision adaptative, donnant des surfaces fines dans les régions contenant des discontinuités (maillage de discontinuité), réduisant ainsi le temps du rendu au prix d'une forte consommation de mémoire.

1.6.2 Le tracé de chemins

Le tracé de chemins (en anglais path tracing) [Kaj86] est une technique de lancer de rayon (ray tracing), utilisée pour déterminer l'illumination globale d'une scène 3D. L'algorithme de path tracing a pour objectif d'intégrer (au sens de Monte-Carlo) les différents termes de l'équation du rendu : pour calculer l'éclairage direct par les sources étendues, pour évaluer

l'éclairage indirect pondéré par les BRDF, pour réaliser l'intégration sur un pixel. Sa particularité est de faire débiter l'échantillonnage uniquement depuis les pixels.

Cette technique de rendu d'images 3D consiste à lancer des rayons dans des directions aléatoires depuis de la caméra, jusqu'à ce que ces rayons atteignent une surface géométrique. À chaque impact, le rayon va rebondir une nouvelle fois, en perdant de l'énergie à chaque rebond, jusqu'à atteindre la couleur noire ou une source lumineuse. La luminosité et couleur du tout premier point d'impact sera donc une pondération de la lumière et la couleur de tous les rebonds qui ont eu lieu pour un rayon. L'intérêt de cette méthode est qu'elle n'est pas limitée dans la quantité de rebonds.

1.6.3 Le lancer de photons

Le lancer de photons [JC95] est une amélioration de lancer de rayon (ray tracing), utilisée pour déterminer l'illumination globale. Le lancer de photons consiste à envoyer des photons depuis les sources lumineuses dans des directions aléatoires. Les photons sont envoyés en nombre fini dans la scène et la puissance de la source est divisée équitablement pour chacun d'entre eux. Lorsqu'un photon rencontre une face, il est stocké dans une structure de données appelée carte de photons (en anglais, photon map) puis est relancé dans la scène de manière aléatoire en ayant perdu une partie de son énergie : celle que la face a absorbée. Il existe de nombreuses heuristiques pour la mort des photons : lorsque leur énergie restante est inférieure à un certain seuil, quand un nombre maximum de rebonds est atteint, où encore en tirant un nombre aléatoire pour savoir s'il continue à vivre. Ces traitements sont indépendants du point de vue et la création d'une image, peut ensuite être réalisée soit à l'aide d'un lancer de rayons, soit par des méthodes à base de Z-buffer.

1.6.4 Le modèle Metropolis

Le modèle Metropolis de calcul de l'illumination globale est développé par Veach et Guibas dans [VG97]. Ce modèle est basé sur la technique d'échantillonnage Metropolis [Met+53] appliquée sur les chemins optiques. Dans l'algorithme Metropolis, l'image est calculée en échantillonnant les chemins correspondant au trajet de la lumière. Ce modèle est caractérisé par les mutations qui s'appliquent aux chemins. Lors de la génération d'une série de chemins, les mutations consistent à recoller ou supprimer des sommets du chemin précédent. Ce modèle offre des avantages et apparaît efficace dans le calcul des images des scènes contenant des chemins de lumière difficiles à calculer comme des fortes illuminations indirectes construites à partir d'un nombre de chemins optiques limités. Dans ces cas, les mutations permettent un calcul non coûteux des chemins. Or ce modèle reste compliqué du côté implémentation surtout quand le nombre de chemins augmentent, nécessitant alors des précautions lors de l'application de l'algorithme.

1.6.5 La radiosité instantanée

La radiosité instantanée, introduite par Keller [Kel97], simule l'éclairage indirect diffus en remplaçant les rebonds lumineux secondaires par des lumières virtuelles (Virtual Point Lights (VPL)), comme le montre la figure 1.14.

Les VPL sont créés à l'intersection de photons émis par une source lumineuse avec la géométrie et ils encapsulent la lumière qui est réfléchiée sur les surfaces. Après leur génération, la scène est rendue normalement et les VPL sont utilisés comme feux de point réguliers. La contribution de ces sources lumineuses (indirectes) est calculée en prenant en compte l'occultation avec l'utilisation d'une technique de génération d'ombre, comme les cartes d'ombre. Les méthodes de Radiosité Instantanée souffrent généralement d'artefacts temporels lorsqu'un ensemble gérable de VPL est utilisé, en particulier dans des conditions d'éclairage dynamique.

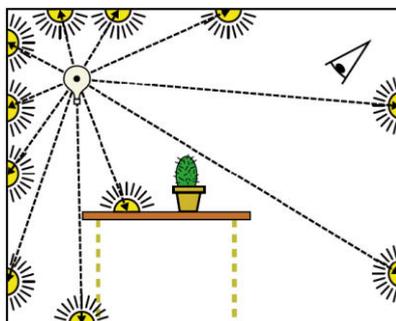


Figure 1.14: Les VPL sont distribués à l'intérieur d'une scène et créés à l'intersection avec la géométrie de la scène [Kel97].

1.7 Techniques de l'illumination globale interactive et en temps réel

Les défis techniques posés par les contraintes de temps strictes des applications en temps réel exigent que les développeurs implémentent et intègrent des algorithmes hautement efficaces avec des performances très contrôlables et limitées dans leurs applications, ce qui en fait un domaine de recherche intéressant en infographie. Les algorithmes d'illumination en temps réel doivent utiliser une série d'hypothèses et d'approximations afin d'assurer l'interactivité la plus élevée possible et la minimisation de la latence.

La simplification la plus cruciale est induite sur l'environnement où une représentation géométrique complète, c'est-à-dire une structure à base de primitive, est remplacée par les surfaces directement visibles du point de vue de la caméra dans les méthodes d'espace-écran. Cette modification est importante car elle découpe la complexité de la scène à partir de l'entrée algorithmique, rendant possible le développement d'algorithmes robustes et efficaces applicables aux environnements dynamiques avec des gains importants en termes de temps de rendu, de taille de mémoire et de bande passante.

Cette section décrit les travaux antérieurs sur les techniques d'illumination globales interactives en temps réel. Ces approches tentent de fournir des solutions efficaces,

quoique approximatives, au problème du transport de la lumière, calculées en quelques millisecondes ou en moins d'une seconde.

L'illumination interactive est un objectif insaisissable, car la résolution de l'équation du rendu même sans la présence de médias participants est intrinsèquement complexe, non seulement interactivement, mais aussi pour les moteurs du rendu hors ligne (rendu non-temps réel). De nombreux paramètres affectent à la fois la précision du résultat et les contraintes de temps: le nombre et le type de sources lumineuses, la diversité des chemins lumineux (qui dépendent de la complexité du monde virtuel et les matériaux sous-jacents) et la nécessité de soutenir de grands environnements dynamiques. Par conséquent, une solution prenant en charge des scénarios entièrement dynamiques aurait besoin d'approximer l'équation du rendu de façon continue, sans pré-calculs. En conséquence, les algorithmes interactifs font des hypothèses simplificatrices pour plusieurs des paramètres ci-dessus et visent habituellement à produire un résultat plausible au lieu d'un résultat précis.

Nous commençons notre discussion sur des solutions plus complètes pour l'illumination globale, liées à la fois au rendu en temps réel et au rendu interactif. La section 1.7.1 traite des méthodes fonctionnant dans l'espace-image, qui sont principalement basées sur l'idée de la radiosité instantanée (voir section 1.6.5). La section 1.7.2 se concentre sur la méthode empirique d'occultation ambiante. Ce travail est directement lié à la méthode discutée au chapitre 3. Cette méthode pose essentiellement la base de notre travail présenté au chapitre 5.

1.7.1 Illumination globale basée image

Les méthodes de l'illumination globale basées image (appelées aussi espace-écran) en temps réel se concentrent sur l'approximation des effets d'éclairage en fonction des informations géométriques disponibles dans le G-Buffer [ST90]. Il en résulte des techniques indépendantes de la complexité de la scène, qui peuvent être rendues très rapidement. Cependant, toutes les méthodes d'espace-écran sont sujettes aux artefacts dépendant de la vue, en raison d'informations géométriques manquantes dans les problèmes de profondeur et de sous-échantillonnage.

La carte d'ombre réfléchissante [DS05] (en anglais Reflective Shadow Map (RSM)) est une extension d'une carte d'ombre standard, où chaque pixel est considéré comme une source lumineuse indirecte. L'illumination due à ces lumières indirectes est évaluée à la volée en utilisant un échantillonnage adaptatif dans un fragment de shader. En utilisant l'interpolation espace-écran de l'éclairage indirect, nous obtenons des taux interactifs, même pour des scènes complexes. Comme nous travaillons principalement dans l'espace-écran, l'effort supplémentaire est largement indépendant de la complexité de la scène. La lumière indirecte qui en résulte est approximative, mais mène à des résultats plausibles et convient à des scènes dynamiques. Cette méthode est implémentée totalement sur le matériel graphique actuel. En général, les méthodes RSM souffrent d'une variance élevée due au grand nombre d'échantillons requis pour reproduire l'image finale et ne prennent pas en compte la visibilité indirecte.

Pour réduire le problème de visibilité indirecte, Laine et al. [Lai+07b] génère des cartes d'ombre pour chaque VPL, mais seules quelques VPL sont créées à chaque trame en exploitant la cohérence temporelle. Les VPLs des images précédentes sont conservés s'ils sont encore visibles par la source lumineuse.

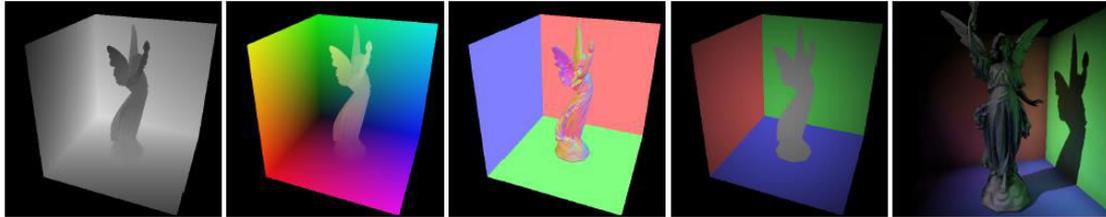


Figure 1.15: Les composants de réfective shadow map (profondeur, positions, normale, flux) [DS05].

Ritchel et al. [Rit+08] dans leur publication intitulée cartes d'ombre imparfaites (en anglais Imperfect Shadow Maps (ISM)) créent une représentation à base de point approximatif de la scène dans une étape de prétraitement et utilisent ces informations pour générer de nombreuses cartes d'ombre à basse résolution (imparfaite), afin de rapprocher la visibilité indirecte pour chaque VPL dans la scène. Cela leur permet d'utiliser des cartes d'ombre imparfaites pour les sources lumineuses virtuelles. Il n'est donc pas nécessaire de mettre en cache les cartes d'ombre comme proposé par Laine et al. L'idée de base derrière les cartes d'ombre imparfaite est d'utiliser une représentation différente de la géométrie de la scène pour permettre un rendu plus rapide des cartes d'ombre. Cela peut être réalisé en utilisant un nuage de points pour toute la scène au lieu de polygones. Avec cette approche, la représentation de la scène n'est pas parfaite, mais il suffit de produire des cartes d'ombre imparfaite pour le calcul de l'illumination indirecte.

Leur approche est en mesure de rapprocher la visibilité indirecte à des taux interactifs, mais la représentation à base de points peut manquer de visibilité indirecte de la géométrie à grains fins.

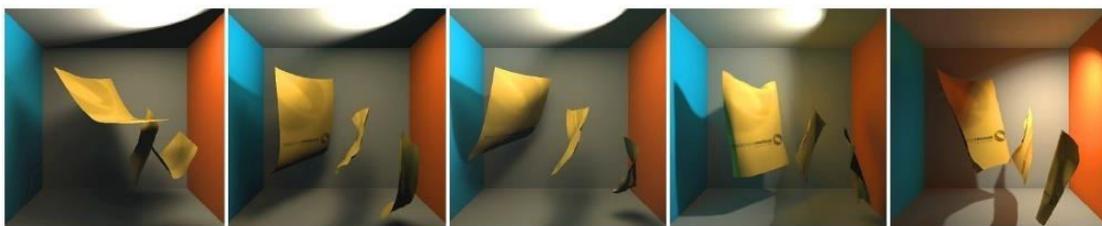


Figure 1.16 : Une scène illuminée à l'aide d'Imperfect shadow maps. Sauf le spot lumineux en haut à droite, tous les autres illuminations et l'ombre est indirect (un rebond) [Rit+08].

McGuire et al.[ML09] introduisent le placage de photons de l'espace image (en anglais Image Space Photon Mapping) où la rasterisation GPU est utilisée pour le rebond de la lumière primaire et le processeur est utilisé pour les rebonds de photons restants, en utilisant le lancer de rayons traditionnel. Au lieu d'effectuer la collecte pour calculer

l'éclairage indirect final, les photons sont éclaboussés dans l'espace-écran en utilisant le GPU.

Ritschel et al. [RGS09] proposent l'occultation directionnelle de l'espace-écran (en anglais Screen-Space Directional Occlusion (SSDO)) qui calcule l'occultation directionnelle du champ proche et l'illumination indirecte en générant des échantillons dans un hémisphère au-dessus du point ombré et en les testant par rapport au tampon de profondeur de la caméra. La direction de chaque échantillon visible contribue à l'illumination directe, tandis que les échantillons bloqués sont projetés sur le tampon de profondeur et la contribution des échantillons ponctuels correspondants du tampon d'éclairage direct sont estimée. En raison de sa dépendance à un seul contrôle de profondeur par échantillon, cette technique ne peut garantir la visibilité de l'échantillon projeté, en particulier pour les grands rayons.

Nalbach et al. [NRS14] proposent une approche de l'espace-écran profond (en anglais Deep Screen Space.) pour surmonter les inconvénients des méthodes d'illumination de l'espace image à une seule couche. Au lieu d'approximer la scène en utilisant le tampon de profondeur afin de résoudre la visibilité et d'effectuer des calculs d'illumination, ils l'approximent en utilisant un nuage de point (appelé surfel) dépendant de la vue du maillage triangulaire en utilisant l'étape de la tessellation du GPU. Chaque surfel est créé de sorte que son rayon soit le même dans l'espace de l'écran indépendamment de la position et de l'orientation de l'espace dans le monde. Les surfels sont ensuite éclaboussés à une texture de tableau de différents niveaux de résolution, de sorte que les pixels qui sont situés à proximité d'un surfel utilisent l'image en pleine résolution, tandis que les pixels distants utilisent leurs versions sous-échantillonnées. Leur technique est capable d'atteindre des taux interactifs et elle est démontrée dans l'occultation ambiante, l'illumination indirecte diffuse et brillante à simple rebond, l'occultation directionnelle et la diffusion sous la surface.

1.7.2 Problèmes d'illumination globale en temps réel

Une autre simplification importante est effectuée sur les opérations algorithmiques, par exemple, l'équation de rendu. La pratique la plus courante consiste à calculer séparément l'illumination directe et indirecte, car les effets directs peuvent être calculés très efficacement dans le pipeline de rasterisation. La partie indirecte, cependant, est coûteuse en calcul même pour des applications en temps non réel et, historiquement, elle est remplacée par un terme ambiant constant. Au cours des dernières années, de nombreuses techniques d'éclairage sont proposées qui sont capables d'obtenir des résultats suffisamment convaincants pour le rendu en temps réel. Bien qu'elles soient très diverses dans leur fonctionnement, les simplifications imposées à l'équation du rendu sont généralement similaires: la fonction de distribution de diffusion générique est remplacée par la modélisation des distributions spécifiques idéalement surfaces diffuses ou brillant, le nombre de trajets lumineux est limité à un ou deux, les médias participants sont souvent omis et, finalement, l'occultation entre les chemins de lumière indirectes est approximée ou entièrement ignorée. Des méthodes empiriques sont également utilisées, telles que l'occultation ambiante et l'occultation ambiante dans l'espace-écran. Les nombreuses

façons dont l'équation du rendu est approximée et une catégorisation approfondie des techniques proposées dans la littérature sont discutées dans le chapitre 3.

Il devient évident que les algorithmes d'illumination peuvent poser des problèmes très intéressants dans le domaine du rendu en temps réel dans un domaine de recherche passionnant. Dans cette thèse, nous nous concentrons sur les approches les plus populaires, l'occultation ambiante dans l'espace-écran, que nous décrivons dans le chapitre 3.

1.7.3 L'occultation ambiante

L'occultation Ambiante (OA) est souvent utilisée comme une approximation de l'illumination globale [Lan02]. Plus spécifiquement, elle est utilisée comme une approximation de l'ombre de la lumière indirecte. L'occultation ambiante est grossièrement définie comme la quantité de la géométrie à proximité est obstrue un point. Il est un scalaire compris entre zéro et un qui ne dépend que de la géométrie, et non sur toutes les sources lumineuses. La valeur de l'occultation ambiante peut ensuite être utilisée à l'échelle de l'éclairage, par exemple le terme ambiant constant dans le modèle d'éclairage de phong. Le résultat est des ombres de proximité entre les objets qui sont proches les uns des autres, et les coins et les crevasses qui sont plus sombres, qui peuvent être interprétés comme ces points obtenant moins de lumière indirecte ou comme des ombres provenant de sources de lumière surfacique.

En réalité, la lumière, y compris la lumière indirecte, vient habituellement plus de certaines directions spécifiques, quelque chose qui n'est pas prise en compte par l'occultation ambiante. Une situation d'éclairage du monde réel qui a un aspect similaire aux résultats de l'occultation ambiante est celle d'un temps couvert ou nuageux. La figure 1.17 montre une image rendue avec l'occultation ambiante.



Figure 1.17: Occultation ambiante [Lan02].

La méthode de calcul de l'occultation ambiante est coûteuse en termes de puissance de traitement et n'est pas adaptée à une exécution en temps réel dans une application

interactive. Une façon de gérer cela est de pré-calculer l'occultation ambiante et de la stocker par sommet d'un modèle ou dans des cartes d'occultation ambiantes. Bien sûr, cela ne fonctionne que pour les modèles statiques. Si l'occultation ambiante des objets dynamiques doit être prise en compte et que l'occultation ambiante des caractères animés est correctement traitée, une autre méthode doit être utilisée [Lan02].

1.7.4 Bilan

Dans cette partie du chapitre nous allons présenter un bilan des travaux sur les techniques d'illumination globale interactive et en temps réel présentés plus haut selon leurs caractéristiques, telles que l'espace utilisé pour le calcul, l'utilisation des VPLs utilisé pendant d'étape de rendu, ainsi que leurs qualités. Nous allons aussi cités leurs avantages et les inconvénients.

Table 1.2: Comparaison entre les techniques d'illumination globale interactive et en temps réel.

Technique	Espace	VPLs	Avantages	Inconvénients
La carte d'ombre réfléchissante (RSM)	Image	Oui	Un rebond et géométrie lumière dynamique.	Pas d'occultation pour source indirecte.
Cartes d'ombre imparfaites (ISM)	Image	Oui	Obtenir des performances en temps réel.	Cartes d'ombre à résolution plus élevée.
Occultation directionnelle de l'espace-écran	Image	Oui	Un rebond et géométrie lumière dynamique.	Cartes d'ombre à résolution plus élevée.
Occultation Ambiante	Objet	Non	Fonctionne même quand on n'a pas la lumière dans la scène. Les ombres lisses sont ajoutées à l'image.	Prend beaucoup de temps de calcul dans les scènes complexes. On l'applique juste dans des environnements diffus.

1.8 Conclusion

Ce chapitre nous a donc permis d'exposer les notions fondamentales de l'illumination globale en commençant tout d'abord par la définition de l'élément-clé de ce domaine: grandeurs géométriques et les grandeurs radiométriques, suivie par quelques concepts de la propagation de la lumière très utilisés dans cette thèse. Nous avons ensuite présenté l'équation du rendu de Kajiya dans le domaine de la direction, dans domaine de la surface

que nous utilisons dans notre travail. Il est difficile de résoudre l'équation du rendu par les méthodes analytiques, pour cette raison, plusieurs méthodes sont développées pour simplifier la résolution de l'équation de rendu. La plupart des méthodes utilisées aujourd'hui pour résoudre l'équation du rendu sont des méthodes de Monte-Carlo basées sur un échantillonnage probabiliste.

Les techniques d'illumination globale interactive et en temps réel ont pour objectif d'ajouter un effet réaliste aux scènes 3D. Parmi ces techniques, nous nous sommes intéressés à l'occultation ambiante et principalement à la méthode d'OA dans l'espace écran que nous verrons en détail dans le chapitre 3 de cette thèse. Ce choix est dû à la simplicité, à la rapidité du calcul, prend en compte les scènes dynamiques, et ajoute un niveau de réalisme supplémentaire aux scènes rendues en synthèse d'images. Dans le chapitre suivant, nous décrirons en détail les notions des ombres et particulièrement les ombres douces en temps réel qui jouent un rôle critique à l'amélioration de la qualité du rendu.

Chapitre 2

Les ombres

2.1 Introduction

Les ombres sont importantes dans les scènes en trois dimensions, car elles contribuent grandement à la fois au réalisme et à la perception de la scène. Le rendu d'ombre est un domaine de recherche prolifique en infographie en temps réel. Cependant, il s'agit toujours d'un sujet de recherche ouvert, car la complexité de la simulation d'ombres physiquement réalistes est une tâche complexe pour les applications en temps réel, telles que les jeux.

Dans ce chapitre, nous définissons le concept des ombres et en particulier le concept des ombres douces en temps réel utilisé lors du processus de rendu. Nous présentons dans la section 2.2 des généralités sur les ombres, puis nous exposons ensuite dans la section 2.3 une classification des techniques de génération des ombres qui nous permet de distinguer entre ombre douce et ombre dur, et entre ombre direct et ombre indirect qui sont très importants dans notre travail. En outre, nous voyons dans la section 2.4 les méthodes existantes qui utilisent les ombres en temps réel dans le domaine de l'illumination locale. Finalement, nous terminons ce chapitre par une étude détaillée du concept d'ombre douce en rendu temps réel qui est l'objectif de ce chapitre.

2.2 Généralités sur les ombres

La présence des ombres dans une image fournit des informations essentielles pour la compréhension d'une scène et notamment sur la position relative des objets entre eux et des sources lumineuses.

Un vieux dicton nous dit qu'il n'y a pas de lumière sans ombre, et bien que ce soit à l'origine une métaphore, c'est parfaitement vrai: sans lumière, tout est sombre et certainement pas très excitant; mais dès qu'il y a une source de lumière, il y a aussi des ombres portées. D'une part, les ombres sont importantes pour la compréhension des scènes. Nous comprenons mieux les relations spatiales entre objets et réussissons mieux à les localiser dans l'espace. De plus, nous pouvons déduire des informations de forme, non

seulement des éléments d'ombre projeté, mais aussi du récepteur, en interprétant des déformations d'ombre.

Les ombres sont aussi un moyen artistique. Beaucoup d'applications interactives exploitent les ombres pour illustrer la présence d'un objet sans révéler son apparence réelle. La figure 2.1 montre un exemple où les ombres sont utilisées de cette manière. Bien que nous ne puissions pas voir directement les objets, leurs ombres complètent la compréhension de la scène.



Figure 2.1: Même les objets en dehors de la vue peuvent projeter des ombres visibles qui peuvent nous aider à établir une compréhension plus complète de la scène.

Par conséquent, les ombres sont naturellement un élément crucial de la synthèse d'images et restent un défi particulier pour les graphiques en temps réel, bien qu'elles soient conceptuellement relativement simples à calculer, les méthodes naïves sont généralement extrêmement coûteuses. Ce n'est que via des représentations de scène alternative et des algorithmes adaptés au GPU que l'on peut atteindre les performances nécessaires pour répondre aux besoins actuels. Par conséquent, le sujet a suscité de nombreuses publications scientifiques au cours des dernières années, et le domaine des algorithmes d'ombre présente aujourd'hui une variété jamais vue auparavant. Malgré cette richesse de publications, aucun algorithme ne serait actuellement convaincant et satisfaisant [Eis+11].

2.2.1 Importance des ombres

Les ombres sont étudiées depuis bien longtemps, les premières caractérisations écrites se trouvent dans le Codex Urbinas de Léonard de Vinci de 1490. En fait, ceci n'est pas surprenant puisque les ombres portées sont indispensables à la compréhension d'une image. En effet, elles apportent plusieurs informations :

- l'existence d'un objet qui n'est pas visible dans l'image (voir figure 2.1).
- la position (voir figure 2.2) ;
- la forme de l'objet (voir figure 2.3) ;
- la forme de la surface recevant l'ombre (voir figure 2.4) ;
- la révélation de l'existence d'autres objets cachés par des objets dans la scène (voir figure 2.5) ;

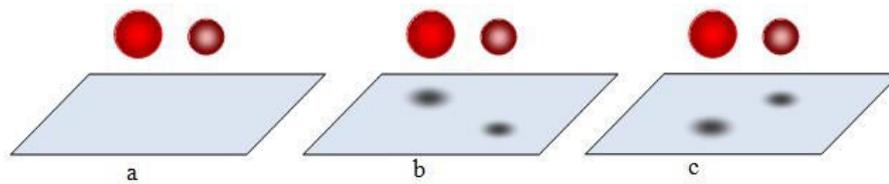


Figure 2.2: L'importance des ombres pour la compréhension d'une scène. (a) Scène sans ombre, laquelle des deux sphères est la plus proche? Celle de droite (b) ou celle de gauche (c).



Figure 2.3: L'ombre apporte une information sur la géométrie cachée. De gauche à droite, nous pouvons remarquer, grâce aux ombres portées, que le robot tient un anneau, tient la "théière" ou ne tient rien dans sa main gauche [Has+03].

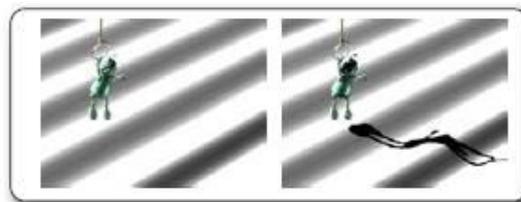


Figure 2.4: L'ombre portée permet de mieux comprendre la forme du sol [Has+03].



Figure 2.5: L'ombre permet de révéler la présence d'autres objets.

2.2.2 Qu'est-ce qu'une ombre ?

Une ombre se définit comme l'obscurité que cause un corps opaque en interceptant la lumière. Elle est une conséquence particulière de l'illumination dans une scène. Les ombres font partie intégrante de notre environnement et sont présentes dans beaucoup de scènes naturelles, une fois qu'une source de lumière est prédominante par rapport à la

lumière ambiante. Elles sont le résultat d'une interaction entre une composante géométrique et une composante photométrique [Pin02]. Les ombres ont toutes la même origine, une obstruction par un objet d'une source de lumière. Il existe cependant autour de nous une multitude d'ombres différentes, tant par leurs formes que par leurs couleurs. Il est alors nécessaire de définir quelques caractéristiques communes de ces ombres afin de mieux les maîtriser. Les ombres dans l'infographie sont le résultat de l'interaction entre trois composants: sources lumineuses, récepteurs d'ombre et un occultant. Les ombres se classent tout d'abord en trois catégories bien distinctes (figure 2.6) :

- **Les ombres propres** sont les parties des objets non éclairées par une source lumineuse. Si un objet projette une ombre sur lui-même, il produit de l'ombre propre (self-shadowing);
- **les ombres portées** sur une surface sont le résultat de l'obstruction de la lumière par un objet ;
- **La pénombre** se situe à la périphérie des ombres portées, quand un point n'est éclairé que par une partie de la source lumineuse. Elle constitue la transition entre une zone éclairée et une ombre.

Une source lumineuse est un objet qui modélise une source de lumière primaire, c.-à-d., une certaine entité physique qui produit la lumière. Les sources lumineuses dans le monde réel émettent les particules énergiques (photons) qui voyagent à travers l'espace et peuvent rencontrer des obstacles physiques. Selon la surface de l'obstacle, elles sont absorbées ou réfléchies. Les objets qui bloquent partiellement ou complètement des photons d'atteindre un récepteur d'ombre s'appellent les occultants ou bloqueurs de lumière (en anglais Shadow Casters), puisqu'ils projettent des ombres sur les récepteurs d'ombre [Has+03].

Toutes les sources lumineuses du monde réel sont des sources lumineuses étendues (figure 2.9 (b)), ainsi il signifie qu'elles ont une ampleur physique. Dans l'infographie, cependant, les sources lumineuses ponctuelles (figure 2.9 (a)) sont employées souvent pour rapprocher des sources lumineuses étendues. Elles n'ont aucune aire physique mais peuvent être décrites mathématiquement comme singularité (un point dans l'espace) [Has+03].

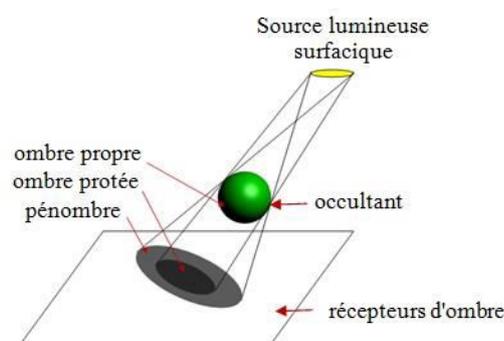


Figure 2.6 : Différentes ombres présentes dans une scène [Mig04].

2.3 Classification des ombres

Au regard des ombres, les méthodes de rendu en synthèse d'images se divisent en deux catégories :

- celles qui résolvent (ou approximent) l'équation de l'illumination globale. Dans ce cas, les ombres font naturellement partie de la solution trouvée.
- celles qui, par souci de performance, effectuent une résolution locale et ne gèrent que les éclairages directs ou les trajets des rayons (potentiellement) les plus énergétiques. Dans ce cas, il devient nécessaire de traiter explicitement le calcul des ombres (Z-buffer, lancé de rayons élémentaires).



(a) Variétés des ombres.

(b) Ombres indirectes.

Figure 2.7 : Exemples d'ombres réalistes obtenues avec une méthode de l'illumination globale. Figure (b) : les ombres sous la sphère sont engendrées par l'éclairage indirect (issues des interactions entre objets) [Mig04].

On peut donc commencer à classer les différents types d'ombres :

- les ombres directes sont les zones sombres résultantes de l'occultation directe d'une source de lumière par un objet.
- les ombres indirectes sont les zones sombres résultantes de l'occultation de rayonnements indirects par un objet (figure 2.7 (b)).

Dans les deux cas, la disparition de l'objet occultant doit également faire disparaître l'ombre qui y est associée.

Le phénomène d'occultation peut prendre également deux formes :

- soit l'objet est opaque, les rayons touchant l'objet sont déviés par sa surface.
- soit l'objet est transparent, et dans ce cas, les rayons subissent soit une absorption partielle (diminuant ainsi leurs intensités), soit une focalisation (en concentrant les rayons dans une région au sortir de l'objet), soit les deux.

On n'oubliera pas le cas des objets non convexes qui peuvent engendrer des auto-ombrages (ombres créées par une partie de l'objet sur une autre partie du même objet).

Par ailleurs, pour les ombres directes, on peut encore différencier deux types d'ombres (figure 2.9) :

- les ombres dures (*hard-shadow*) : Le concept d'ombres dures engendrées par une source de lumière ponctuelle est souvent vu comme un concept binaire, i.e., un point est dans l'ombre ou il ne l'est pas. Ceci correspond à des ombres dures, comme celles produites par une lumière ponctuelle ou directionnelle. En effet, une lumière ponctuelle ne peut être que visible ou cachée d'un point receveur. Il est par contre à noter que les lumières ponctuelles n'existent pas dans le monde réel et donc que les ombres dures donnent une apparence synthétique aux images [Amo04].
- les ombres douces (*soft-shadow*) engendrées par les sources étendues. On a alors trois cas : la source est totalement visible (zone éclairée), la source est partiellement visible (zone de pénombre), la source est complètement occultée (zone d'ombre portée). Voir aussi la (figure 2.10) pour comprendre la dépendance entre la taille de la source et l'étendue de la pénombre (plus la taille de la source lumineuse est importante, plus la largeur de la zone de transition est grande). Dans le cas plus réaliste d'une lumière surfacique, un point sur un receveur pourrait ne voir qu'une fraction de la lumière. C'est ici que se fait la distinction entre la zone complètement éclairée, la pénombre et la zone d'ombre. Le calcul exact de ces zones est particulièrement difficile (et donc habituellement plus long), mais les ombres douces donnent des images beaucoup plus près de la réalité [Amo04] (figure 2.8 à droite).

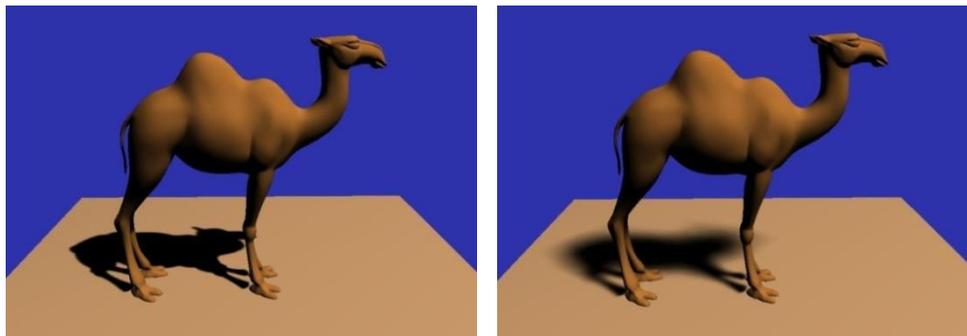


Figure 2.8 : Ombre dure vs. Ombre douce. L'image de gauche est le résultat de l'éclairage par une source ponctuelle, l'ombre est donc dure. L'ombre de droite est engendrée par une source surfacique, donc l'ombre est douce.

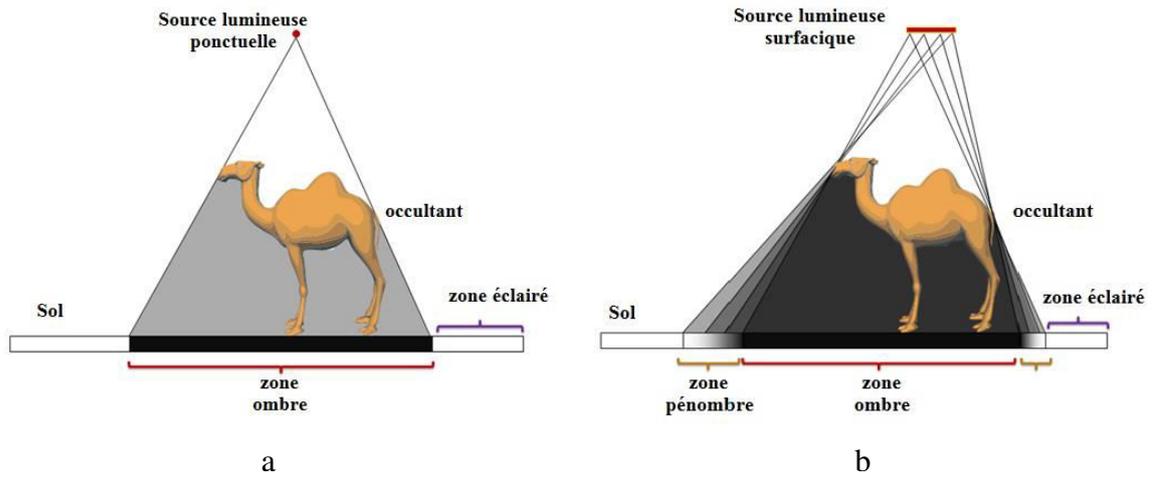


Figure 2.9 : Ombres directes générées en fonction du type de la source. (a) Ombre dur créée par une source ponctuelle, (b) ombre douce créée par une source étendue.

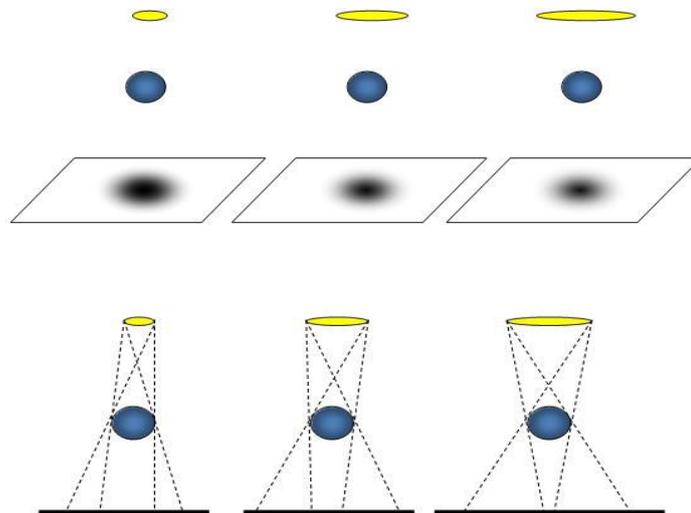


Figure 2.10 : Comportement de la pénombre en fonction de la taille de la source. En gris clair, la zone de pénombre. En gris foncé, la zone d'ombre [Eis+11].

2.4 Ombres en temps réel

Dans cette section, nous nous intéressons aux méthodes d'ombre directe en rendu temps réel. Au cours des vingt dernières années, des progrès significatifs sont accomplis dans le domaine de l'infographie, particulièrement dans le rendu en temps réel. La recherche des nouvelles méthodes pour le rendu des jeux vidéo, environnements virtuels et applications graphiques interactives plus réalistes, a vu un essor récent de travaux portant sur la génération d'ombres en temps réel [Ber86; WPF90; Kil01; Has+03; AAM04; AW04; CD04; Loy+04; Ste06; Sch+09]. Une étude bien détaillée sur les ombres en temps réel est publiée dans le livre intitulé "Real-Time Shadows" [ESA+01]. Le calcul d'ombre douce dans une application d'infographie est une tâche très coûteuse en temps de calcul, elle peut prendre plusieurs millisecondes jusqu'à plusieurs minutes ou même heures. Cela

dépend de la méthode de rendu, l'algorithme d'ombre utilisé, le matériel disponible, la qualité de l'ombre, et la complexité de la scène. Le matériel d'aujourd'hui est capable de rendre diverses techniques de génération d'ombres en temps réel [Sch+09]. L'ombre en temps réel est un vrai défi en infographie, et il n'y a aucune solution générale qui peut être appliquée sur n'importe quelle scène.

Les méthodes de l'illumination globale pour générer les ombres telles que: le tracé de chemins et la radiosité ne sont pas adaptés au temps réel. Par contre, les méthodes pour générer les ombres comme la shadow mapping (basée image) et le volume d'ombre (basé objet) sont bien adaptés au temps réel.

Les techniques de calcul d'ombres peuvent être, dans la majorité des cas, regroupées en plusieurs catégories : les techniques traditionnelles [Bli88; FE99; PWG79; AHH08; Tha89], les techniques basées sur le lancer de rayons [Whi80], les techniques de l'illumination globale [CW93; JC95], les techniques basées sur les tampons de profondeur (*depth buffers* ou *shadow maps*) [Wil78; Seg+92; Fer+01] et finalement, celles basées sur les volumes d'ombre [Cro77].

2.4.1 Espace objet et espace image

L'espace objet est l'espace de description mathématique (ou repère) associé au modèle géométrique de l'objet dans lequel chaque point est représenté par un triplet de coordonnées. Cet espace correspond au monde virtuel dans lequel se situe l'objet. Les objets y sont décrits avec une précision maximale. À l'opposé, l'espace image est associé à la projection des objets sur le plan image. Cet espace ne correspond qu'à une représentation partielle de l'objet en fonction de la définition de l'écran.

2.4.2 Le volume d'ombre

Une façon intuitive de penser aux ombres est purement géométrique. Cette approche est d'abord décrite par Crow en 1977 [Cro77] et ensuite implantée à l'aide de matériels graphiques par Heidmann en 1991 [Hei91].

L'algorithme consiste d'abord à trouver les silhouettes des bloqueurs (du point de vue de la lumière), puis à faire une extrusion des silhouettes le long de la direction de la lumière, créant ainsi les volumes d'ombre (voir figure 2.11). Les objets se trouvant à l'intérieur d'au moins un volume d'ombre sont dans l'ombre, ceux à l'extérieur sont illuminés.

Les volumes d'ombre sont calculés comme suit :

- La première étape consiste à trouver la silhouette des bloqueurs, vue de la lumière. La façon la plus simple est d'identifier les segments partagés par un polygone face à la lumière et un autre dans la direction opposée.
- Nous construisons ensuite les polygones d'ombre en faisant l'extrusion de chaque segment de silhouette le long de la direction depuis la lumière, formant ainsi un long polygone (quadrilatère) d'ombre. Toutes ces extrusions définissent un volume, et savent si un point est dans l'ombre revient à savoir si ce point est dans le volume.
- Pour chaque pixel de l'image, nous comptons le nombre de polygones d'ombre traversés du plan image jusqu'à l'objet à rendre. Les polygones d'ombre faisant

face à la caméra incrémentent le compteur, les autres le décrémentent. Si le compteur est positif à la toute fin, le point est dans l'ombre (voir figure 2.11).

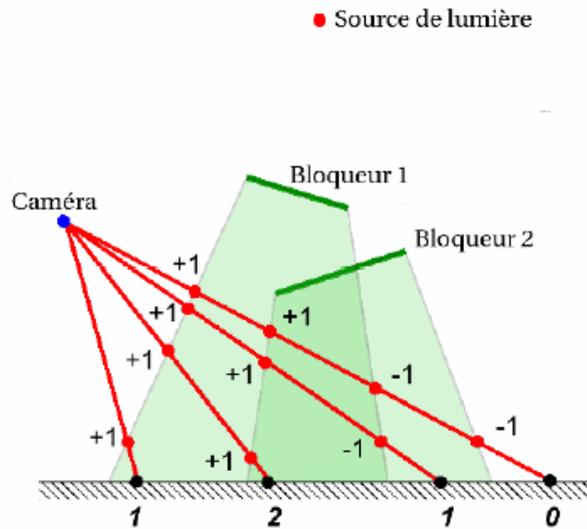


Figure 2.11: Illustration en 2D des volumes d'ombre [Has+03].

2.4.3 Shadow Mapping : (placage d'ombre)

La méthode de shadow mapping est la seconde méthode de génération d'ombres en temps réel, avec les volumes d'ombres. Toutefois l'approche est complètement différente, puisque basée sur l'image et non sur la géométrie. Le principe est le suivant : on effectue un rendu de la profondeur de la scène du point de vue de la source lumineuse, puis on utilise ce rendu pour déterminer si un point vu de la caméra est dans la zone d'ombre ou non.

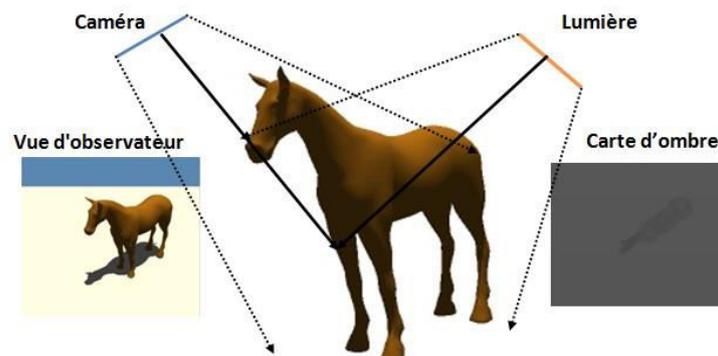


Figure 2.12 : Principe de l'algorithme de base de shadow mapping. À gauche, vue de la caméra. À droite, tampon de profondeur vue de la lumière, encodé en niveaux de gris.

Le calcul d'ombre consiste à identifier les parties de la scène qui sont cachées de la source de lumière. Cela revient donc intrinsèquement à un calcul de visibilité selon le point de vue de la lumière. La technique de shadow mapping [Wil78] exploite ce parallèle.

L'algorithme de shadow mapping se fait en deux passes du rendu :

1. Premièrement, la scène est rendue du point de vue de la source de lumière. Les valeurs contenues dans le z-buffer sont alors sauvegardées, elles forment le tampon de profondeur des ombres appelé aussi la carte d'ombre (en anglais shadow map) (voir figure 2.12).
2. Ensuite, un rendu de la scène est fait du point de vue de la caméra, en utilisant la carte d'ombre pour déterminer les parties éclairées ou les parties dans l'ombre. Pour déterminer si un point est dans l'ombre, on le projette dans la carte d'ombre de la lumière et on compare la profondeur résultante de cette projection à la profondeur contenue dans la carte d'ombre. Si la profondeur de la carte d'ombre est plus petite, le point est dans l'ombre, sinon il est éclairé (voir figure 2.13).

Les avantages de cette technique: tout d'abord il s'agit d'un algorithme basé image qui reste donc relativement indépendant du nombre de polygones dans la scène, contrairement aux volumes d'ombres qui doivent effectuer un calcul de détermination de la silhouette qui doit être ensuite extrudée, sans compter les multiples passes d'initialisation du stencil buffer. Le deuxième atout concerne les textures alpha, ces textures contenant une transparence utilisée notamment pour reproduire des feuillages ou des grillages qui seraient trop coûteux à reproduire avec une véritable géométrie. Les volumes d'ombre travaillant au niveau du polygone ne gèrent pas les textures alpha à l'inverse des Shadows Mapping qui travaillent au niveau du pixel.

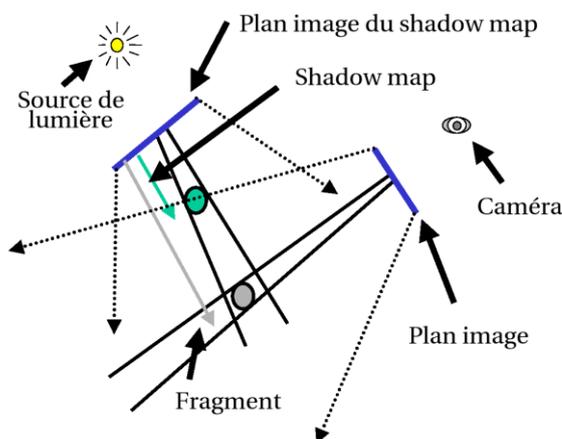


Figure 2.13 : Diagramme illustrant l'algorithme de shadow mapping [Kil02].

Le problème majeur de l'algorithme est la possibilité qu'un aliassage très visible apparaisse au niveau des contours des ombres (voir l'image de gauche de la figure 2.16). Plusieurs techniques sont donc proposées pour atténuer ce problème. Comme cet aliassage ne sera présent qu'aux frontières de l'ombre, un réflexe intuitif serait de filtrer le résultat de la carte d'ombre, de façon à masquer l'aliassage. Reeves et al. proposent un algorithme de filtrage appelé le Percentage Closer Filtering (PCF) [RSC87], qui effectue le test de profondeur Z sur plusieurs pixels voisins de la shadow map, de façon à obtenir des tons de gris aux frontières de l'ombre. Le PCF diminue beaucoup l'aliassage, mais pour des tailles

de filtre assez coûteuses. Le matériel graphique moderne implante une version simplifiée de cet algorithme, sous la forme de filtrage bilinéaire des textures de profondeur.

Le Percentage Closer Filtering est une technique de filtrage qui présente une solution pour le problème d'aliasing causé par les algorithmes de calcul d'ombre en utilisant les cartes d'ombre. Cet algorithme représenté est une technique d'anti-aliasing et offre des ombres douces qui ressemblent aux zones des pénombres.

Le PCF est un mode de filtrage particulier, car tout simplement parce qu'il ne fonctionne pas de la même façon que les autres filtres : au lieu de retourner une couleur, un PCF retourne en fait le résultat de la comparaison entre la coordonnée Z du fragment et le texel qu'elle contient aux coordonnées X et Y du fragment: 0 si le fragment est dans l'ombre et 1 s'il est éclairé. Et c'est la raison pour laquelle un filtrage classique ne fonctionne pas. Le filtrage bilinéaire traditionnellement utilisé par les cartes 3D échantillonne une texture en un point et comme il n'y a pratiquement aucune chance que le pixel corresponde exactement à un texel, le chip effectue un mélange pondéré des 4 texels les plus proches du point d'échantillonnage. Dans le cas d'une image, cet algorithme fonctionne plutôt bien, dans le cas d'une texture contenant des valeurs de profondeur le résultat est catastrophique car il génère des valeurs de profondeur qui n'existent pas et peuvent fausser le résultat de la comparaison. Examinons ce qui se passe avec un exemple:

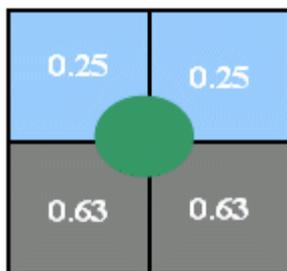


Figure 2.14 : Exemple des valeurs de profondeur d'une image [Kil02].

Dans ce cas le résultat obtenu est : 0.44. Si la valeur Z du fragment est 0.57 le fragment se retrouve complètement dans l'ombre ($0.57 > 0.44$) alors qu'en réalité la valeur 0.44 n'existe pas en tant que telle dans la Shadow Map et que le fragment se situe dans une zone où, justement, il est à moitié dans l'ombre : le résultat du test n'est pas tranché.

Le PCF est une forme plus évoluée de filtrage dans le cas des shadows map. Plutôt que d'effectuer le filtrage avant d'effectuer la comparaison, le PCF consiste à effectuer la comparaison pour chacun des 4 texels et ensuite retourner la moyenne du résultat des comparaisons. Dans l'exemple précédent la comparaison donnerait 0 pour les deux texels du haut et 1 pour les deux texels du bas la valeur retournée serait donc 0.5. Le fragment est donc à 50% dans l'ombre. On peut ainsi générer une forme d'ombres douces : au lieu de moduler la couleur du fragment par 0 ou 1 on dispose ainsi de toute une gamme de valeurs permettant d'éviter les contours d'ombres trop tranchés.

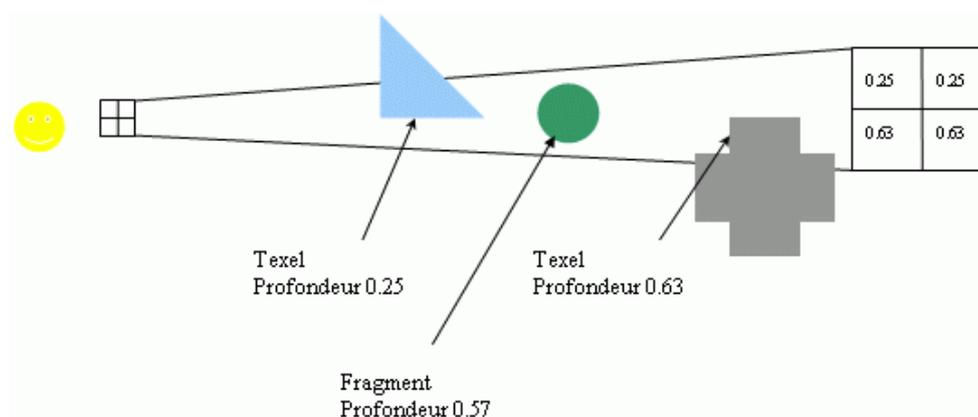


Figure 2.15: Exemple de l'utilisation du PCF [Kil02].

Dans cet exemple le fragment a une profondeur de 0.57. Il est dans l'ombre relativement à deux texels de la carte d'ombre, et éclairé relativement aux deux autres. Au lieu de choisir une des deux options qui sera à moitié fausse, et comme on ne peut pas couper un fragment en deux, on détermine le pourcentage d'ombre dans lequel se trouve le fragment, dans ce cas 50% (la moitié du fragment est dans l'ombre, l'autre éclairée).



Figure 2.16: Image sans filtre PCF (à gauche), image avec filtre PCF (à droite).

2.4.4 Bilan

Nous présentons dans ce qui suit une synthèse des travaux présentés entre la technique de shadow mapping et la technique du volume d'ombre dans cette partie, en mentionnant leurs catégories communes, les points forts de chacune, les nouveautés introduites par chaque type, ainsi que leurs avantages et leurs limites (Tableau 2.1).

L'utilisation des shadows mapping ou des volumes d'ombre aboutissent à la génération d'ombres en temps réel, bien que les volumes d'ombre exigent des modèles polygonaux fermés et convexes, et que la scène doit être bien modélisée préalablement, par contre les shadows mapping fonctionnent toujours avec n'importe quelle géométrie. Par conséquent, les shadows mapping sont plus exigées et plus utilisées dans les applications interactives. Les avantages de shadow mapping sont de pouvoir facilement générer des ombres douces, et de tenir compte de l'alpha des textures qui est impossible à ombrer avec le volume d'ombre.

Inconvénients	Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> - Requier le calcul de la silhouette des bloqueurs. - Temps de calcul dépend de la complexité des occultants (calcul de la silhouette, extrusion). - Création de gros polygones (extrusion) - Deux rendus de la scène, plus rendu du volume. - L'exigence des modèles polygonales fermés, formés et convexes (Scènes bien modélisées préférables). - Ne tien pas en compte de l'alpha des textures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Génération et rendu interactif pour des scènes dynamiques. - Traite les sources omnidirectionnelles. - Plus grande précision des ombres. - Traite les cas d'auto ombrage). - Ombres précises. - Positions quelconques lumière / caméra. - Robuste si bien programmé. 	Volume d'ombre
<ul style="list-style-type: none"> - Problème d'aliasing. - Ne traite pas les sources omnidirectionnelles (angle de la source limitée). - Au moins 2 passes sont nécessaires pour le rendu. - Ne pas régénérer systématiquement la shadow map, seulement si la source se déplace. - Besoin d'extensions OpenGL . - Problèmes d'échantillonnage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Implémentation entièrement avec le hardware graphique. - Création de la shadow map relativement rapide. - Traite la plupart des cas d'auto - ombrage (self-shadowing). - Très simple à implémenter, - Fonctionne toujours (scène quelconque). - Prix indépendant de la complexité de la scène. - Nombreuses variantes pour améliorer la qualité. - Tien en compte de l'alpha des textures. 	Shadow mapping

Tableau 2.1: Synthèse sur les techniques de shadow mapping et volume d'ombre.

2.5 Les ombres douces

Produire des ombres douces est un sujet traité depuis longtemps en synthèse d'images. Par contre, le fait d'ajouter la contrainte temps réel est relativement récent. Cette effervescence est en fait directement liée aux possibilités de programmation des cartes graphiques de dernière génération.

Un état de l'art est présenté sur les ombres douces temps réel lors de la conférence Eurographics en 2003 [Has+03]. Cette présentation est complétée par les publications

présentées à cette même conférence pour donner lieu à une publication exhaustive sur le sujet [Has+03] (voir "*A survey of Real-Time Soft Shadows Algorithms*", page 101).

Dans cette publication, ils expliquent entre autres comment sont produites les ombres douces, pourquoi elles sont importantes et les effets que peuvent produire plusieurs sources lumineuses de couleurs différentes.

Ils mettent en avant un certain nombre de problèmes généralement dans les algorithmes d'ombres douces temps réel (voir "*A survey of Real-Time Soft Shadows Algorithms*", paragraphe "*2.4 Important issues in computing soft shadows*", page 106).

Lorsque la source lumineuse est sensiblement plus grande que l'objet qu'elle éclaire, il n'est plus possible de considérer son centre pour essayer de produire une ombre douce réaliste (voir figure 2.17) et presque aucune zone d'ombre dure n'est produite. Cet effet est rarement obtenu avec les algorithmes temps réel parce que la plupart du temps, ils considèrent le centre de la source pour produire les régions de pénombre et/ou considèrent uniquement les polygones les plus proches de la source lumineuse.

Le calcul de l'ombre de deux objets n'est pas une simple combinaison des deux ombres prises séparément. Ceci impose donc de traiter tous les objets d'une scène en même temps (voir figure 2.18). Dans la figure 2.17 l'image de gauche est le résultat de l'éclairage par une source ponctuelle, l'ombre est donc dure. L'ombre des images du milieu et à droite est engendrée par une source surfacique.



Figure 2.17: L'influence de la taille de la lumière surfacique sur le résultat de l'ombre douce [Has+03].

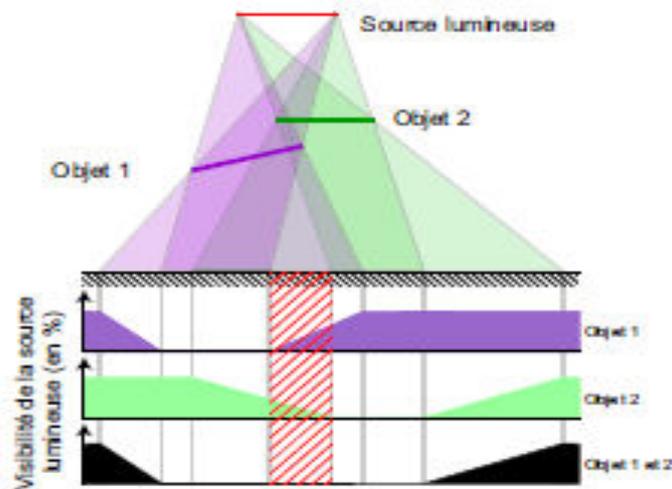


Figure 2.18: L'ombre de deux objets n'est pas une simple combinaison des deux ombres prises séparément [Has+03].

2.5.1 Travaux connexes sur les ombres douces en temps réel

Comme le calcul d'ombres douces physiquement correctes est généralement considéré comme trop coûteux pour les applications interactives ou en temps réel, la plupart des ces approches estiment la visibilité de la zone complexe (par exemple sur une surface) en calculant une seule ombre dure à partir du centre de la zone de la source lumineuse, et simulant la pénombre en utilisant des heuristiques approximatives. Les simplifications utilisées dans ces approches dites à échantillon unique ne conduisent généralement pas à des ombres douces physiquement correctes.

Un grand nombre d'algorithmes d'ombres douces en temps réel sont publiés au cours des dernières années, la plupart basés sur des extensions de l'algorithme de shadow mapping ou sur l'algorithme du volume d'ombre. Nous donnons un bref aperçu des publications liées à notre travail. Nous référons le lecteur intéressé au livre publié par Eisemann et al. [Eis+11] et à [Has+03] pour une vue d'ensemble approfondie des ombres (douces) en temps réel.

Dans le travail de Wyman et al. [WH03], non seulement une carte d'ombre, mais aussi une carte dite de carte pénombre (*Penumbra Map*) est générée en analysant les silhouettes d'objets à partir de la position de la source lumineuse, permettant d'estimer une région de pénombre dans la passe d'illumination. Randima Fernando [Fer05] suggère d'utiliser une technique appelée Percentage Closer Soft Shadows (PCSS), où *Percentage Closer Filtering* (PCF) de [RSC87] est appliqué et combiné avec une recherche du bloqueur d'ombre. Le PCF adoucit les limites des ombres dures en comparant non seulement la profondeur actuelle à une seule valeur dans la shadow map, mais en faisant cela avec les pixels voisins dans la shadow map. Le pourcentage de tests d'ombre réussis spécifie l'intensité de l'ombre. Il aide à réduire les artefacts d'aliasing aux limites des ombres adoucies, mais la pénombre est loin d'être précise, car elle a toujours la même taille. Le PCSS utilise donc une recherche du bloqueur supplémentaire dans la carte d'ombre,

ainsi le noyau de filtre peut être ajusté selon la relation entre la lumière, le bloqueur et le récepteur. Pour éviter le grand nombre de recherches de cartes d'ombre pour le PCF, plusieurs méthodes de pré-filtrage sont proposées [DL06; Ann+07] qui permettent des cadences d'images en temps réel.

Plusieurs travaux [GBP06; GBP07; Att+06; ASK06; SS07] sont publiés, qui proposent des variantes d'une technique appelée *backprojection*. L'idée est d'utiliser une seule carte d'ombre non seulement pour la comparaison de profondeur, mais pour l'utiliser comme une représentation discrétisée de la scène. Afin de calculer le facteur de visibilité v pour un pixel p de l'espace de l'écran, les texels de la carte d'ombre sont rétro-projetés de p sur la source de lumière, où la quantité d'occultation est estimée. Ces approches peuvent produire des résultats plus précis que PCSS et leurs variations, mais sont sujettes à des artefacts (par exemple, lorsque les bloqueurs d'ombre se chevauchent, lorsque la source de lumière est trop proche ou lorsque la pénombre est extrêmement grande) et il se peut qu'un nombre important de texels de la carte d'ombre soit projetée, ce qui réduit les performances.

L'approche la plus intuitive, mais aussi la plus lente pour générer des ombres douces physiquement correctes consiste à générer des ombres dures à partir de plusieurs points d'échantillonnage sur la source de lumière puis accumuler cette information. Afin de minimiser le temps de calcul, [HH97] suggère d'utiliser seulement quelques échantillons régulièrement distribués pour le calcul. Pour chaque récepteur d'ombre, une carte dite d'atténuation est calculée en additionnant les ombres individuelles, qui sont ensuite utilisées pour modifier l'éclairage de l'objet. Donc, pour n points d'échantillons et m récepteurs, $m \times n$ cartes d'ombres sont nécessaires. Une amélioration de cette idée est suggérée par [Agr+00]: au lieu de calculer et d'utiliser une carte d'atténuation pour chaque récepteur, une carte d'atténuation à couche unique pour toute la scène est créée, ce qui permet des fréquences d'images interactives sur le matériel graphique moderne. Dans la méthode proposée par [SPP05], dans une étape de pré-calculée les informations de visibilité de nombreuses cartes d'ombre sont combinées dans une structure de visibilité 3D compressée, qui est ensuite utilisée pour le rendu. En utilisant le support de CUDA pour les structures de données irrégulières, [SEA08] calcule des ombres douces précises en évaluant la solution d'ombre pour chaque pixel visible dans l'écran. Dans [Sch+09], les auteurs échantillonnent la source lumineuse sur plusieurs frames exploitant la cohérence temporelle. Bien qu'ils montrent des cas où ils convergent vers un résultat physique correct, ils ont des problèmes avec les objets se déplaçant rapidement et ne peuvent donc pas garantir des résultats corrects dans toutes les configurations de scène.

Les ombres douces en temps réel peuvent également être simulées avec des versions modifiées de l'algorithme des volumes d'ombre, en particulier des méthodes basées sur l'algorithme *Penumbra Wedges* [AAM03; FBP06].

Hatam et al. [AKS17] présentent une méthode basée sur le filtrage bilatéral pour créer des ombres douces en temps réel. Ils utilisent plusieurs matrices de points d'échantillonnage de la lumière. Ensuite, la région de la pénombre est adoucie par le filtrage bilatéral dans l'espace image. Cette méthode réduit considérablement le nombre de cartes d'ombre. Par conséquent, cette méthode fournit une augmentation des performances et des résultats merveilleusement. D'autres travaux plus récents sont réalisés pour générer

des ombres douces en temps réel [BGC16; XU+15; Lik+15] qui donnent des résultats réalistes et rapides, mais leur inconvénient majeur est que les ombres générées ne sont pas physiquement réalistes.

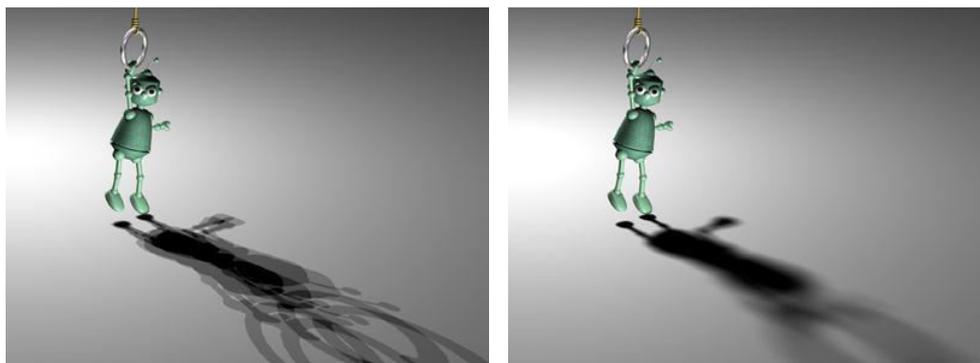
2.5.2 Ombres douce physiquement correcte

La source lumineuse ponctuelle n'existe pas dans le monde réel, c'est qu'une approximation. Aucune source du monde réel n'est sans dimension. Toute lumière est émise par une surface et pas par un point. Cela a quelques implications intéressantes, surtout sur les ombres. Les ombres dures n'existent pas dans la réalité, elles ont toutes des bords flous. La quantité de flou sur les bords d'une ombre dépend des positions et des tailles relatives de la source lumineuse, de l'objet projetant l'ombre et de celui qui la reçoit.

Les ombres douces sont engendrées par une source de lumière étendue (surfactive). En infographie, la source de lumière surfactive est approximée par un ensemble de source de lumière ponctuelle. Afin de simuler une source de lumière surfactive, il faut considérer plusieurs échantillons de la source de lumière surfactive, pour chaque source de lumière ponctuelle une carte d'ombre est créée. Dès lors que ces cartes d'ombre créent, dans une seule passe de rendu, il est nécessaire d'effectuer le teste de profondeur, et pour finir nous on calcule la valeur de l'ombre, générant ainsi une ombre douce physiquement correcte.

La génération des ombres douces avec de multiples cartes d'ombre par la lumière est informatiquement coûteuse en raison de la densité d'échantillonnage élevée qui est nécessaire pour rendre des régions lisses. Si la densité est trop faible, des artefacts vont probablement apparaître, et le système visuel humain ne perçoit pas plus une ombre douce, mais plusieurs ombres dures (voir la figure 2.19 à gauche).

Dans cette thèse nous nous intéressons à la technique qui est basée sur les approches qui échantillonnent la source surfactive et qui utilisent plusieurs cartes d'ombre. Nous nous basons principalement sur la méthode de Michael Schwärzler et al [Sch+12].



4 échantillons

1024 échantillons

Figure 2.19 : Images obtenues par illumination d'un même modèle [Has+03]. À gauche : ombre douce générée par une lumière surfactive subdivisée en 04 échantillonnes. À droite : ombre douce générée par une lumière surfactive subdivisée en 1024 échantillonnes.

2.5.3 Ombres douces rapides et précises avec échantillonnage adaptatif de la source de lumière surfacique

Michael Schwärzler et al [Sch+12] dans leur article intitulé *Fast Accurate Soft Shadows with Adaptive Light Source Sampling* proposent une nouvelle approche de création d'ombres douces physiquement correctes en temps réel. Dans cet article les auteurs implémentent les ombres douces générées par une source de lumière surfacique. Ils proposent une approche de subdivision adaptative de source de lumière pour choisir les points d'échantillonnage de manière adaptative. L'idée principale est de commencer par avec quelques échantillons sur la zone de la lumière, évaluant là des différences utilisant les *Hardware Occlusion Queries* [BMH98], et en ajoutant plus de points d'échantillonnage si nécessaire. Ils diminuent le nombre d'échantillons de la source de lumière. En s'appuyant sur la nouvelle génération des GPU, qui permettent, pour chaque pixel affiché à l'écran, de réaliser des opérations programmables, accroissant ainsi le réalisme en minimisant le coût.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions utilisées pour générer les ombres en temps réel afin d'ajouter du réalisme aux scènes 3D. Nous nous sommes concentrés principalement sur les ombres douces physiquement correctes en temps réel. En réalité, malgré le fait que les méthodes basées sur les ombres douces donnent une bonne approximation. Il y a des limites par les artefacts dus à l'échantillonnage de la source de lumière surfacique, particulièrement quand nous générons un petit nombre d'échantillons. Ainsi, pour couvrir ce problème, nous proposons dans le chapitre 4 une nouvelle technique permettant de diminuer le nombre d'échantillons de la lumière surfacique sans toucher aux performances.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la méthode de l'occultation ambiante et les approches d'occultation ambiante dans l'espace écran.

Chapitre 3

L'occultation ambiante

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts fondamentaux de la méthode d'occultation ambiante, en commençant par la démonstration des origines de l'occultation ambiante. La section 3.3 décrit les types de méthodes d'OA existantes dans la littérature. Nous présentons ensuite dans la section 3.4 le concept des méthodes de l'OA dans l'espace écran, puis nous présentons les travaux relatifs les plus importants, par la suite nous présentons un bilan et une classification des différentes méthodes d'occultation ambiante dans l'espace écran. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

3.2 De l'équation du rendu à l'occultation ambiante

Dans cette section, nous démontrons un moyen efficace de résoudre les problèmes de l'occultation ambiante en utilisant l'intégration de Monte-Carlo. L'occultation ambiante peut être vue comme une approximation de l'équation de rendu. Voyons comment dériver la définition mathématique de l'occultation ambiante, en commençant par une simple approximation et en ajoutant plus de complexité pour atteindre notre objectif.

3.2.1 Éclairage direct

L'approche la plus simple pour l'approximation de l'équation du rendu est de simplement ignorer l'éclairage indirect ou la lumière qui rebondit d'une surface à l'autre et de calculer uniquement l'éclairage direct ou la lumière provenant directement d'une source lumineuse. Cela produit des images comme celle de la figure 3.1 à gauche, où seuls les points visibles de la source lumineuse sont éclairés, et ceux dont la source lumineuse n'est pas accessible apparaissent en noir.

Cette méthode est une approximation très grossière de l'équation de rendu, et le résultat visuel est inacceptable pour la plupart des buts pratiques. En pratique, nous devons approximer l'éclairage indirect pour que les résultats soient visuellement plausibles, comme l'illustre la figure 3.1 au milieu. L'image à droite montre une combinaison entre

l'éclairage direct et l'éclairage indirect, les points dans l'ombre ne sont plus noirs, mais reçoivent plutôt l'illumination des objets proches.

L'éclairage indirect produit une meilleure approximation de l'équation de rendu, mais devient plus coûteux en termes de calcul. Même si les systèmes du rendu moderne peuvent calculer un ou deux rebonds de lumière indirecte en temps réel, ces systèmes offraient traditionnellement des approximations de l'équation du rendu qui étaient moins chères à calculer et offraient des résultats visuellement plausibles comme discuté dans le chapitre 2.

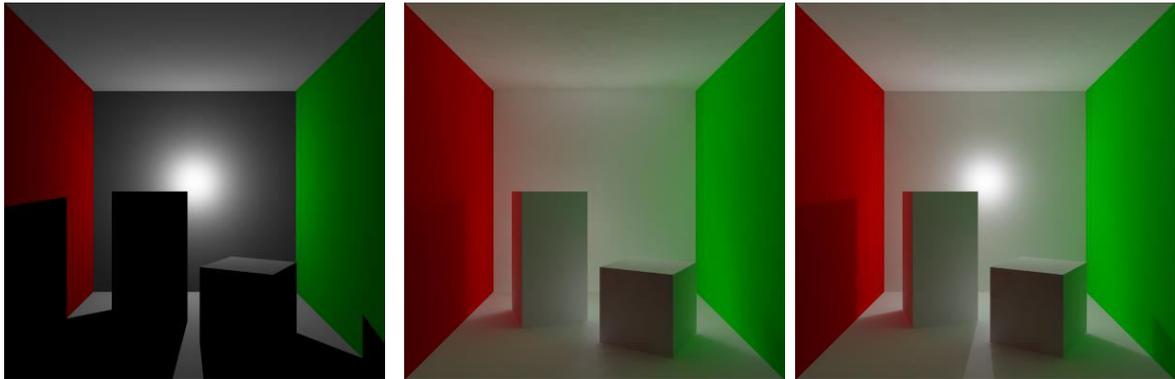


Figure 3.1: Un exemple d'une scène éclairée. À gauche: un éclairage direct. Au milieu: un éclairage indirect. Droite: un éclairage direct et un éclairage indirect.

3.2.2 Lumière ambiante

Une méthode traditionnelle d'approximation l'éclairage indirect, consiste à remplacer le calcul par une constante. Ce terme constant est appelé lumière ambiante dans les modèles d'ombrage tels que Blinn-Phong ou Cook-Torrance. En utilisant une constante, nous supposons que la lumière atteint chaque point dans toutes les directions et avec une même intensité. Ces faits impliquent que la quantité de lumière ambiante incidente sur un point de surface est indépendante de l'orientation de la surface, et la quantité de réflexion perçue est indépendante de la direction de la vue.



Figure 3.2: Une scène éclairée en utilisant : uniquement un éclairage direct (à gauche), uniquement une lumière ambiante (au milieu) et uniquement un éclairage direct avec lumière ambiante.

Dans la figure 3.2 à gauche, les zones où la lumière n'atteint pas apparaissent totalement en noir, et aucun détail de la géométrie n'est visible. Par contre, dans la figure 3.2 à droite, tous les points de scène sont visibles et même les endroits dans l'ombre sont visibles aussi. La scène est totalement éclairée que ce soit de la source lumineuse directe ou du terme de lumière ambiante.

Néanmoins, un terme ambiant constant rend la scène terne et inintéressante, et il est difficile pour l'observateur d'apprécier la profondeur de la scène. C'est exactement le même problème que l'occultation ambiante tente de résoudre.

3.2.3 Obscurance ambiante

Zhukov et al. [ZIK98] introduisent la notion d'obscurance, les auteurs proposent un modèle empirique pour expliquer une meilleure approximation de l'éclairage ambiant que l'on nomme obscurance ambiante (en anglais Ambient Obscurance). Dans ce travail, les auteurs simulent la composante diffuse de l'illumination uniforme éloignée de l'illumination globale, en calculant le nombre de points occlus par la géométrie voisine. Dans une scène, les algorithmes d'illumination globale simulent le transport de la lumière en utilisant des méthodes approchées de l'équation du rendu proposées par James Kajiya [Kaj86], tandis que l'obscurance ambiante calcule un facteur d'atténuation de la lumière en tout point de la surface. L'obscurité d'un point p est définie par l'équation (3.1).

$$L_0(p \rightarrow \omega_0) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \rho(d(p \leftarrow \omega_i)) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.1)$$

La définition ci-dessus pour l'occultation ambiante révèle un problème subtil. Quelle est la valeur de l'occultation ambiante pour une scène fermée? La réponse est zéro, ou noir. C'est parce que chaque rayon de chaque point p finit par toucher une autre surface, auquel cas $V(p \leftarrow \omega_i)$ est nul pour tout p et pour tout ω_i .

Le problème ci-dessus a une solution très simple. Au lieu d'utiliser la fonction de visibilité $V(p \leftarrow \omega_i)$, la distance entre p et le potentiel occluant doit être calculé dans la direction ω_i , notée $d(p \leftarrow \omega_i)$, puis appliquer une fonction ρ à cette distance pour donner une valeur d'occultation.

Cette équation modifiée est l'équation d'obscurance ambiante qui peut être vue comme une forme d'occultation ambiante limitée dans le temps.

En pratique, la fonction ρ dans l'équation 3.1 réduit typiquement la valeur d'occultation à zéro lorsque la distance est supérieure à un certain seuil, c'est-à-dire:

$$\rho(d) = \begin{cases} f(d) \in [0; 1] & d < \text{seuil} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

La fonction ρ sert donc trois objectifs. Premièrement, ρ rend le travail de l'obscurance ambiante pour les scènes fermées en donnant 0 pour les occulteurs qui se trouvent à une distance supérieure à un certain seuil, la valeur d'obscurance n'est pas noire dans les scènes fermées, contrairement à l'occultation ambiante. Deuxièmement, puisque ρ

réduit la valeur d'occultation à zéro pour des points éloignés, l'obscurance ambiante d'un point donné devient un calcul relativement local. C'est-à-dire que la valeur d'obscurance ambiante n'est qu'une fonction de la géométrie proche du point, ce qui se traduit par des implémentations plus efficaces en pratique. Finalement, ρ donne aux occulteurs voisins une valeur d'occultation plus élevée (une valeur plus proche de 0) que les occulteurs distants.

Enfin, il est important de noter que dans la littérature, les termes occultation ambiante et obscurance ambiante sont souvent utilisés de façon interchangeable pour désigner cette dernière.

Par la suite, Bredow [Bre02] et Landis [Lan02] simplifient ce modèle en supprimant la notion de distance. Ce nouveau modèle, appelé Occultation Ambiante. La formule (3.1) est simplifiée en remplaçant la fonction de distance ρ par une fonction de visibilité V (équation 3.6 section 3.2.4).

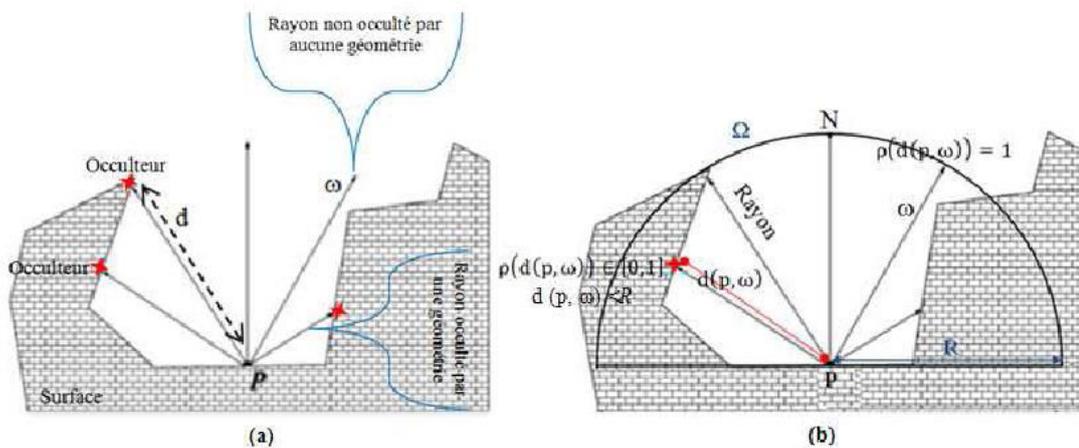


Figure 3.3: Accessibilité d'un point par obscurance [Lan02].

3.2.4 Occultation ambiante

L'occultation ambiante peut être considérée comme une forme d'éclairage indirect à mi-chemin entre la lumière ambiante et l'éclairage indirect réel. Au lieu d'utiliser un terme ambiant constant, l'occultation ambiante produit un terme ambiant pour chaque point de la scène. Cette valeur dépend de la position et une fonction de la visibilité du point, et l'occultation ambiante fait deux hypothèses lors du calcul de cette valeur.

La première hypothèse est que la surface est une surface diffuse parfaite, c'est-à-dire que la surface réfléchit la lumière de manière égale dans toutes les directions. Dans ce cas, la BRDF de la surface $f_r(p, \omega_i, \omega_0)$ devient une constante k , alors elle peut être déplacée hors de l'intégrale dans l'équation 1.13 (section 1.4) pour donner l'expression suivante:

$$L_0(p \rightarrow \omega_0) = k \int_{\Omega} L_i(p \leftarrow \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.3)$$

La deuxième hypothèse est que la lumière atteint potentiellement un point x dans toutes les directions (voir figure 3.4). En d'autres termes, la direction dans laquelle la lumière atteint effectivement x devient non pertinente, et nous supposons que l'intensité de la lumière atteignant potentiellement x est égale dans toutes les directions.

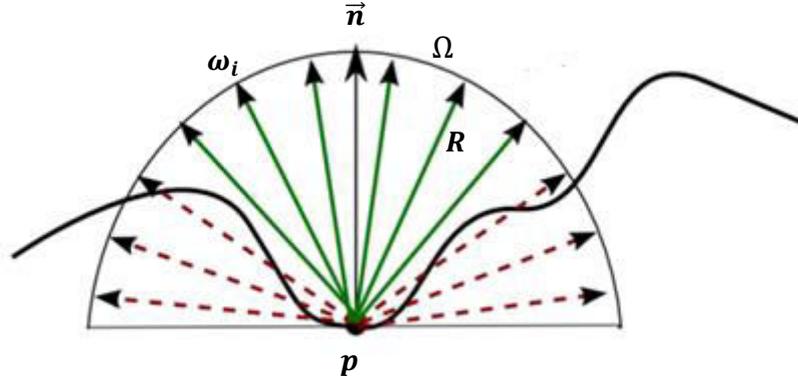


Figure 3.4: Lancer de rayon pour résoudre l'intégrale. Les rayons verts sont visibles ($V=1$) alors que les rayons rouges sont occlus ($V=0$)

L'occultation ambiante n'ajoute pas simplement la contribution de la lumière de toutes les directions, car cela se traduirait par un terme de lumière ambiante constant. Au lieu de cela, l'occultation ambiante prend en compte la visibilité du point.

Le calcul de l'OA d'une scène s'effectue typiquement en pré-calcul par la méthode du lancer de rayons. Pour chaque direction ω_i dans laquelle la lumière peut potentiellement atteindre p , l'occultation ambiante détermine si un rayon dans la direction ω_i touche une autre surface (voir figure 3.4). Si c'est le cas, on dit que le point p est occlus dans la direction ω_i , dans ce cas, aucune contribution de lumière dans la direction ω_i n'est ajoutée. D'un autre côté, si le rayon n'intersecte pas une surface, la lumière est déterminée pour atteindre p dans la direction ω_i , dans ce cas, cette lumière contribue à la valeur finale de la lumière réfléchiée L_o . Cette description est plus succinctement exprimée par l'équation suivante:

$$L_o(p \rightarrow \omega_0) = k \int_{\Omega} V(p \leftarrow \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (3.4)$$

Où

$$V(p \leftarrow \omega_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } p \text{ est occlus dans la direction } \omega_i \\ 1 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

La différence entre les équations 3.3 et 3.4 est que le terme de lumière entrant $L_i(p \leftarrow \omega_i)$ de l'équation 3.3 est remplacé par une fonction de visibilité $V(p \leftarrow \omega_i)$. Cette fonction de visibilité retourne 0 si p est occlus dans la direction ω_i et 1 sinon. De cette

façon, l'occultation ambiante ajoute la contribution de la lumière dans la direction ω_i seulement si p est non occlus dans cette direction.

Finalement, nous dérivons la valeur de la constante k pour arriver à l'équation finale d'occultation ambiante. Pour simplifier, nous définissons l'occultation ambiante comme une valeur dans la plage $[0; 1]$. Pour un point complètement non occlus, la fonction de visibilité $V(p \leftarrow \omega_i)$ vaut 1 pour chaque ω_i , donc:

$$\begin{aligned} L_0(p_{\text{non occlus}} \rightarrow \omega_0) &= k \int_{\Omega} V(p_{\text{non occlus}} \leftarrow \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \\ &= k \int_{\Omega} \cos\theta_i d\omega_i \\ &= k\pi \end{aligned}$$

Nous voulons que la valeur d'occultation ambiante pour un point non occlus soit de 1, donc :

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

et l'équation d'occultation ambiante finale devient:

$$L_0(p \rightarrow \omega_0) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} V(p \leftarrow \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (3.6)$$

Dans la pratique toutes les méthodes de l'occultation ambiante utilisent l'équation 3.6 pour le calcul du facteur d'occultation ambiante.

L'OA d'un élément p de surface muni d'un vecteur normal \vec{n} (figure 3.4) est définie comme l'intégrale sur l'hémisphère de la visibilité:

$$OA(p, n) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} V(p, \omega) n \cdot \omega d\omega \quad (3.7)$$

Où Ω est l'hémisphère défini par p et ω .

L'intégrale OA peut être évaluée par l'intégration de Monte-Carlo [ZIK98] :

$$OA(p, n) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N V \cdot (n \cdot \omega_m) \quad (3.8)$$

Où N est le nombre de rayons, ω_m est une direction choisie uniformément au hasard pour chaque m .

L'effet principal de ce facteur est l'amélioration du réalisme par l'ajout des ombres douces et des auto-ombres. De plus, ce calcul permet d'obtenir un effet intéressant à

moindre coût par rapport au calcul de l'illumination globale avec des méthodes de radiosité ou de lancer de rayon type *ray tracing*.

3.3 Méthodes d'occultation ambiante

L'occultation ambiante est une approximation de l'illumination globale qui assombrit les points en fonction de leur visibilité, les points occlus étant plus fonc es que les points non occlus. Alors que l'OA est une simplification plutôt grossière de l'équation de rendu, son calcul en temps réel est prohibitif. Au lieu de cela, les approximations de l'OA sont généralement utilisées dans les graphiques informatiques en temps réel.

Plusieurs méthodes et techniques existent dans la littérature pour calculer l'OA, elles sont classées en deux catégories différentes. Premièrement les méthodes basées sur l'espace objet (section 3.3.1) et les méthodes basées sur l'espace écran (section 3.3.2).

3.3.1 Méthodes basées sur l'espace objet

Ces méthodes calculent l'occultation ambiante au niveau de la géométrie du maillage des objets. Les méthodes d'espace objet nécessitent une structure de données qui code les informations d'adjacence entre les triangles du maillage, ou une structure de données kd-tree. La plupart des méthodes de calcul de caractéristiques appartiennent à cette catégorie fonctionnent sur le CPU.

Les techniques d'occultation ambiante de l'espace objet comprennent toutes les informations géométriques dans le calcul de l'OA. Bunnell [Bun05] présente une méthode entièrement géométrique, où la scène est pr eatr ee dans un ensemble de disques; ensuite, il calcule analytiquement l'occultation ambiante entre ces disques. Plusieurs techniques d'espace objet existent dans la littérature [McG10; HLY10; Gro+12]. Tout en offrant des résultats de haute qualité, la complexité de ces méthodes dépend du nombre de polygones dans la scène et du nombre de rayons projet es.

3.3.2 Méthodes basées sur l'espace écran

Thomas Luft et al. [LCD06] sont les premiers à introduire le concept d'espace écran, où la scène est présente dans le tampon de profondeur. Une représentation espace écran, qui inclut la position normale, la profondeur et les attributs de chaque pixel, est une représentation efficace d'une scène 3D. La rastérisation peut facilement créer cette représentation et rendre la complexité du rendu presque géométriquement indépendante. La géométrie est représentée sous forme de points 3D qui sont pixelliss es par le GPU à partir d'un point de vue s electionn e. En général, les méthodes espace écran se composent de deux ou plusieurs étapes, où la scène est rendue à partir de la position de la source de lumière ou de la position de la caméra, et les attributs de points visibles sont calcul es dans la première étape. Cette méthode est utilisée la première fois pour le calcul de l'occultation ambiante dans l'espace écran (en anglais *Screen space ambient occlusion* (SSAO)) pour des scènes dynamiques en temps réel dans les méthodes de [Mit07; Mit12; SV16; FM08; Jim+16; MCG+11; BSD08]. La méthode SSAO utilise une carte de profondeur pour stocker les informations de profondeur et utilise d'autres tampons pour stocker d'autres

informations utiles pour calculer le facteur OA. Ce facteur est seulement une estimation d'un ensemble d'échantillons répartis dans l'hémisphère (voir la section 3.4) autour de l'emplacement du pixel courant. Cela simule la méthode traditionnelle de lancer de rayons dans l'espace-écran.

Une telle approximation est l'occultation ambiante dans l'espace-écran. L'observation principale derrière cette technique est qu'une paire de tampons de profondeur et de normale fournit une approximation, bien que grossière, mais néanmoins utile à la géométrie 3D d'une scène. En conséquence, les méthodes SSAO sont relativement peu coûteux à calculer et adaptés aux applications graphiques informatiques en temps réel.

3.3.3 Synthèse

Dans cette partie du chapitre nous faisons une petite synthèse des travaux sur le concept occultation ambiante. Nous avons présenté une définition au concept occultation ambiante, puis nous avons montré les fonctions mathématiques nécessaires pour le calcul de la valeur d'OA. Nous avons mentionné qu'il existe deux types d'algorithmes dans la littérature pour calculer l'OA.

Le premier type est les algorithmes d'espace objet qui fonctionnent dans l'espace monde 3D de la scène. Ces algorithmes procurent des images de bonne qualité, mais dépendent du nombre de polygones dans la scène et du nombre de rayons projetés, ce qui les rend très gourmands en matière de calcul du temps et non pratique au rendu temps réel.

Le second type est les algorithmes d'espace écran qui fonctionnent dans l'espace écran 2D. Ce genre d'algorithme permet d'approximer la géométrie de la scène 3D en un ensemble de textures 2D. Le matériel graphique d'aujourd'hui est capable d'accéder rapidement à ces textures via des programmes shaders. L'avantage de ce type est la simplicité d'implémentation sur les GPUs, indépendance de la complexité de la scène, effectue des opérations de calcul d'éclairage que dans les parties visibles par rapport à un point de vue, nécessite une structure de données plus simple que le stockage d'informations spatiales, et idéale pour les scènes avec un grand nombre de polygones où d'autres méthodes auraient du mal à obtenir des performances en temps réel.

Dans cette présente thèse, nous nous intéressons aux méthodes basées sur l'espace écran pour la raison ces avantages comme mentionner dans le paragraphe précédent.

3.4 Les techniques de l'occultation ambiante dans l'espace écran

L'occultation ambiante dans l'espace écran (SSAO) est une méthode de rendu permettant d'approximer l'OA en temps réel. Il est devenu l'approche standard pour le calcul de l'OA dans des applications en temps réel telles que les jeux vidéo. D'abord introduite par Mittring [Mit07], la technique utilise le buffer de profondeur comme une approximation de la géométrie dans la scène. Le facteur d'occultation est ensuite calculé dans l'espace écran, ce qui signifie que le processus peut être entièrement effectué sur le GPU. Le processus est dynamique, ne nécessite aucun pré-calcul et est indépendant de la complexité de la scène.

L'observation principale derrière l'occultation ambiante de l'espace écran est qu'une paire de tampons de profondeurs et de normales, fournit une approximation approximative

de la géométrie 3D de la scène. Ce concept est illustré à la figure 3.5, où l'on voit les pixels du tampon de profondeur se rapprochant de la géométrie de la scène, représentés par une courbe lisse. Bien que cette approximation soit en effet très grossière, il suffit de fournir une estimation relativement bonne de l'occlusion ambiante dans une scène.

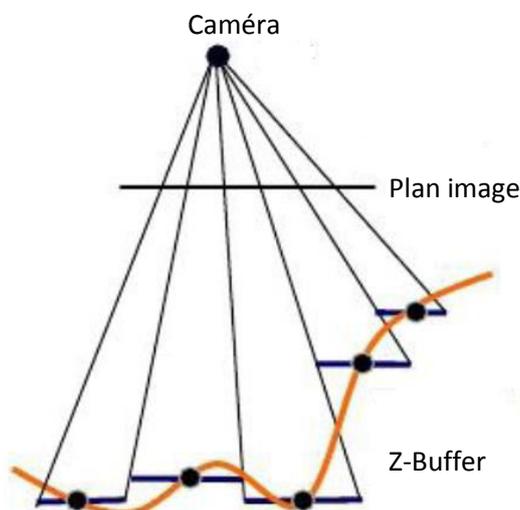


Figure 3.5: Le tampon de profondeur est une approximation de la géométrie 3D d'une scène [Gre09].

Le mécanisme de SSAO est conceptuellement très simple. Le tampon de profondeur est utilisé pour reconstruire la position 3D d'un pixel, tandis que le tampon de normale donne une approximation de l'orientation de la surface. Ces deux tampons sont ensuite échantillonnés de manière stochastique au moment de l'exécution autour du pixel pour trouver des occulteurs proches, et une fonction pour déterminer la valeur d'occultation pour chaque échantillon. Enfin, les valeurs d'occultation pour chaque échantillon sont moyennées ensemble pour produire la valeur d'occultation finale pour le pixel [Gre09].

Dans cette partie, nous explorons plus en détail la technique de SSAO et présentons les différentes techniques SSAO existantes dans la littérature.

3.4.1 Les techniques traditionnelles de SSAO

3.4.1.1 Crytek Ambient Occlusion

La première technique SSAO est introduite dans le moteur de jeu CryEngine 2, développé par Crytek en 2007 [Mit07]. Etant la première technique de l'espace écran, Crytek occultation ambiante reste l'une des méthodes les plus populaires, car il est le précurseur de la myriade de techniques qui existent de nos jours. La caractéristique la plus notable de Crytek occultation ambiante est les images grisâtres résultant qu'elle produit, comme le montre la figure 3.7. Ceci est un effet secondaire de la façon dont le procédé détermine la valeur de l'occultation ambiante d'un point.

Cette méthode fonctionne en échantillonnant des points répartis de manière aléatoire dans une sphère à chaque emplacement de pixel p . L'échantillonnage se fait

directement dans l'espace écran. Chaque point d'échantillon s , est alors projeté sur la surface de la scène à l'aide du tampon de profondeur. La valeur de profondeur du point de l'échantillon projeté s_d , est ensuite comparée à la valeur de profondeur d'origine s_z , afin de déterminer si l'échantillon est occlus ou visible. Le rapport du visible aux points d'échantillonnage occlus est utilisé pour rapprocher l'OA.

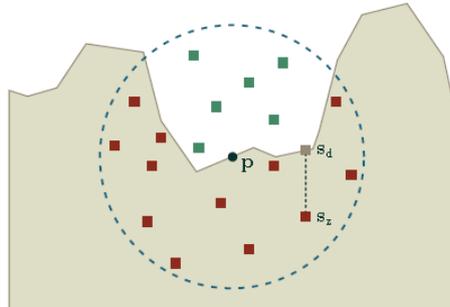


Figure 3.6: *Crytek Ambient Occlusion*. Les échantillons verts et rouges sont visibles et occlus, respectivement. Un échantillon est aussi montré projetée sur la surface de la scène.



Figure 3.7: Screen Space Ambient Occlusion dans Crysis [Mit07].

3.4.1.2 Starcraft II Ambient Occlusion

En 2008, la méthode Starcraft II Ambient Occlusion est publiée dans la conférence SIGGRAPH décrivant la technique d'occultation ambiante présentée dans le jeu Starcraft II [FM08]. Cette méthode peut être considérée comme une amélioration par rapport Crytek occultation ambiante [Mit07], cela donne des images comme celle de la figure 3.8. Notez que dans Starcraft II occultation ambiante, des surfaces planes telles que le plancher ou la barre apparaissent en blanc (voir figure 3.8), contrairement à la méthode de Crytek, dans lequel ils apparaissent gris.



Figure 3.8: Résultats de la méthode SSAO dans *Starcraft II* [FM08].

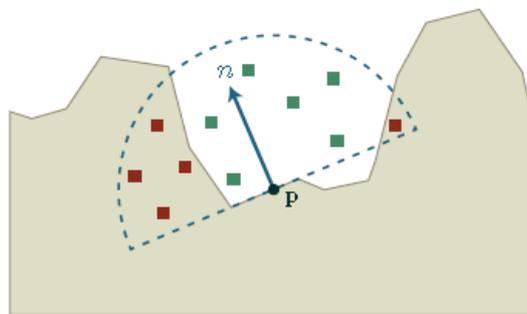


Figure 3.9: Les échantillons verts et rouges sont visibles et occlus, respectivement [FM08].

La méthode de *Starcraft II* Ambient Occlusion introduit une contribution par rapport à la méthode de Crytek. L'amélioration est que l'algorithme utilise la normale de surface, stockée dans le tampon de normale du G-buffer, pour déterminer l'orientation de la surface. Dans cette technique, les points sont échantillonnés dans l'hémisphère orienté vers la direction de la normale au lieu d'une sphère, comme le montre la figure 3.9. Cela a deux implications. D'abord, les surfaces planes apparaissent blanches, puisque les points sont maintenant échantillonnés seulement devant la surface. Ceci est plus proche de ce que produirait une méthode d'OA par lancer de rayons. Deuxièmement, tous les échantillons recueillis dans *Starcraft II* sont réellement significatifs, car ils sont connus pour se situer en face de la surface.

Enfin, il convient de noter que l'utilisation d'un tampon de normale pour déterminer l'orientation de surface est adoptée par de nombreuses techniques de SSAO après *Starcraft II* Ambient Occlusion. Pour ces raisons, *Starcraft II* Ambient Occlusion reste l'une des techniques les plus populaires.

3.4.1.3 L'occultation ambiante basée sur l'horizon

L'occultation ambiante basée sur l'horizon (Horizon Based Ambient Occlusion (HBAO)) est une technique développée par Louis Bavoil et Miguel Sainz chez NVIDIA en 2008 [BSD08]. Cette méthode fonctionne en utilisant un Ray Marching dans l'espace écran à travers le tampon de profondeur pour trouver l'angle de l'horizon libre h . Tout

d'abord, une direction du rayon est choisie perpendiculaire à la direction de la vue (la ligne en pointillés gris). Ensuite, plusieurs échantillons sont prélevés le long du dit rayon dans la progression. À chaque étape, la valeur de profondeur est lue. Si la valeur de la profondeur est inférieure à l'étape précédente, l'angle d'horizon est mis à jour. Plusieurs rayons sont coulés et l'angle d'horizon libre moyen h , est alors utilisé pour rapprocher le facteur d'OA.

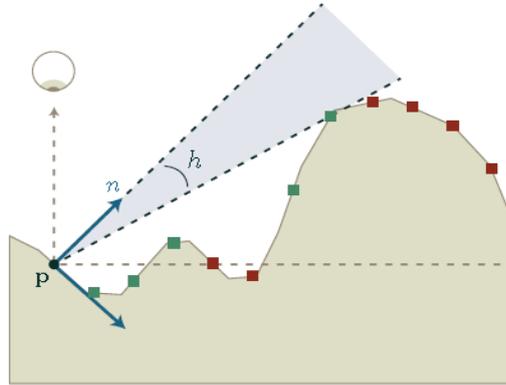


Figure 3.10: Occultation ambiante basée sur l'horizon. Les échantillons verts montrent lorsque l'angle de l'horizon est mis à jour. Les échantillons rouges indiquent quand il n'est pas. Le résultat est une mesure très précise de l'horizon libre h [BSD08].

Notez que l'angle de l'horizon dépend de la direction θ dans lequel le rayon est tracé à partir du point p . Pour cette raison, l'angle de l'horizon doit être calculé dans toutes les directions θ dans l'hémisphère orienté vers la direction de la normale. L'équation d'OA pour l'OA basée sur l'horizon devient donc une intégrale double:

$$OA(p) = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=-\pi}^{\pi} \int_{\alpha=t(\theta)}^{h(\theta)} W(\omega) \cos \alpha \, d\alpha \, d\theta \quad (3.9)$$

Où W est une fonction d'atténuation linéaire tel que $W(\theta) = \max(0, 1 - r(\theta)/R)$, $r(\theta)$ est la distance entre p et le point de l'horizon en direction \vec{w} et R est le rayon d'influence.

Dans son implémentation, l'OA basée sur l'horizon est calculée par la méthode du Ray Marching du tampon de profondeur. Une série de rayons est prise à partir du point ombré dans des directions aléatoires. Pour chaque rayon, l'algorithme marche dans le tampon de profondeur le long de la direction du rayon et lit à partir du tampon de profondeur à des positions discrétisées. Chaque fois que l'algorithme trouve un point qui est plus proche de la caméra que le point le plus proche actuellement connu, le point est traité comme un occulteur et la fonction d'occlusion ambiante est évaluée pour ce point. D'un autre côté, les points qui ne satisfont pas à ce critère peuvent être ignorés, car ils sont connus pour avoir été occultés par le point le plus proche actuellement connu. Enfin, les termes d'OA individuels pour chaque échantillon sont tous additionnés pour obtenir la valeur d'occultation finale du point.

Un exemple d'OA basée sur l'horizon peut être vu dans la figure 3.11 appliquée au fameux modèle du Sibenik Cathedral.



Figure 3.11: L'occultation ambiante sans ombrage. (À gauche) 67 MPixels / s avec notre algorithme basé horizon. (À droite) 15 MPixels / s avec un Ray Marching et 4 rayons par direction [BSD08].

3.4.1.4 Occultation ambiante dans l'espace écran utilisant la cohérence temporelle

L'occultation ambiante dans l'espace écran utilisant la cohérence temporelle (Screen Space Ambient Occlusion using Temporal Coherence (TSSAO)) [MSM10], est un algorithme d'occultation ambiante qui exploite la cohérence temporelle pour réduire le bruit et les artefacts de flou, avec une quantité minimale d'échantillons par trame. Les auteurs réutilisent les informations disponibles d'OA de trames précédentes en exploitant la cohérence temporelle entre trames d'image consécutives. Les auteurs identifient les pixels décrivant des positions dans l'espace monde identiques au moyen de reprojection temporelle. L'état actuel de la solution est mis en cache dans un tampon que l'on appelle l'occultation ambiante. Chaque image des nouveaux échantillons d'OA est calculée, puis mélanger ceux-ci avec les échantillons accumulés à partir des images précédentes. La solution d'occultation ambiante est ensuite combinée avec l'image résultant de l'illumination diffuse directement dans une étape séparée. (Voir la figure 3.12) pour une comparaison des SSAO avec et sans employer de cohérence temporelle.

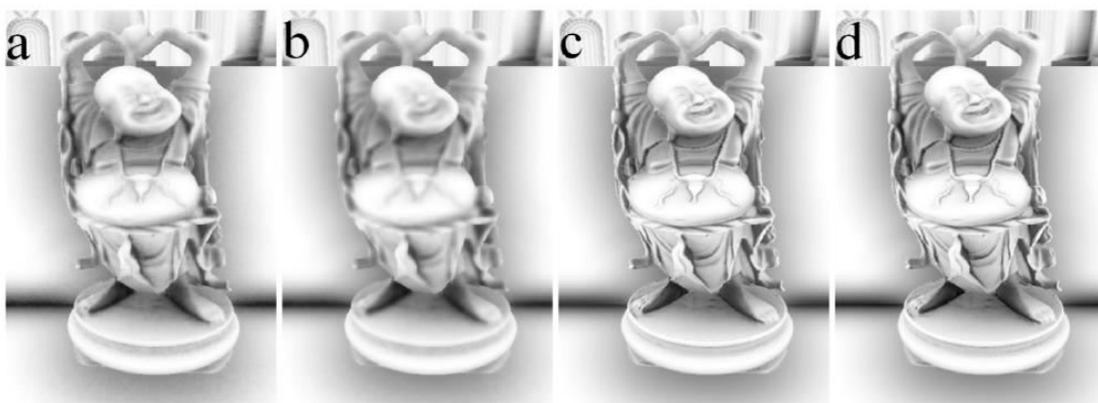


Figure 3.12: Comparaison entre SSAO et TSSAO. De gauche à droite: SSAO sans cohérence temporelle (23 FPS) avec 32 échantillons par pixel, avec (a) un flou faible, (b) un fort flou. (C) TSSAO (45 FPS), en utilisant 8-32 échantillons par pixel (initialement 32, 8 dans un état convergé). (d) image de référence en utilisant 480 échantillons par trame

(2,5 FPS). Toutes les images à une résolution de 1024x768. La scène 7M de sommets et tourne à 62 FPS sans ombrage de SSAO [MSM10].

3.4.1.5 Alchemy Ambiente Obscurance

L'obscurance ambiante d'Alchimie (Alchemy Ambiente Obscurance) est une technique populaire développée par Guitar Hero en 2011 [MCG+11], puis généralisée et intégrée dans le moteur Alchemy de Vicarious Visions. La figure 3.13 montre son impact visuel. L'image de gauche montre une scène éclairée avec uniquement un éclairage direct. La scène de droite est éclairée par l'éclairage direct en appliquant la méthode d'obscurance ambiante d'Alchimie, qui fait apparaître clairement les détails fins et les relations spatiales entre les objets. Cette méthode projette des points d'échantillonnage s , générée sur un disque sur la surface de la scène. Chaque échantillon s est ensuite utilisé pour construire le vecteur v comme illustré dans la figure 3.14. Le produit scalaire entre chaque moyenne v et n peut alors être utilisée pour calculer le facteur d'OA [MCG+11]. Théoriquement, la méthode fonctionne en définissant une fonction d'atténuation intelligente qui simplifie l'intégrale dans le terme d'OA. Cette méthode gagne son efficacité du fait qu'elle consomme peu de temps pour calculer les vecteurs v . Cette procédure est illustrée à la figure 3.14.



Figure 3.13: À gauche: l'éclairage de l'environnement. À droite : éclairée par la méthode d'Alchemy, calculée à partir de 12 échantillons par pixel à 1280 * 720 en 3 ms [MCG+11].

Dans la pratique l'équation d'obscurance ambiante d'Alchimie après avoir fait toutes les simplifications et appliqué l'estimateur de Monte-Carlo sur l'intégrale de la visibilité, devient :

$$OA(p) = \max \left(0.1 - \frac{2\sigma}{s} \sum_{i=1}^s \frac{\max(0, \vec{v}_i \cdot \vec{n} + zC\beta)}{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_i + \varepsilon} \right)^k \quad (3.10)$$

où s est le nombre d'échantillons, \vec{v}_i est le vecteur du point p vers l'échantillon s , σ est l'échelle d'intensité, k est le contraste, $zC\beta$ est le produit du biais de profondeur courante β et de la valeur de profondeur de l'occludeur zC , et ε est un petit nombre pour éviter les débordements.

Du point de vue de l'auteur, la méthode d'Alchemy satisfait quatre propriétés différentes qu'aucune des méthodes précédentes d'OA ne satisfait simultanément; La méthode d'Alchemy est robuste, multi-échelle, évolutive et permet le contrôle de l'artiste.

La robustesse fait référence au fait que la méthode d'Alchemy ne produit pas de halos ou de fausses ombres près des silhouettes, limite la dépendance du spectateur (l'OA est techniquement indépendant du spectateur, mais comme ces méthodes sont des espaces d'écran, elles produisent des artefacts dépendants du spectateur), et maximise la cohérence temporelle. La méthode d'Alchemy est également multi-échelle, ce qui signifie qu'elle capture à la fois les détails d'occlusion basse fréquence et haute fréquence.

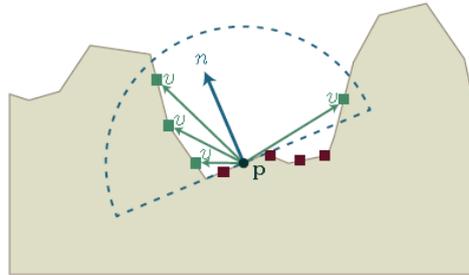


Figure 3.14: *Alchemy Ambient Obscurance*. Les vecteurs verts v , sont utilisés pour le calcul de la durée OA. Les points d'échantillonnage rouges sont rejetés parce qu'ils se situent en dehors (ou sur le bord de) l'hémisphère [MCG+11].

3.4.1.6 Approximation séparable de l'occlusion ambiante

Dans l'approximation séparable de l'occlusion ambiante (Separable Approximation of Ambient Occlusion) [Hua+11], les auteurs notent que SSAO peut être comprise comme un filtre 2D local qui évalue la visibilité d'un point dans l'espace écran. En s'inspirant par le filtre gaussien séparable populaire dans le domaine du traitement d'images, l'idée derrière l'OA séparable est de séparer ce filtre 2D en deux filtres 1D. Bien que cette approche ne soit pas techniquement correcte et n'aboutisse qu'à une approximation du filtre 2D original, la méthode est d'un ordre de grandeur plus rapide et les résultats restent visuellement attrayants, comme l'illustre la figure 3.15.



Figure 3.15: Exemples de d'occlusion ambiante séparable [Hua+11].

L'occlusion ambiante séparable peut être combinée avec les méthodes d'OA précédentes. En effet, l'OA séparable ne modifie que le schéma d'échantillonnage d'une technique d'occlusion ambiante et n'impose aucune équation d'OA particulière. Cela donne au développeur la liberté de choisir son équation, et par conséquent, l'occlusion

ambiante séparable peut entraîner de nombreuses implémentations différentes dans la pratique.

Dans l'occultation ambiante séparable, les échantillons sont rassemblés par la méthode du Ray Marching le tampon de profondeur le long de deux segments de ligne orthogonaux ancrés au point à ombrer. Une équation d'OA est appliquée à ces échantillons, et les résultats sont moyennés ensemble pour produire la valeur d'occultation finale du point. Du fait que le balayage selon des directions fixes pour chaque pixel produirait des artefacts de bandes, dans la pratique, l'ensemble des directions orthogonales est randomisé pour chaque pixel à l'aide d'une texture de vecteurs orthogonaux aléatoires. Comme pour les autres techniques, cette randomisation remplace la bande par le bruit, auquel cas les résultats doivent être brouillés dans une étape de post-traitement.

3.4.1.7 Angle based SSAO

Cette méthode est similaire à la méthode de Bavoil et al. [BSD08] en théorie mais les implémentations diffèrent car cette méthode n'a pas besoin de Ray Marching. En outre, nous utilisons les paires d'échantillons pour vaincre les discontinuités du tampon de profondeur comme proposé dans [OHH10]. Pour les deux échantillons, l'angle est trouvé en utilisant des mathématiques vectorielles.

En utilisant seulement le tampon de profondeur, la définition de l'occultation ambiante consiste à calculer l'intégrale de la visibilité sur l'hémisphère d'une surface donnée (voir équation 3.8). Pour l'approximer dans l'espace écran, le modèle d'échantillonnage est conçu comme des échantillons appariés (voir figure 3.16 à gauche). Donc, pour chaque paire d'échantillons, nous pouvons approximer combien le point d'ombre est occlus en 2D au lieu de l'intégrer sur l'hémisphère (voir figure 3.16 à droite).

Le facteur d'OA pour chaque paire donnée d'échantillons sera le minimum entre : $((\theta_{\text{gauche}} + \theta_{\text{droite}}) / \pi, 1)$. Puis en faisant la moyenne des facteurs d'OA de toutes les paires d'échantillons (dans notre cas, il y a 6 paires). Un problème peut apparaître dû aux grandes différences de profondeur entre les objets de la scène. Donc, pour faire face aux grandes différences de profondeur, Martin Mittring a adopté l'approche Angle based SSAO utilisée dans Toy Story 3 [Mit12].

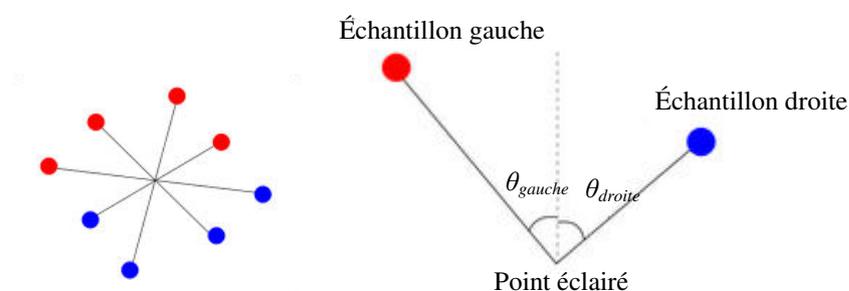


Figure 3.16: Motif de l'échantillon apparié

Si l'un des échantillons appariés est trop éloigné du point d'ombrage, disons le point rouge dans la figure 3.17, il sera remplacé par le point rose, qui est sur le même plan que

l'autre échantillon apparié valide. Puis il interpole entre le point rouge et le point rose pour traiter la grande différence de profondeur.

Le résultat de cette méthode d'OA dans l'espace écran est agréable pour un nombre d'échantillons supérieurs à 32 échantillons. L'auteur n'applique pas de filtre bilatéral au résultat d'OA, mais l'application du filtre peut donner un aspect d'OA plus doux. Enfin, il faudra plus de temps pour générer le modèle d'échantillonnage dans le futur, où le modèle qu'utilise l'auteur actuellement est uniformément distribué, cette distribution uniforme produit des artefacts visibles dans les résultats de l'OA.

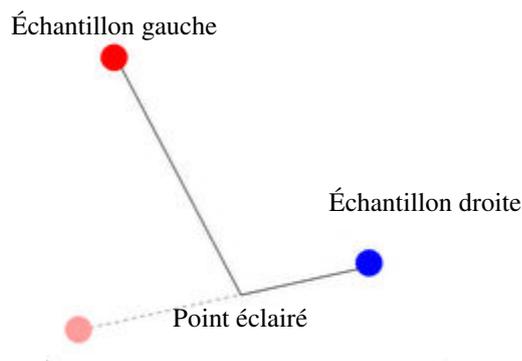


Figure 3.17: Motif de l'échantillon apparié de Mittring

3.4.2 Les méthodes récentes de SSAO

Récemment, des efforts sont faits pour porter l'OA vers les dispositifs mobiles. Marc Sunet et al. [SV16] en 2016 présentent une étude comparative des techniques de SSAO, dans laquelle quatre méthodes de SSAO sont comparées : Crytek [Mit07], Starcraft [Mit12], Alchemy [MCG+11] et HBAO [BSD08]. Les auteurs constatent que la méthode Alchemy [MCG+11] est la meilleure de ces quatre méthodes. La méthode Mittring [Mit12] fournit également d'excellents résultats en matière de performance et de visualisation.

En outre, une nouvelle formulation de la technique d'occlusion ambiante est introduite, appelée: Ground-Truth Ambient Occlusion (GTAO) [Jim+16]. L'objectif principal de cette méthode est d'utiliser une formulation alternative de l'équation d'OA et d'implémenter efficacement la distribution du calcul en utilisant un filtrage spatio-temporel, garantissant ainsi un meilleur réalisme et une vitesse de calcul plus rapide. Cette méthode a permis la génération d'images avec un très haut niveau de qualité visuelle. En raison du filtrage spatio-temporel, cette méthode prend plus de temps de calcul que les autres techniques [Mit07 ; FM08 ; BSD08 ; MCG+11].

L'échantillonnage par importance est introduit dans la méthode SSAO dans l'approche de Multiple Depth Layers par Vardis et al. [VPG13]. Les auteurs améliorent l'estimation de l'OA en utilisant des informations de profondeur provenant de différentes vues, qui sont obtenues en utilisant la carte d'ombre [Wil78] pour chaque vue. L'échantillonnage par importance est utilisé en fonction de l'importance de chaque vue, plutôt qu'en fonction de l'importance de chaque échantillon. Cette méthode donne de bons résultats visuels, mais au détriment de la vitesse de calcul.

3.4.3 Synthèse

Dans les sections précédentes nous avons présenté la plupart des travaux de l'occultation ambiante dans l'espace écran avec des explications détaillées pour beaucoup d'entre elles.

L'occultation ambiante de Crytek [Mit07] est une méthode plus rapide que les autres méthodes de SSAO. Cependant, cette vitesse a un coût: l'approche jette efficacement la moitié des échantillons par échantillonnage à l'intérieur d'une sphère. Pour les surfaces planes, la moitié des échantillons sont supposés se trouver derrière la surface, sans contribution réelle au calcul de l'OA. Pour cette raison, nous préférons d'autres méthodes sur l'OA de Crytek. Starcraft 2 Occlusion Ambiante [FM08] améliore la méthode de Crytek en échantillonnant à l'intérieur de l'hémisphère dans la direction de l'orientation de la normale. Bien que cette méthode donne d'excellents résultats, le coût de la suppression et de la projection des points vers et depuis l'espace de la caméra à l'intérieur d'une boucle est actuellement trop élevée. Pour cette raison, nous préférierions une méthode dans laquelle le coût de la projection et de la non-projection n'est pas linéaire par rapport au nombre d'échantillons, mais tout à fait constant ou nul. La méthode d'Alchemy [MCG+11] est intuitive, efficace, simple à mettre en œuvre, permet un contrôle artistique via quatre paramètres relativement indépendants et ne produit pratiquement aucun scintillement en mode progressif. Bien que n'étant pas l'approche la plus rapide, la méthode d'Alchemy est la méthode qui maximise à la fois la qualité et la performance simultanément. Le problème principal de la méthode occultation ambiante basée sur l'horizon [BSD08] est principal lors de la mise en œuvre, qui consistait à obtenir des résultats raisonnables avec seulement huit échantillons. Alors que cette approche produit des résultats raisonnables avec seize échantillons (un modèle d'échantillonnage de 4×4), le faire fonctionner avec moins d'échantillons est comme un défi.

Nous produisons une vue d'ensemble dans le tableau 3.1. Le tableau liste la référence qui présente ou explique la méthode, le nom de la méthode, l'entrée requise par la méthode et une liste d'utilisations industrielles. Chaque entrée du tableau a une note associée qui explique les points clés de la méthode ou détaille des idées intéressantes de la référence.

Méthode	Entrée	Industrie
Crytek [Mit07].	Tampon de profondeur	Crysis (2007), Tomb Raider 2013
Description	Faire une approximation d'OA comme le rapport entre les points d'échantillonnage proches visibles et les points occlus s . Les échantillons choisis au hasard sont dans une sphère autour de p en coordonnées d'écran. Les auteurs révèlent en outre qu'un système intelligent (en fonction de la profondeur) nécessaire pour réduire le bruit.	
Starcraft II SSAO [FM08].	Tampon de profondeur Et tampon de normale	Starcraft II (2010)
Description	Similaire à [Mit07] les différences sont dans les détails. Le plus remarquable est ce point échantillons se trouve dans les coordonnées de monde et pas les coordonnées d'écran.	

Horizon Based Ambient Occlusion [BSD08].	Tampon de profondeur Et tampon de normale	Tomb Raider 2013
Description	L'OA approximative par la taille de l'horizon non occlus dans l'hémisphère défini par p et n (figure 3.9). La méthode Ray-Marching utilise le tampon de profondeur pour obtenir les estimations de l'horizon. En outre, les auteurs suggèrent l'étape du Ray-Marching de choisir des directions au hasard pour éviter le bruit systématique.	
Screen Space Ambient Occlusion using Temporal Coherence [MSM10].	Tampon de profondeur Et tampon de normale	Gears of War 2
Description	Présente l'idée de réutiliser les calculs d'OA des images précédentes afin de lisser le résultat total.	
Alchemy OA [MCG+11].	Tout requis par la méthode de base. Tampon OA (à partir de l'image précédente)	/
Description	Une méthode unique qui utilise une fonction pour obtenir une formule simple pour OA.	
Angle based SSAO [Mit12].	Tampon de profondeur Et tampon de normale	Toy Story 3
Description	Cette méthode est basée sur la recherche de l'angle libre de l'horizon comme dans [BSD08]. Cependant, elle est différente en ce qu'elle n'utilise pas de Ray Marching mais plutôt des paires d'échantillons projetées sur la surface de la scène.	

Table 3.1: Comparaison entre les différentes méthodes d'occultation ambiante en temps réel.

3.4.4 Classification des méthodes de SSAO

Dans cette partie nous présentons une classification des méthodes de SSAO vue dans la section 3.4. Nous classons les méthodes de SSAO en trois catégories différentes.

La première catégorie décrit les méthodes basées sur l'échantillonnage par point. Ces groupes de méthodes sont la clé de toutes les approches SSAO car elles sont les premières à populariser l'utilisation de SSAO. Ils sont basés sur un raisonnement intuitif et appliqués à plusieurs utilisations dans l'industrie. Même très utilisé dans les jeux vidéo de nos jours. Le principe de base est d'explorer les emplacements d'échantillons dans un volume autour de chaque point et d'utiliser le rapport des échantillons visibles aux échantillons occlus comme une approximation de SSAO. Pour autant que nous puissions le constater, les deux méthodes les plus populaires sont [Mit07] et [FM08].

La seconde catégorie décrit les méthodes basées sur l'horizon. Les méthodes OA basées sur l'horizon adoptent une approche algorithmiquement différente tout en produisant un résultat convaincant, et même des approximations de SSAO très populaires dans le domaine de l'infographie. Ils visent à trouver l'angle de l'horizon libre au lieu de rechercher directement les échantillons pour la visibilité. Par conséquent, ils sont intéressants à étudier et deux méthodes sont incluses dans la comparaison. La première

méthode [BSD08] présente l'approche par horizon et la seconde s'appuie sur le même concept mais est avec une implémentation différemment [Mit12].

La dernière catégorie basée sur la méthode l'Alchemy. Nous avons choisi de créer une catégorie uniquement pour la méthode de l'Alchemy [Mit12]. À certains termes, cette méthode partage de nombreuses similitudes avec l'échantillonnage ponctuel et les approches basées sur l'horizon, et pourtant, il semble tout à fait différent lorsqu'il est mis ensemble.

Toutes les méthodes de SSAO vue nécessitent des vecteurs unitaires uniformément répartis pour implémenter leurs modèles d'échantillons en utilisant le tampon de profondeur et le tampon de normale.

3.5 Conclusion

Tout au long de ce chapitre nous avons défini la méthode de l'occultation ambiante, ces avantages et ces inconvénients. Nous avons ensuite exposé la méthode de l'occultation ambiante dans l'espace écran (SSAO), puis nous avons discuté des différentes méthodes de SSAO existantes dans la littérature. À la fin de ce chapitre, nous avons proposé un bilan et une classification des différentes méthodes de SSAO existantes.

L'occultation ambiante dans l'espace objet est une approximation de l'illumination globale, c'est une simplification assez grossière de l'équation de rendu, elle ne peut pas être calculée en temps réel dans des scènes complexes. Cependant, la méthode l'occultation ambiante en espace écran est une technique qui est relativement peu coûteuse à calculer et à adapter à des applications en rendu temps réel, car elle est indépendante de la géométrie de la scène. L'inconvénient majeur de ces méthodes est le bruit dans les images causées la distribution aléatoire des échantillons autour de l'hémisphère. Ce bruit peut être éliminé soit par l'ajout d'une étape de filtrage soit par une meilleure distribution des échantillons autour de l'hémisphère.

Le chapitre 5 décrit la technique de calcul de SSAO que nous proposons dont l'objectif est d'assurer la visualisation surfacique avec une haute qualité en se basant sur les méthodes d'échantillonnage de Monte-Carlo avec l'exploitation du filtre bilatéral effectué sur le GPU.

Chapitre 4

Rendu d'ombre douce physiquement correcte en temps réel basée sur multiples PCF

4.1 Introduction

L'informatique graphique est concernée par la création et la gestion des différentes interactions entre la lumière et les objets d'une scène 3D. Les ombres douces sont calculées en utilisant des techniques d'éclairage direct ou indirect. Au cours de la dernière décennie, ces derniers ont connu une amélioration considérable, à la fois visuellement et en matière de temps de calcul. Dans ce chapitre nous nous intéressons aux ombres douces physiquement correctes calculées par les techniques d'éclairage direct.

Les ombres douces physiquement correctes dans des applications de synthèse d'images peuvent être simulées en prélevant et cumulant plusieurs échantillons de toute la source de lumière surfacique représentant chacune une source de lumière ponctuelle.

La technique proposée est inspirée par les travaux réalisés par Schwärzler et al. [Sch+12] et consiste à réduire le nombre d'échantillons de la source de lumière surfacique au maximum pour des ombres douces physiquement précises en temps réel. Notre contribution [Zer+14] consiste à subdiviser la lumière surfacique en un nombre d'échantillons plus réduit que celui de la méthode de Schwärzler et al. [Sch+12], et d'utiliser ensuite de multiples filtres PCF pour éliminer les artefacts et adoucir les ombres douces résultantes.

Dans ce chapitre, nous présentons les détails de la mise en œuvre; environnement, contraintes, structures, puis, nous exposons quelques résultats obtenus pour présenter la qualité et la performance de la technique proposée. Afin de valider notre contribution, une étude comparative est établie entre notre technique et d'autres, en mettant en valeur la réduction du nombre d'échantillons et l'utilisation de multiples filtres PCF.

4.2 Schéma général de la technique du rendu d'ombre douce physiquement correcte en temps réel basée sur multiples PCF

Dans cette section, nous décrivons notre contribution (figure 4.1) qui repose sur des cartes d'ombre associées à chaque source de lumière ponctuelle et qui repose aussi sur de multiples filtres PCF pour accélérer le calcul des ombres douces en rendu temps réel. La scène est représentée par un ensemble de triangles. D'abord, nous échantillons la source de lumière surfacique en n source de lumière ponctuelle, ensuite nous effectuons un rendu de la scène du point de vue de chaque source de lumière ponctuelle pour générer les cartes d'ombre, ensuite dans une autre passe de rendu, nous évaluons la valeur d'ombre douce, puis nous appliquons la technique proposée en utilisant de multiples filtres PCF pour adoucir les ombres résultantes. Finalement, nous appliquons un modèle d'ombrage pour éclairer la scène.

Le diagramme de la figure 1 montre un aperçu général de la technique proposée.

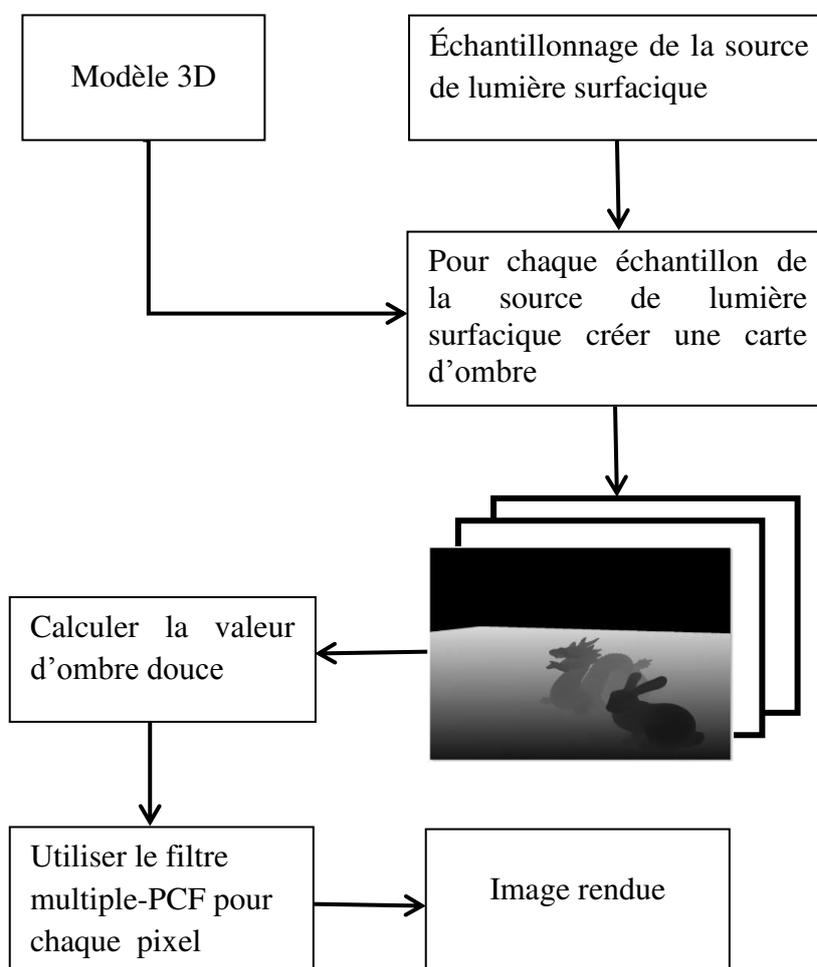


Figure 4.1: Vue d'ensemble de la technique proposée d'ombre douce utilisant multiples filtres PCF.

4.3 Description détaillée de la technique

Dans cette section, nous décrivons la technique qui fournit une solution des ombres douce physiquement correcte. L'algorithme 1 montre une vue d'ensemble de la solution proposée.

Nous allons générer des ombres douces physiquement correctes en s'appuyant sur l'échantillonnage adaptatif de la source de lumière et en utilisant l'algorithme du shadow mapping. L'algorithme général que nous voulons développer est comme suit :

Échantillonnage de la source de lumière étendue en N sources de lumière ponctuelle, pour chaque source de lumière, créer une carte de profondeur (carte d'ombre ou shadow map), une fois ces cartes de profondeur créées, dans une passe de rendu faire le test de profondeur, et pour finir on utilise un filtrage PCF adaptatif, générant ainsi une ombre douce physiquement correcte.

Algorithme 1: Technique générale de notre application

- 1: Échantillonnage de la source de lumière surfacique en N lumières ponctuelles ;
- 2: **Pour** chaque source de lumière ponctuelle **faire**
- 3: Générer une shadow map;
- 4: Rendre la scène du point de vue de la source de lumière ;
- 5: Sauvegarder cette shadow map (profondeur);
- 6: **Fin Pour**
- 7: Rendu de la scène du point de vue de la caméra
- 8: Avec un programme Shader faire le teste de profondeur.
- 9: Utiliser un filtrage avec Multiples PCF
- 10: Affichage sur écran

L'algorithme proposé est décomposé en deux étapes. La première étape consiste à placer la caméra dans la position de chaque lumière ponctuelle et de calculer les valeurs de profondeur de la scène, puis enregistrer ces valeurs de profondeur dans une shadow map. Si la source de lumière est subdivisée en n lumières ponctuelles, ainsi n shadows Map seront générées. La deuxième étape consiste à illuminer la scène et à générer l'ombre douce.

4.3.1 L'algorithme du Shadow Mapping

Le concept de shadow mapping comme décrit dans la section 2.4.3 du chapitre 2. L'idée de base de cet algorithme est d'effectuer deux rendus de la scène, du point de vue de la lumière et du point de vue de la caméra. Dans la première passe la scène est rendue du point de vue de la lumière et les valeurs de profondeur comme on les voit à partir de la source de lumière sont stockées dans une shadow map, et sont ensuite utilisées dans une seconde passe du rendu pour générer des ombres sur les objets.

4.3.2 Approximation d'ombres douces avec échantillonnage de la source de lumière surfacique

Dans cette sous section nous allons démontrer les origines de l'équation des ombres douces à partir de l'équation du rendu de Kajiya, puis montrer comment créer les ombres douces par la technique de subdivision de la source de lumière surfacique.

4.3.2.1 Simplification de l'équation du rendu pour des calculs d'ombres

Une source de lumière L est un ensemble de points l formant la surface de la lumière. Nous allons nous référer à ces points comme des échantillons de lumière (source). Pour le calcul de l'ombre, nous pouvons simplifier l'équation 1.17 du chapitre 1. Le terme $L_e(x, \omega_0)$ n'est pas d'une grande importance pour notre discussion parce qu'il n'y a pas d'interdépendance avec la scène. Nous pouvons simplement l'omettre et ajouter sa contribution dans la fin en pratique. Nous ne sommes intéressés que par l'illumination directe. Par conséquent, pour tous les points y de la scène, $L_o(y, y \rightarrow x)$ est zéro, sauf pour les emplacements y qui se trouvent sur une source lumineuse.

Nous supposons donc qu'il n'y a qu'une seule source de lumière surfacique (L) dans la scène, nous obtenons ainsi l'équation d'éclairage direct (avec des ombres): Ainsi l'équation 1.17 du chapitre 1 devient :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = \int_L f_r(x, x \rightarrow l, \omega_0) L_e(l, l \rightarrow x) G(x, l) V(x, l) dl \quad (4.1)$$

Où : $L_e(l, l \rightarrow x)$: est la radiance émise du point l de la source de lumière surfacique L .

Une autre simplification consiste à supposer que toutes les surfaces de la scène sont lambertienne (parfaitement diffus), ce qui provoque que la BRDF de devenir indépendant des directions, c.à.d. $f_r(x, x \rightarrow l, \omega_0) = \rho(x)/\pi$, où $\rho(x)$ désigne la réflectance. Comme une conséquence directe, la radiance sortant L_o aussi ne dépend plus de la direction sortante.

Par conséquent, nous obtenons l'équation suivante:

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = \frac{\rho(x)}{\pi} \int_L L_e(l, l \rightarrow x) G(x, l) V(x, l) dl \quad (4.2)$$

En pratique, cette équation peut être simplifiée davantage, si la distance de la lumière au récepteur est relativement grande (par rapport à l'angle solide de la lumière) et que la forme de la lumière est simple, alors le terme géométrique G varie peu. Cyril SOLER en 1998 [Sol98] montre que cette situation et l'hypothèse que la BRDF f_r est principalement diffuse, ensemble permettant l'approximation de la séparation de l'intégrale, ce qui signifie que l'on peut diviser l'intégrale sur le produit des deux fonctions G et L_e en un produit d'intégrales:

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = \underbrace{\frac{\rho(x)}{\pi} \int_L G(x, l) dl}_{\text{Ombrage (Shading)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{|L|} \int_L L_e(l, l \rightarrow x) V(x, l) dl}_{\text{Ombre (Shadow)}} \quad (4.3)$$

Fondamentalement, la simplification entraîne une séparation de l'ombrage (Shading) et des ombres (Shadow) [Sol98].

En outre, nous supposons généralement que la source lumineuse a une radiance directionnelle homogène sur sa surface, causant une radiance émise $L_c(l, l \rightarrow x)$ simplifier. Si la source lumineuse est uniformément colorée, elle se réduit à une constante L_c . Parce qu'une constante ne varie pas, on peut la sortir de l'intégrale. Ces hypothèses d'uniformité sur la position et la direction sont très courantes et aboutissent finalement à l'équation :

$$L_0(x \rightarrow \omega_0) = L_c \underbrace{\frac{\rho(x)}{\pi} \int_L G(x, l) dl}_{\text{Ombrage (Shading)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{|L|} \int_L V(x, l) dl}_{\text{Visibilité (Shadow)}} \quad (4.4)$$

Où :

- L'ombrage (The Shading) :

$$Shading = L_c \frac{\rho(x)}{\pi} \int_L G(x, l) dl \quad (4.5)$$

$V_L(x)$ est le facteur de visibilité au point x :

$$V_L(x) = \frac{1}{|L|} \int_L V(x, l) dl \quad (4.6)$$

Dans notre travail, nous nous intéressons qu'au facteur de visibilité $V_L(x)$ pour calculer l'ombre douce, par conséquent, déterminer la fraction de la source de lumière visible au point x de la scène. Généralement, pour les applications en temps réel, la détermination de l'intégrale dans l'équation (4.6) est ce que l'on entend par le calcul des ombres douces.

4.3.2.2 Calcul d'ombre douce

Il existe trois cas possibles pour un test de visibilité. Le premier cas est que la source de lumière est totalement cachée (zone ombre), deuxième cas où la lumière est totalement visible (zone éclairée) et le troisième cas où la source de lumière est partiellement cachée (zone pénombre) voir section 2.2.2 du chapitre 2.

Le calcul des ombres douces précis exige de résoudre l'intégration de l'équation (4.6). Cette intégrale est très complexe à résoudre analytiquement. C'est pourquoi, beaucoup d'efforts sont consacrés à la recherche de méthodes approximatives. Parmi ces méthodes, nous nous intéressons particulièrement aux méthodes stochastiques de l'illumination globale du type Monte-Carlo [Kaj86].

La méthode de Monte-Carlo est utilisée essentiellement pour estimer cette intégrale, par un procédé probabiliste. L'estimation de la fonction intégrale est obtenue par la moyenne pondérée des valeurs de la fonction en un ensemble de points échantillonnés d'une manière stochastique. Ainsi l'équation 4.6 devient :

$$V_L(x) = \frac{1}{|L|} \int_L V(x, l) dl$$

$$V_L(x) \approx \sum_i w_i V(x, l_i) \quad (4.7)$$

Démonstration :

Soit, $P(l_i) = \frac{1}{N}$ est la densité de probabilité uniforme (*PDF*); et N échantillons de (L)

1- Démontrer que $P(l_i) = \frac{1}{N}$ est une *PDF* :

Pour que $P(l_i)$ soit une *PDF* il faut que $P(l_i) \geq 0$ et que $\int_L p(l_i) dl = 1$

• $P(l_i) \geq 0$?

$P(l_i) = \frac{1}{N}$ est toujours positif car N représente le nombre d'échantillons le (L)

• $\int_L p(l_i) dl = 1$?

$$\int_0^N p(l_i) dl = \int_0^N \frac{1}{N} dl = \frac{1}{N} \int_0^N dl = \frac{1}{N} [l]_0^N = \frac{1}{N} (N-0) = \frac{N}{N} = 1$$

Donc :

$P(l_i) = \frac{1}{N}$ est une *PDF*

et $\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V(x, l_i)}{p(l_i)}$ est l'estimateur de Monte Carlo.

Nous avons :

$$V_L(x) = \int_L \frac{V(x, l) \cdot p(l) dl}{p(l)}$$

$$V_L(x) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V(x, l_i)}{p(l_i)}$$

$$V_L(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V(x, l_i)}{\frac{1}{N}}$$

$$V_L(x) = \sum_{i=1}^N V(x, l_i)$$

$$V_L(x) = \sum_{i=1}^N V(x, l_i) \quad (4.7)$$

Où la visibilité est seulement déterminée en N échantillons de lumière ponctuelle l_i (échantillon de la lumière $L \in L$ (Lumière) avec des poids associés w_i , où $\sum_i w_i = 1$. La moyenne pondérée de ces échantillons de visibilité est ensuite utilisée comme estimation du facteur de visibilité $V_L(x)$. Avec l'augmentation de nombre d'échantillons N , cet estimateur de Monte-Carlo converge vers la solution exacte.

4.3.2.3 Approximation de la source de lumière surfacique pour le calcul d'ombre douce

Comme nous l'avons dit, une source lumineuse surfacique peut être approximée par N différents échantillons de source de lumière ponctuelle, donc il faut produire N cartes d'ombre pour générer une ombre douce. Une carte d'ombre nous permet d'évaluer pour chaque fragment de l'espace écran s'il est éclairé par sa lumière ponctuelle associée. Pour déterminer si le point x est dans la zone de l'ombre ou dans la zone de la lumière, un test de visibilité V est nécessaire.

$$V(x, l_i) = \begin{cases} 0, & \text{éclairé par la lumière ponctuelle } i \\ 1, & \text{dans l'ombre de la lumière ponctuelle } i \end{cases} \quad (4.8)$$

Où $V(x, l_i)$: est le résultat mutuel du test de visibilité d'ombre dur générée par la carte d'ombre i du point de vue de la lumière l_i au point x du fragment d'espace à l'écran. L'échantillonnage de la source de lumière surfacique par N point de lumière nous permet de produire une ombre douce. Cette ombre douce peut être estimée par la proportion S_n de cartes d'ombre.

$$S_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(x, l_i) \quad (4.9)$$

4.3.2.4 Subdivision de la lumière surfacique

Pour simplifier, nous supposons une source de lumière surfacique carrée. La première étape consiste toujours à subdiviser la source de lumière surfacique en quatre lumières ponctuelles initiales dans les coins de la lumière surfacique carrée. Si cette lumière surfacique a besoin d'être subdivisé (voir section 4.3.3.2), alors d'autres lumières ponctuelles vont être créées. La lumière est subdivisée à chaque besoin en n lumières ponctuelles (voir figure 4.2). Nous proposons une technique de subdivision uniforme de la source de lumière. Si une subdivision est nécessaire, le rectangle est divisé en suivant l'équation 4.10 en sous-quads, et de nouvelles sources de lumière ponctuelles sont générées (voir figure 4.2).

$$n = k^2 \quad (4.10)$$

Où $k \times k$ est le noyau de subdivision uniforme, $k \geq 2$.

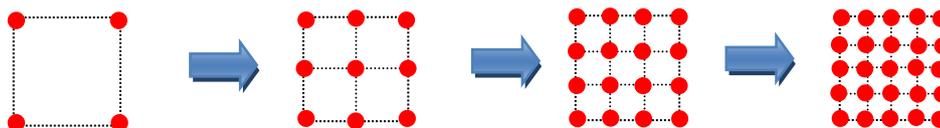


Figure 4.2: Subdiviser une source de lumière surfacique par notre stratégie d'échantillonnage.

4.3.3 Raffinement adaptatif de la densité d'échantillonnage

La génération des ombres douces avec de multiples shadows map par la lumière surfacique est informatiquement coûteuse en raison de la densité d'échantillonnage élevée qui est nécessaire pour rendre des régions lisses. Si la densité est trop faible, des artefacts vont probablement apparaître, et le système visuel humain ne perçoit pas plus une ombre douce, mais plusieurs ombres dures.

4.3.3.1 Génération des cartes d'ombre

La première étape de notre algorithme est de créer les cartes d'ombre initiales aux coins de la source lumineuse surfacique. Ce sont les seules cartes d'ombre qui sont toujours produites; toutes les autres sont uniquement calculés au besoin (voir la section 4.3.3.2).

Dans la suite, les shadows map sont produites à partir de chaque lumière ponctuelle (échantillon) en utilisant la technique de shadow mapping avec une projection perspective.

Après avoir subdivisé la lumière surfacique en un ensemble de n de lumières ponctuelles, pour chaque lumière ponctuelle une carte d'ombre (shadow map) est créée, donc n cartes d'ombre seront créées, et des cartes d'ombre supplémentaire peuvent être créées si nécessaire.

La génération des ombres douces avec de multiples shadows map par la lumière est informatiquement coûteuse en raison de la densité d'échantillonnage élevée qui est nécessaire pour rendre des régions lisses. Si la densité est trop faible, des artefacts vont probablement apparaître, et le système visuel humain ne perçoit pas plus une ombre douce, mais plusieurs ombres dures.

4.3.3.2 Évaluation de subdivision

Après avoir créé des points d'échantillonnage initiaux, il est important de vérifier l'existence des artefacts. Dans le travail proposé nous nous sommes inspiré de la méthode de Fernando [Fer05] où il calcule la taille de la zone de pénombre ($W_{pénombre}$) en fonction de la taille de la lumière surfacique ($W_{lumière}$) et de sa position par rapport au sol (Z_r) et à l'occulteur (Z_o). Nous proposons de calculer la distance entre deux sources de lumière ponctuelles successive W_d (voir équation 4.12) qui représente la distance que nous cherchons (voir figure 4.3). Cette distance W_d dépend de la taille et de la position de la lumière surfacique.

$$W_{pénombre} = \frac{Z_r - Z_o}{Z_o} W_{lumière} \quad (4.11)$$

Et

$$W_d = \frac{Z_r - Z_o}{Z_o} L \quad (4.12)$$

Où Z_o et Z_r sont les distances de la lumière par rapport au dispositif d'occultation (occultant) et du récepteur d'ombre (receveur), respectivement, et où $W_{lumière}$ désigne la taille de la source lumineuse (voir Figure 4.3).

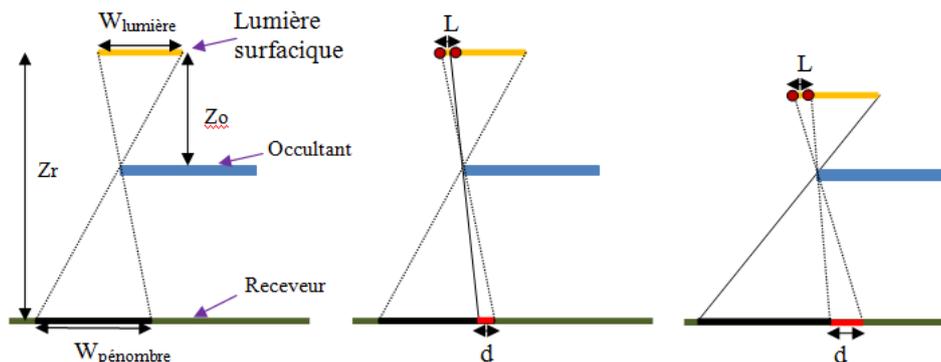


Figure 4.3: Le calcul de la taille de la pénombre dans une configuration générale. (À gauche) la méthode de Fernando [Fer05]. (Au milieu et à droite la technique proposée).

Afin d'évaluer rapidement le besoin de subdivision, nous exploitons l'existence des artefacts qui dépendent de la longueur W_d . Si W_d est inférieur ou égal à la taille d'un pixel cela signifie qu'aucun artefact n'est visible, et si W_d est supérieur à plus de deux fois de la taille d'un pixel alors source de lumière surfacique a besoin d'être subdivisé davantage comme expliqué dans la section 4.3.2.4. La technique proposée consiste à laisser quelques artefacts apparaître. Si quelques artefacts apparaissent dans l'ombre, nous utilisons la technique proposée du filtre multi PCF afin adoucir les bords des ombres. Pour chaque shadow map, nous cherchons les valeurs de profondeur voisines du fragment en cours de traitement et nous calculons sa moyenne. Dans notre travail nous utilisant un filtre PCF avec un noyau de 3×3 pour chaque source de lumière ponctuelle.

4.3.3.3 Produire des points d'échantillonnage additionnels

Si l'épate de l'évaluation de la subdivision propose de créer encore un autre niveau de raffinement supplémentaire sur la source lumineuse surfacique, de nouveaux points d'échantillonnage (et les cartes d'ombre correspondantes) doivent être créés (section 4.3.2.4). Dans le cas d'une source lumineuse surfacique carrée bidimensionnel, nous proposons d'employer l'équation 4.10 pour la subdivision. La source lumineuse surfacique est subdivisée à nouveau et de nouvelles shadows map sont produites (voir figure 4.2).

Pour le nouveau niveau de subdivision, la procédure entière est répétée encore. Des cartes d'ombre sont produites à partir de nouvelles positions de points d'échantillonnage.

Pour le nouveau niveau de subdivision, toute la procédure est répétée à nouveau: les cartes d'ombre sont générées à partir des positions des nouveaux points d'échantillonnage, et sont comparées à leurs voisins quadruples. Ce processus de raffinement est répété jusqu'à ce que la densité d'échantillonnage soit suffisamment élevée dans toutes les zones pour remplir la condition définie à la section 4.3.3.2, ou qu'un nombre maximum prédéfini de cartes d'ombre sont créé.

4.3.4 Évaluation de l'information de carte d'ombre

Après le calcul des cartes d'ombre, leur contribution doit être évaluée dans une passe de rendu. Cette étape est principalement semblable à la seconde passe de rendu dans l'algorithme de la carte ombre standard. Les difficultés peuvent toujours surgir en raison des profondeurs différentes de subdivision (section 4.3.4.1) et en raison du grand nombre de textures de profondeur qui doivent être échantillonnées (section 4.3.4.2).

4.3.4.1 Affectation des poids de contribution de carte d'ombre

Si toutes les cartes d'ombre produites avec notre stratégie de raffinement contribuent à la solution finale d'ombre douce avec le même poids, l'obscurité de la pénombre peut parfois changer un peu de la solution exacte, si la distribution des points d'échantillonnage adaptatif choisi varie considérablement. Nous mettons donc des poids sur les points échantillonnés: dans les surfaces ayant trop subdivision, les différents échantillons sont attribués à un plus petit poids, et ne contribueront pas autant à l'obscurité de la pénombre que celui avec un grand poids.

En cas de source lumineuse surfacique qui est subdivisée comme proposée dans la section 4.3.2.4, les poids w_i attribués à la $i^{\text{ème}}$ carte d'ombre est calculé avec :

$$w_i = \frac{1}{k^2} \quad (4.13)$$

Où k^2 est le nombre d'échantillons. La somme de tous les poids est 1. Autrement, les poids doivent être normalisés pour s'assurer que les cumuls finaux d'ombre se trouvent entre 0 (entièrement visible) et 1 (entièrement ombré).

4.3.4.2 Visualisation d'ombre douce en utilisant n cartes d'ombre

Pour calculer des ombres douces, l'information de toutes les cartes d'ombre produites doit être vérifiée pour chaque pixel de l'espace écran. Les valeurs d'ombre dures du test (0 ou 1) de toutes les cartes d'ombre i sont multipliés avec leurs poids w_i et additionnées, le résultat est considéré comme une évaluation pour le pourcentage de l'occultation. Si le nombre de cartes d'ombre est élevé, ceci peut mener aux problèmes dû à la quantité limitée de textures qui peuvent être échantillonnées dans une passe simple de rendu.

Une manière de résoudre ceci consiste à utiliser la technique de *deferred rendering* présenté par [Dee+88] appelée aussi tampon d'accumulation, qui est un tampon du Frame buffer avec une voie de transmission de données simples. Pour chaque carte d'ombre, nous rendons la scène dans une passe de rendu séparé. Au lieu d'utiliser directement la valeur d'ombre dur obtenue d'un fragment $f(x,y)$ de l'espace écran pour l'illumination, nous la multiplions avec son poids et l'ajoutons au tampon d'accumulation à la position $f_{acc}(x,y)$. Une passe préliminaire de profondeur aide à s'assurer que seulement les valeurs d'ombre visibles des fragments visibles contribuent au tampon d'accumulation.

Après n passes de rendu, toutes les cartes d'ombre sont évaluées, et le tampon d'accumulation est rempli. Maintenant, dans une passe finale de rendu, la scène est illuminée: pour chaque fragment de l'espace d'écran $f(x,y)$, la valeur du tampon

d'accumulation correspondante $f_{acc}(x,y)$ est échantillonnée et employée comme pourcentage d'occultation. Étant donné que le matériel graphique courant ne prend pas en charge les opérations de lecture et d'écriture les cibles du rendu en même temps, deux instances du tampon d'accumulation doivent être créés et permutés à chaque trame rendue, entraînant un besoin supplémentaire de mémoire sur le GPU.

Alternativement, l'introduction de ce qu'on appelle tableaux de texture (Texture Arrays) dans API graphiques permet d'envoyer jusqu'à 512 textures avec les mêmes tailles et le format au shader, où elles peuvent être échantillonnées arbitrairement. Cette fonctionnalité est parfaitement adaptée à nos besoins, car elle nous permet d'échantillonner de nombreuses cartes d'ombre à partir de la même instance de pixel shader. La valeur de l'occultation du fragment courant peut donc être obtenue sans avoir besoin de passes supplémentaires, sauvegardant n opérations de lecture et écriture.

4.3.4.3 Filtrage par multiples PCF

Si peu de cartes d'ombre sont produites, les bandes d'artefacts vont devenir visibles. Les problèmes semblables se posent si la caméra est très près d'une pénombre, de sorte que le nombre maximum des cartes d'ombre ne soit pas suffisant pour produire une région attrayante de pénombre.

Afin d'améliorer la douceur des transitions entre les cartes d'ombre, nous proposons donc de les échantillonner en utilisant un petit filtre dans de telles situations. Le filtrage de PCF adoucit les frontières d'ombre.

Comme l'approche PCF classique, nous appliquons un filtre de reconstruction et de ré-échantillonnage à la zone de valeurs de pixels. En s'inspirant de l'équation 4.9, et étant donné un point p pour effectuer la recherche et un noyau de filtre bidimensionnel f , la valeur de visibilité filtrée de S_N . Notre algorithme multi-PCF utilise plusieurs résultats PCF (voir figure 4.4) à partir des sommets de la source de lumière surfacique. Le facteur de visibilité est estimé en tant que valeur moyenne:

$$V_{p,S_N} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_{p,v_i} \quad (4.14)$$

Où m est le nombre de sources de lumière ponctuelle visible au point p .

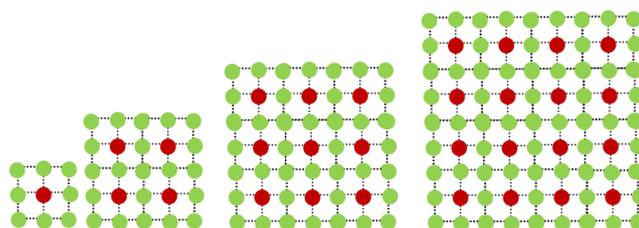


Figure 4.4 : Multiples filtres PCF (avec un noyau de 3×3) appliqué à chaque source de lumière ponctuelle.

4.4 Résultats et évaluation

Pour évaluer la technique proposée, nous avons utilisé une machine dotée d'un processeur Intel (R) Core (TM) i7-7700K @ 4,20 GHz, Nvidia GeForce GTX 1070 / PCIe / SSE2, avec 32 GBRAM sur un système d'exploitation Microsoft Windows 8.1 64 bits utilisant OpenGL 4.5. Pour comparer nos résultats, nous avons choisi le critère standard de FPS (Frame Par Second) et le calcul du temps pour la génération d'une image. Les changements de performance sont mesurés en faisant varier le nombre de noyaux d'échantillonnage de la source de lumière de 4 à 256. Toutes les images générées ont une définition de 1024 × 1024 et une taille de carte d'ombre de 1024 × 1024.

Nous avons évalué la technique proposée en utilisant la métrique RMSE (*Root Mean Square Error*) [WM05]. Nous validons qualitativement et quantitativement nos résultats sur des images de scènes en rendu en temps réel. Nos scènes de tests, qui contiennent divers objets, sont illustrées dans [Sta96; McG17].

Nous présentons quelques résultats obtenus avec la technique proposée du rendu des ombres douces physiquement correctes basée sur l'échantillonnage de la source de lumière surfacique pour valider la qualité et l'efficacité de l'utilisation multiples filtres PCF à chaque source de lumière ponctuelle. Pour accélérer le processus de rendu, nous avons utilisé un seul éclairage indirect par rebond. Nous comparons nos images générées par la technique proposée et les images générées avec la méthode décrite dans [Sch+12], à l'image de référence (Ground Truth) calculée en utilisant une source de lumière surfacique de 256 échantillons.

4.4.1 Résultats visuels

Dans cette partie, nous présentons ci-après les résultats de notre algorithme sur différentes scènes en utilisant des différentes configurations. Nous testons également la validité de la technique proposée en matière de qualité et de temps de calcul et nous discutons enfin des points forts et faibles en utilisant des métriques perceptuelles.

Pour vérifier la précision de la technique proposée, nous comparons les résultats finaux obtenus par notre technique à des images synthétisées par la méthode de Schwarzwler [Sch+12].

La figure 4.5 à gauche est le résultat de la méthode de Schwarzwler qui montre le modèle Bunny éclairés par une lumière surfacique approximée par 9 lumières ponctuelles, nous pouvons bien percevoir des artefacts visibles sur les bords de l'ombre et avec un FPS égal à 24. La technique proposée (image à droite) utilise une seule lumière ponctuelle en un filtre PCF, cependant, ne coûte que 9 FPS pour obtenir une image tout en conservant la douceur de l'ombre. La qualité visuelle démontre clairement l'efficacité de notre technique rendue avec seulement une seule lumière ponctuelle.

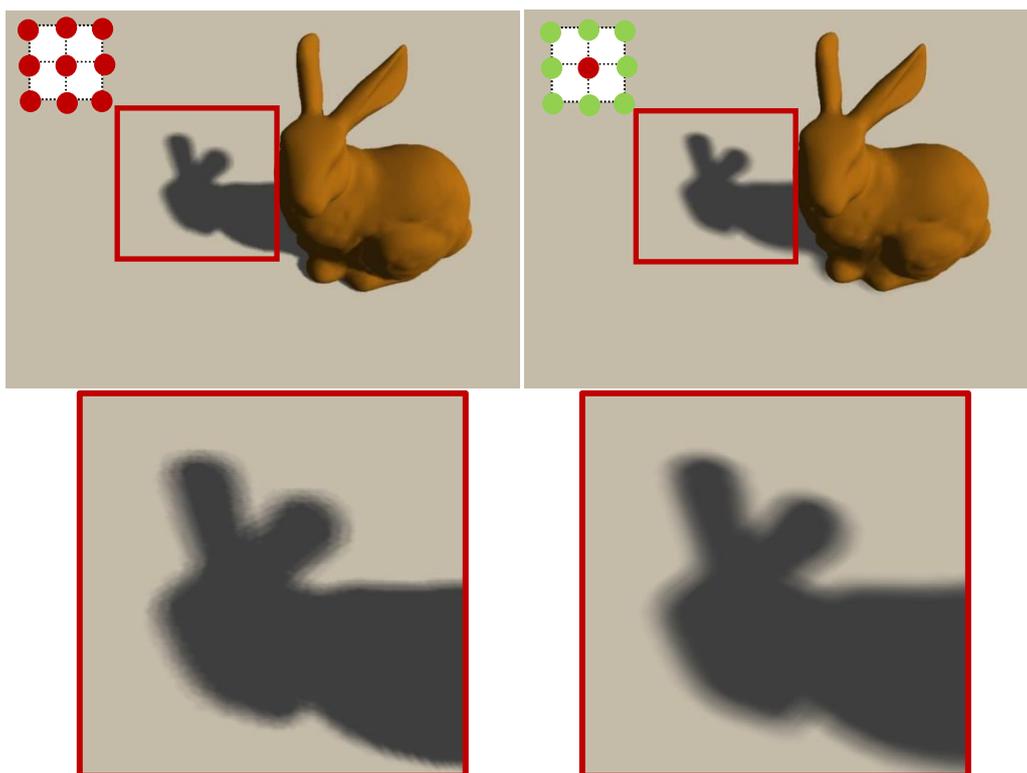


Figure 4.5 : Comparaison visuelle. L'image de gauche est créée par la méthode de [Sch+12]: lumière surfacique échantillonnée en 9 échantillons et sans filtre (FPS=9). L'image de droite est créée par notre technique: une seule lumière ponctuelle avec un simple filtre PCF (FPS=24).

Dans la figure 4.6, nous comparons la qualité de l'image du modèle Bunny éclairée par une lumière surfacique, en utilisant la technique proposée et la méthode de Schwarözler. L'image générée par la méthode Schwarözler utilise une lumière surfacique échantillonnée par 49 échantillons (49 cartes d'ombre) et avec un FPS égal à 1. L'image générée par la technique proposée multiples PCF utilise une lumière surfacique échantillonnée par 16 échantillons (16 cartes d'ombres), et avec un FPS égal à 5.

Comme nous pouvons le voir dans la figure 4.6 à gauche, des artefacts peut visibles existent lors de l'utilisation de 49 échantillonnés. L'utilisation de la technique proposée multiples PCF (figure 4.6 à droite) réduira les artefacts au détriment de l'augmentation du temps de rendu. Par conséquent, la qualité visuelle de notre solution proposée avec seulement quelques cartes d'ombre est presque identique aux images avec une quantité significativement plus élevée de cartes d'ombre. Afin de valider notre technique, nous calculons aussi l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre ces deux images qui est de 0.0037, ce qui signifie que les deux images de la figure 4.6 sont presque identiques.

Nous avons réduit le nombre d'échantillons de 49 échantillons à 16 échantillons où les multiples filtres PCF ont remplacé les effets des cartes d'ombres dans notre algorithme, ce qui nous a permis d'éviter un nombre important de passes de rendu qui conduit directement à une diminution significative du temps de calcul.

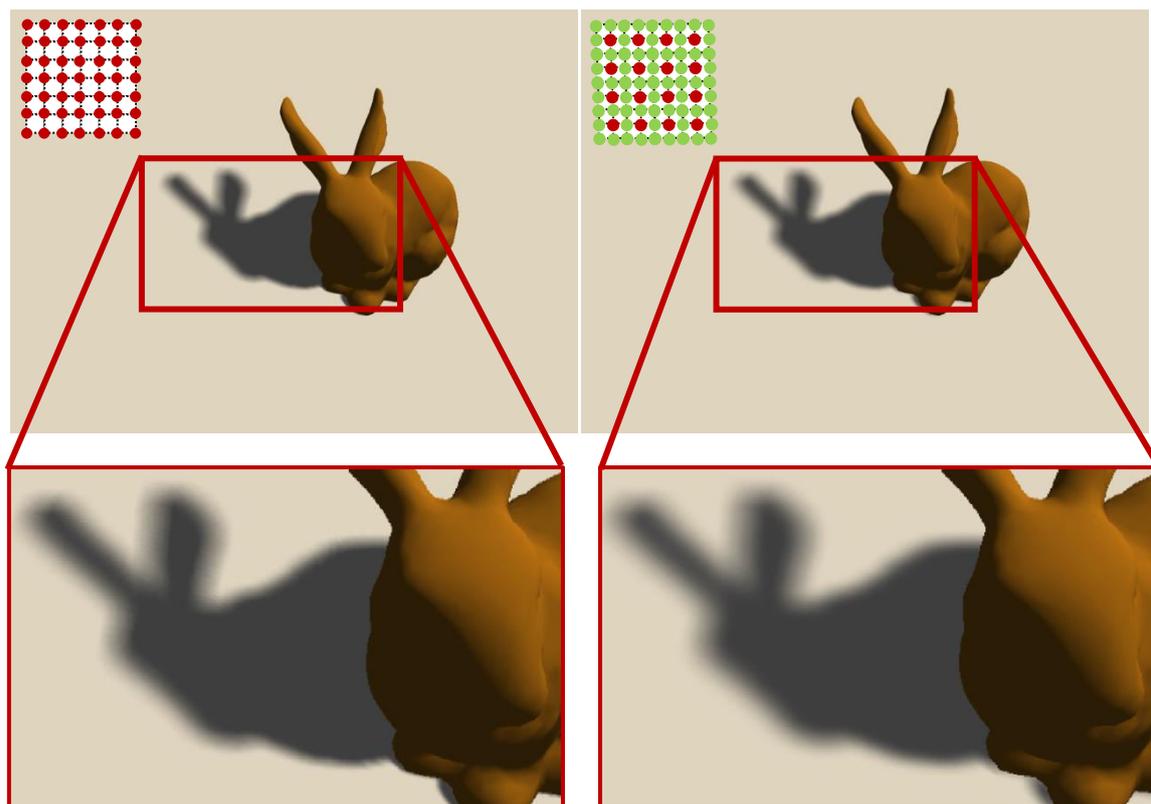


Figure 4.6: Une scène rendue en utilisant notre technique et la méthode de [Sch+12]. Image à gauche résultats de la méthode de [Sch+12]: lumière surfacique échantillonnée en 49 échantillons (FPS=1). Image à droite résultat de la technique proposée: lumière surfacique échantillonnée en 16 échantillons (FPS=5).

Pour mieux visualiser nos images, nous avons affiché uniquement l'ombre de l'objet dans la scène des figures 4.7 et figures 4.8.



Figure 4.7: Comparaison visuelle entre notre résultat et l'image de référence. Image à gauche : image agissant comme Ground Truth avec 225 échantillons (4 secondes). Image au milieu : la technique proposée avec 36 échantillons et avec multiples PCF (0.33 secondes). Image à droite : image de différence entre l'image Ground Truth et l'image générée par la technique proposée.

Dans la figure 4.7, nous comparons la qualité de l'image de la technique proposée avec une image de référence qui est considéré comme le cas idéal pour nos comparaisons. L'image de référence est générée en utilisant une lumière surfacique échantillonnée par 225 échantillons (225 cartes d'ombre) et avec un temps de calcul égal à 4 secondes.

L'image générée par la technique proposée multiples PCF utilise une lumière surfacique échantillonnée que par 36 échantillons (36 cartes d'ombres), et un temps de calcul égal à 0.33 secondes. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre ces deux images est de 0.011. Cependant, la technique proposée peut générer des résultats presque identiques que l'image de référence en utilisant seulement 36 échantillons (figure 4.7 au milieu), ce qui tend à réduire la variation de l'intensité de la surface. Comparé à 225 échantillons, notre technique réalise une accélération de 13 fois en utilisant 36 échantillons.

Nous pouvons juger que nos résultats sont satisfaisants car, ils sont interactifs (0.33 secondes qui équivalent à un FPS =3), ils ont une bonne qualité visuelle et sont proches des images de références.

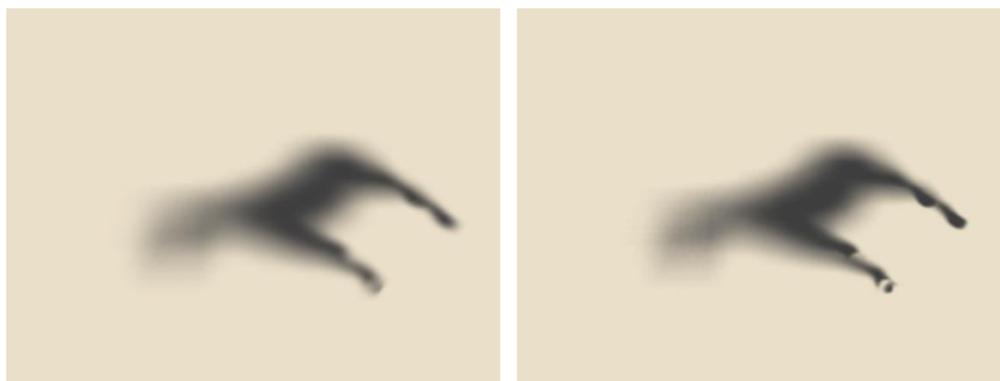


Figure 4.8: Comparaison visuelle entre la technique proposée et l'image créée par la méthode de Schwarzwler. Image à gauche: notre technique qui utilise 36 échantillons (36 cartes d'ombre) avec un FPS =3. Image à droite : image résultat avec la méthode de Schwarzwler avec un échantillonnage régulier en utilisant 81 échantillons (cartes d'ombre), et avec un FPS=1.

Les figures 4.6, figures 4.7, figures 4.8 et figures 4.9 montrent une comparaison entre notre technique (figure 4.8 à gauche) et avec la méthode de Michael Schwarzwler et al. [Sch+12] (figure 4.8 à droite). Il est clair que la technique proposée est plus rapide que celle de Michael Schwarzwler, est même la qualité des ombres douces de la technique proposée est plus meilleure et nette que celle de Michael Schwarzwler. Le résultat semble mieux avec notre technique de multiples PCF qui donne des images plus importantes et même plus rapides.

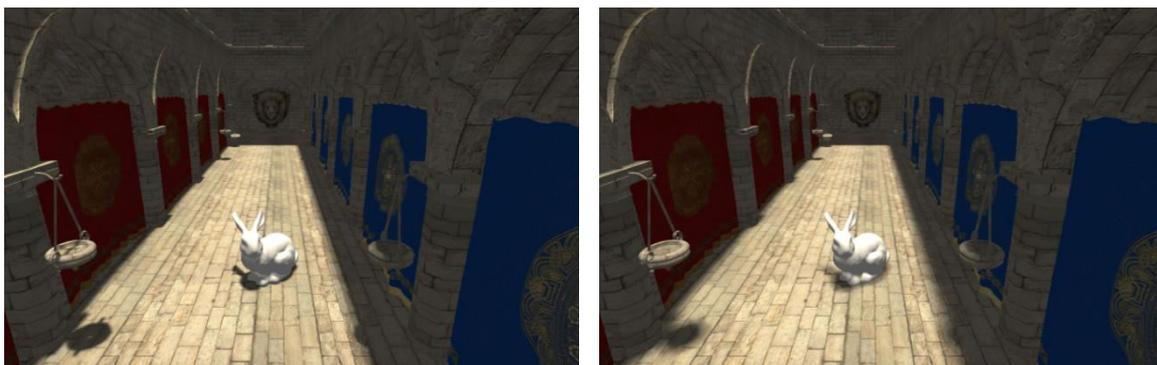


Figure 4.9: La scène Sponza rendu avec deux configurations différentes. Image à gauche est rendue par la méthode de Michael Schwärzler, qui utilise 9 lumières ponctuelles avec un FPS = 14. Image à droite est rendue par la technique proposée et utilise 4 lumières ponctuelles avec un FPS = 21.

4.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter une nouvelle technique de création d'ombres douces physiquement correctes en rendu temps réel à haute performance qui est adaptée aux exigences récentes en termes de qualité visuelle et interactivité. Nous avons montré la possibilité d'accélération du processus d'extraction grâce à l'exploitation des opportunités de calcul des GPU plus particulièrement les filtres. En effet, l'utilisation de multiples filtres PCF dans le rendu des ombres douces permet de réduire un nombre important de cartes d'ombre et d'accélérer le calcul. Au cours de nos diverses expérimentations nous avons montré que la technique proposée est plus efficace en termes de temps du rendu que celle de la méthode de Schwärzler.

Chapitre 5

Occultation ambiante dans l'espace écran basée sur l'échantillonnage préférentiel multiple

5.1 Introduction

L'occultation ambiante est une méthode non physique qui tente d'approximer la quantité de lumière indirecte qui atteint un point en fonction des occulteurs environnants, sans tenir compte des inter-réflexions (voir la section 3.2.4 du chapitre 3). Deux approches principales sont utilisées pour l'approximation de l'occultation ambiante de scènes complexes et dynamiques; les méthodes basées sur l'objet et les méthodes basées sur l'image. Les méthodes de l'espace objet produisent des résultats stables et de haute qualité, mais ces techniques ne sont pas adaptées aux applications temps réel. D'un autre côté, les méthodes basées sur l'image introduisent un compromis entre qualité et performance. Ils produisent des résultats raisonnablement convaincants et offrent des temps du rendu interactif car ils sont découplés de la complexité de la scène, en utilisant des informations déjà stockées dans le G-Buffer.

En général, les techniques de l'espace image utilisent des tampons à partir des vues disponibles, tel que le G-buffer ou des cartes d'ombre pour obtenir des informations relatives à un point de l'espace monde et à sa géométrie environnante. Typiquement, des échantillons au voisinage d'un point sont projetés sur les tampons et les emplacements de l'espace image résultants dérivés à travers un point de vue de la carte de profondeur constituent une reconstruction approximative de la géométrie. Les informations récupérées sont utilisées dans le calcul de l'occultation ambiante dans l'espace écran.

La technique d'occultation ambiante dans l'espace écran est dans la pratique une méthode d'atténuation de la lumière ambiante et des ombres douces dans le rendu en temps réel. Bien que des recherches approfondies aient été menées pour améliorer la qualité et la performance des techniques d'OA dans l'espace écran, les artefacts dépendant du nombre d'échantillons restent un problème majeur. Ceci est principalement dû à l'absence

d'occulteurs, invisible dans les tampons d'image de la vue courante (à l'intérieur et à l'extérieur de la pyramide de vue). Ces artefacts se manifestent sous la forme d'ombres qui apparaissent au fur et à mesure que la caméra bouge.

Dans ce chapitre, nous présentons notre deuxième contribution qui consiste en une technique accélérée à l'aide des méthodes de Monte-Carlo, elle est capable de visualiser efficacement des détails de la scène 3D là où la lumière directe n'atteint pas les objets, et aussi d'améliorer la qualité des ombres douces générées en temps réel. La technique proposée améliore et stabilise l'estimation d'OA dans l'espace écran sans surestimer les résultats et peut-être comparer avec une variété de techniques d'OA dans l'espace écran.

5.2 Présentation de la technique

Tout d'abord, la scène est rendue depuis le point de vue de la caméra, puis nous créons un G-Buffer, qui contient les normales, les positions et les couleurs de tous les points visibles et calculons la valeur SSAO à chaque point. Ensuite, nous appliquons un modèle d'ombrage et finalement, nous filtrons le résultat pour éliminer le bruit.

Le diagramme de la figure 5.1 montre un aperçu général de la technique proposée, qui nécessite trois programmes de shaders: un shader pour générer le G-Buffer, un shader qui calcule la valeur de SSAO et l'ombrage, et un shader pour l'étape de filtrage. Les étapes sont détaillées dans la section 5.3.

Enfin, nous appliquons et démontrons nos techniques de réduction de la variance aux algorithmes d'occultation ambiante dans l'espace écran tel que l'Alchemy Ambient Obscurance [McG+11], l'occultation ambiante de l'écran écran (SSAO) [Mit12] et l'occultation ambiante basée sur l'horizon (HBAO) [BSD08], cependant la technique peut être appliquée à d'autres techniques similaires.

Pour résumer, nos contributions dans ce chapitre sont:

- Une méthode générique pour réduire le nombre d'échantillons et minimiser les artefacts dépendant des techniques d'occultation ambiante de l'espace écran, qui estime l'importance de la distribution des échantillons et réduit les erreurs dans l'estimation finale de l'occultation.
- Un algorithme d'échantillonnage axé sur l'échantillonnage préférentiel multiple (EPM) [ZB18], pour la distribution d'échantillons, capable de réduire les temps du rendu de manière significative sans sacrifier la qualité finale.
- Un algorithme d'échantillonnage basé sur l'échantillonnage stratifié et l'échantillonnage par importance [Zer+16], capable d'améliorer significative la qualité des images sans perte de performance.

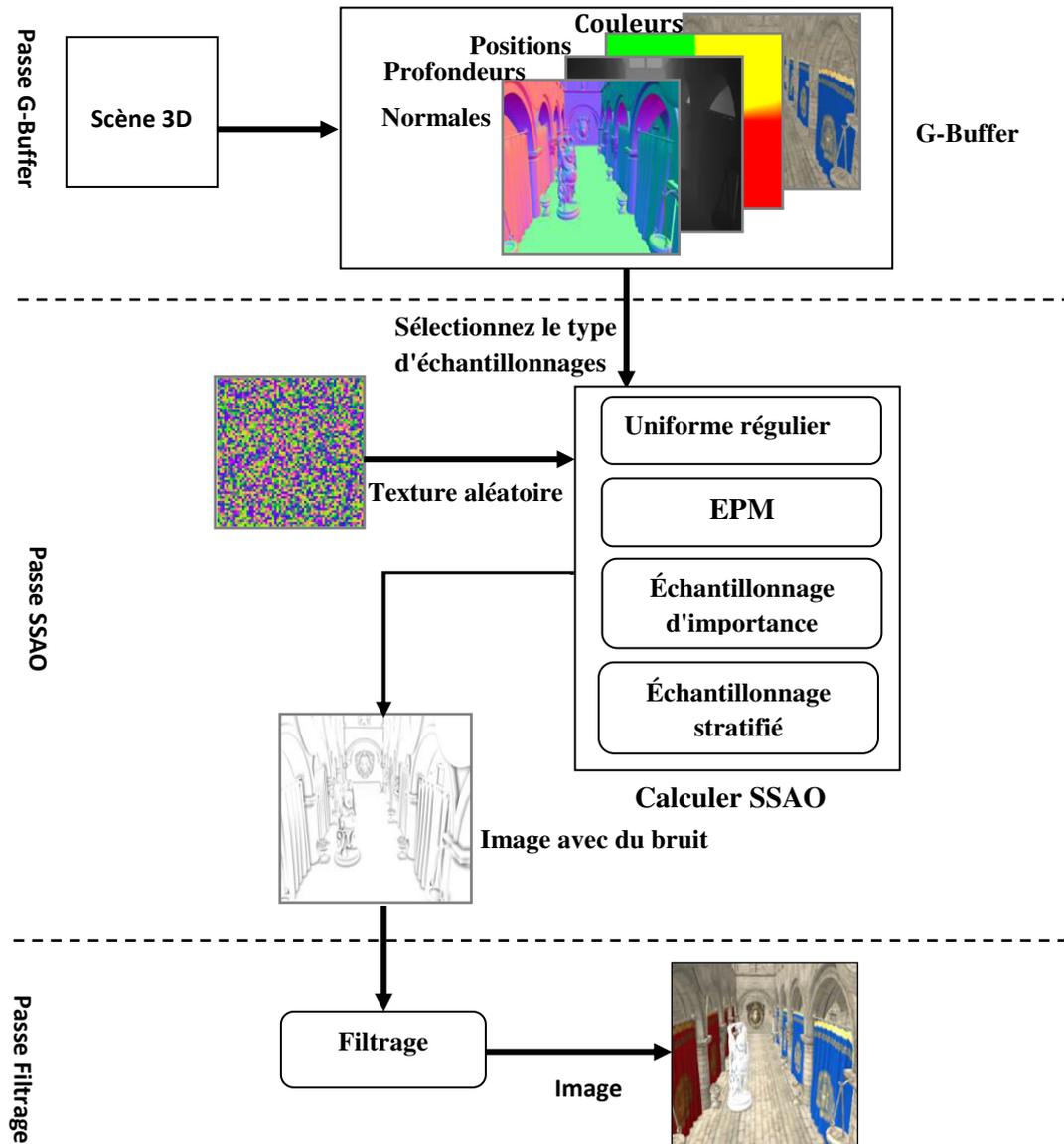


Figure 5.1: Vue d'ensemble de notre technique SSAO en utilisant différents types de méthodes de réduction de la variance.

5.3 Description de la technique

L'algorithme 1 montre une vue d'ensemble de la solution proposée. Nous présentons nos stratégies pour l'échantillonnage de l'hémisphère et, plus important encore, nos critères d'évaluation d'échantillonnage. De plus, nous discutons des moyens possibles de réduire les quantités (potentiellement) significatives d'échantillonnage du noyau. Nous commençons par une description de l'algorithme proposé. Ensuite, nous résumons les termes clés et les équations utilisées pour calculer l'approximation de l'éclairage indirect et générons les ombres douces.

Algorithme 1: Technique générale de notre application

- 1: Première passe de rendu: générer le G-Buffer à partir de la vue de la caméra
- 2: Deuxième passe de rendu: calculer SSAO et l'ombrage
- 3: **Pour** chaque fragment visible de la scène **faire**
- 4: Générer un noyau d'échantillon
- 5: Récupérer la géométrie (profondeur, normale ...)
- 6: Calculer le facteur SSAO
- 7: Choisir un modèle d'éclairage
- 8: Enregistrer le résultat dans une texture.
- 9: **Fin Pour;**
- 10: Troisième passe de rendu: l'étape de lissage.

5.3.1 Première passe de rendu: générer le G-Buffer

Le rendu différé (G-buffer) est une approche très intéressante qui réduit le nombre d'objets, et en particulier le nombre total de fragments, et effectue les calculs de l'éclairage sur les pixels dans l'écran, utilisant ainsi la taille de la résolution au lieu du nombre total de fragments.

Cette passe vise à approximer la géométrie 3D vers des textures 2D en utilisant une capacité d'OpenGL appelée multiple cible du rendu (Multiple Render Targets (MRT)). Chaque géométrie est rendue, mais sans ombrage, sur plusieurs tampons de l'espace écran utilisant plusieurs cibles du rendu. En particulier, la profondeur, la normale et la couleur sont toutes écrites dans des tampons séparés (voir la figure 5.2). Ces tampons sont ensuite combinés pour fournir suffisamment d'informations pour chaque lumière afin d'éclairer les pixels.

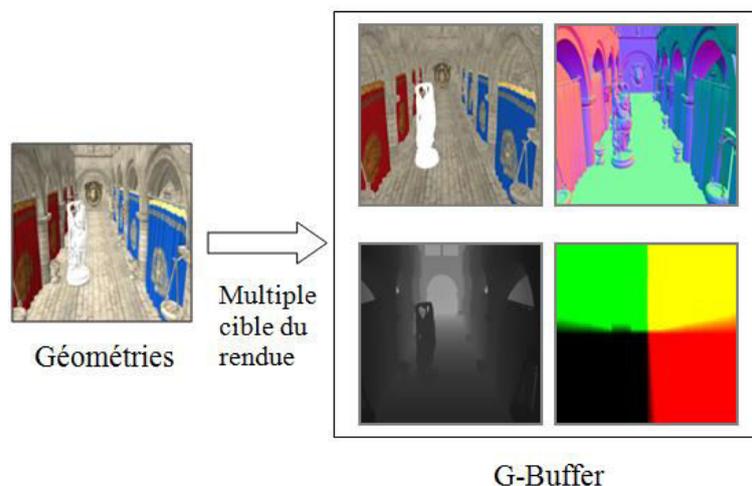


Figure 5.2: Le processus du G-Buffer.

Dans une passe de post-traitement et à partir de la position de la caméra dans la scène, nous sauvegardons les informations de profondeur, la position, la normale et la couleur dans le Frame Buffer (MRT) sous différentes textures. Ensuite, nous calculons le G-Buffer en utilisant un programme de shader. Ces valeurs seront communiquées aux étapes suivantes sous la forme d'une variable du type uniform (en GLSL). Ensuite, nous utilisons cette information pour le calcul de SSAO, l'éclairage et le filtrage dans de différentes passes de rendu. Cette passe de rendu est entièrement implémentée dans le GPU.

5.3.2 Deuxième passe de rendu: Calculer SSAO et l'ombrage

5.3.2.1 Générer un noyau d'échantillon basé sur des estimateurs de Monte-Carlo

Nous voulons produire des échantillons qui sont distribués dans un hémisphère orienté autour de la normale à la surface. Comme il est difficile de générer un noyau échantillon pour chaque direction de la normale à la surface, nous produisons un noyau échantillon dans l'espace tangent, avec un vecteur normal pointant dans la direction z positive. Nous avons besoin d'un nombre minimum d'échantillons pour des résultats acceptables. Des bandes d'artefacts peuvent apparaître en raison de la distribution des échantillons. En introduisant un noyau de rotation d'échantillon pour chaque fragment, nous pouvons réduire considérablement les bandes d'artefacts. La plupart des méthodes SSAO sont basées sur une distribution aléatoire uniforme des échantillons.

Pour estimer l'intégrale de Monte-Carlo (voir la section 3.2.4 du chapitre 3), les échantillons doivent être prélevés dans l'hémisphère [Lan02]. La rapidité et l'efficacité du calcul de la méthode SSAO sont liées aux techniques d'échantillonnage utilisées. Le principal problème avec la méthode de Monte-Carlo par échantillonnage uniforme est son coût de calcul dû à la lente convergence. Un bon estimateur de Monte-Carlo doit réduire la variance. Il existe plusieurs techniques pour réduire la variance de l'estimateur, comme l'échantillonnage stratifié, l'échantillonnage par importance [OZ00] et l'échantillonnage préférentiel multiple [Vea97].

L'estimateur pour l'échantillonnage par importance telle que décrit par [OZ00]:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{p(x_i)} \quad (5.1)$$

où x_i est un échantillon du domaine d'intégration, N est le nombre d'échantillons, $p(x)$ est la fonction de densité de probabilité (PDF) dans $[0,1]$, et $f(x)$ est une fonction à échantillonner, qui est défini sur le domaine d'intégration. Ainsi, les zones de la fonction $f(x)$ qui ont les valeurs les plus élevées sont privilégiées lors de l'échantillonnage. Pour cela, nous devons calculer la fonction de distribution cumulative (CDF) $P(x)$ d'une variable aléatoire à valeurs réelles X : $P(x) = Pr\{X \leq x\}$. Cela peut être fait en choisissant uniformément une valeur $\zeta \in [0, 1]$ et en calculant $P^{-1}(\zeta)$, $P(x \in [a, b]) = \int_a^b p(x)dx$ [OZ00].

L'échantillonnage stratifié [Cox85; Rub81] consiste à diviser le domaine d'intégration $D \in [0,1]$ en n régions non chevauchantes $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$. Chaque région est appelée une strate. Nous générons un échantillon aléatoire dans chacune de ces strates. Ces régions doivent couvrir complètement la zone d'origine. Dans chacun des sous-domaines, l'intégrale doit être évaluée séparément. L'estimation de Monte-Carlo est donnée par :

$$\langle I \rangle = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{v_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{f(x_j)}{p(x_j)} \quad (5.2)$$

où N_i est le nombre de sous-domaines, N_j est le nombre d'échantillons dans le sous-domaine i , et $v_i = \int_{D_i} (f(x)/p(x))p(x) dx$.

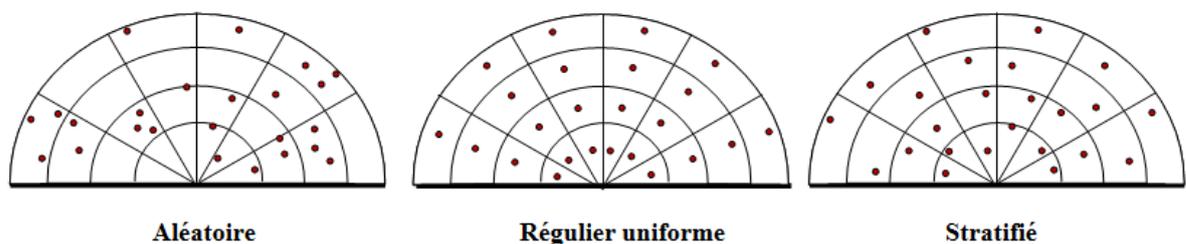


Figure 5.3: Différentes stratégies d'échantillonnage avec 24 échantillons.

a) Échantillonnage préférentiel multiple

L'échantillonnage préférentiel multiple peut augmenter considérablement la robustesse de l'intégration de Monte-Carlo. Il utilise plusieurs techniques d'échantillonnage pour estimer une intégrale puis combine ces échantillons pour converger vers la solution optimale [Vea97].

Nous utilisons deux estimateurs de Monte-Carlo de l'intégrale de $f(x)$: le premier avec une distribution d'échantillonnage avec une PDF $p_1(x)$ et le second avec la distribution d'échantillonnage avec une PDF $p_2(x)$:

1. Échantillonnage par importance: en utilisant l'échantillonnage par méthode de Monte-Carlo avec une PDF en cosinus (voir la formule 5.6); pour échantillonner un hémisphère qui est placé au-dessus d'un point actuel.
2. Échantillonnage stratifié: en utilisant la méthode d'échantillonnage de Monte-Carlo avec $1/2\pi$ comme PDF (voir la formule 5.7);

L'algorithme 2 présente la stratégie d'échantillonnage par importance utilisée dans la technique proposée [Zer+16], dans laquelle $\cos(\theta)/\pi$ est utilisé comme une PDF [Dut03], et $P(x)$ indique la fonction de distribution cumulative. Nous choisissons des valeurs uniformément $\xi_i \in [0, 1]$ et calculons $P^{-1}(\xi_i)$. La strate courante est la zone entre les angles β_1 et β_2 de l'hémisphère. Les paires (θ, ϕ) sont les coordonnées sphériques (angle d'élévation, angle azimutal) qui représentent la direction d'un rayon.

Algorithme 2: Import_Sampl(STRATUM stratum) *Générer des échantillons selon la stratégie d'échantillonnage par importance, où la PDF = $\cos(\theta)/\pi$*

- 1: **Pour** la strate courante **faire**
 - 2: Csi1 = random();
 - 3: Csi2 = random();
 - 4: // (θ, ϕ) sont les coordonnées sphériques
 - 5: THETA = arcsin(Csi1);
 - 6: PHI = $(2 * \pi * Csi2)$;
 - 7: **Fin Pour**;
 - 8: **Retourné** vec2 (THETA , PHI) ; // vec2: vecteur en 2D
-

L'algorithme 3 présente la stratégie d'échantillonnage stratifié utilisée dans la technique proposée pour générer des échantillons privilégiés [Zer+16], dans laquelle $1/2\pi$ est utilisé comme fonction de densité de probabilité [Dut03]. Le point (x,y) représente la position de l'échantillon dans l'hémisphère, par exemple, comme représenté dans la figure (5.3) sur la droite.

Algorithme 3: Stratif_Sampl(STRATUM stratum) // *Générer des échantillons selon la stratégie d'échantillonnage stratifié, où la PDF = $1/2\pi$*

- 1: **Pour** la strate courante **faire**
 - 2: Csi1 = random ();
 - 3: Csi2 = random ();
 - 4: // (θ, ϕ) sont les coordonnées sphériques
 - 5: THETA = arccos (1 -Csi1);
 - 6: PHI = $(2 * \pi * Csi2)$
 - 7: **Fin Pour**;
 - 8: **Return** vec2 (THETA , PHI) // vec2: vecteur en 2D
-

Nous nous sommes inspirés de la stratégie de Veach [Vea97], qui consiste à combiner les deux estimateurs de Monte-Carlo pour obtenir n_i échantillons de $p_i(x)$ parmi n PDFs. Dans notre cas, l'estimateur d'échantillonnage préférentiel multiple est simplement:

$$F = \frac{1}{n_1} \sum \omega_1(X_{1,j}) \frac{f(X_{1,j})}{p_1(X_{1,j})} + \frac{1}{n_2} \sum \omega_2(X_{2,j}) \frac{f(X_{2,j})}{p_2(X_{2,j})} \quad (5.3)$$

Pour combiner les deux estimateurs, nous utilisons une fonction de pondération [Vea97]. Les poids (ω_1 et ω_2) qui sont donnés par cette fonction permettent de générer des échantillons $X_{1,j}$ ou $X_{2,j}$, dont le but est de réduire la variance. Le but est de trouver l'estimateur F avec une variance minimale en choisissant les poids de façon appropriée. Veach suggère l'utilisation des deux poids de la fonction heuristique de la balance associés à chaque stratégie:

$$\omega_1(X_{1,j}) = \frac{p_1(X_{1,j})}{p_1(X_{1,j}) + p_2(X_{1,j})} \quad (5.4)$$

$$\omega_2(X_{2,j}) = \frac{p_2(X_{2,j})}{p_1(X_{2,j}) + p_2(X_{2,j})} \quad (5.5)$$

où la somme des fonctions de pondération doit être égale à un. $X_{1,j}$ est l'échantillon de la variable aléatoire x qui est généré avec la PDF p_1 , et $X_{2,j}$ est l'échantillon de la variable aléatoire x qui est généré avec la PDF p_2 . Nous utilisons des paires d'échantillons (θ, ϕ) pour représenter la direction d'un rayon.

$$p_1(X_{1,j}) = \frac{\sin(\theta)\cos(\theta)}{\pi} \quad (5.6)$$

$$p_2(X_{2,j}) = \frac{\sin(\theta)}{2\pi} \quad (5.7)$$

où θ est l'angle polaire formé par la normale et le rayon de l'échantillon au point courant.

b) Description de la technique proposée basée sur l'échantillonnage préférentiel multiple

Dans cette section, nous expliquons la technique proposée, qui utilise la méthode d'échantillonnage préférentiel multiple pour pondérer les échantillons [ZB18]. Nous montrons comment combiner les deux estimateurs (l'estimateur d'échantillonnage par importance et l'estimateur d'échantillonnage stratifié). Nous utilisons l'approche de la fonction heuristique de la balance, comme décrit précédemment, pour calculer les poids. Notre objectif principal est de calculer la PDF de chaque stratégie lorsque nous générons des échantillons ($p_1(X_{2,(i,k)})$ et $p_2(X_{1,(i,k)})$).

Algorithme 4 est un aperçu général de la technique proposée.

Algorithme 4: Stratégie d'échantillonnage préférentiel multiple

- 1: Diviser l'hémisphère en sous-domaines de n strates.
 - 2: **Pour** chaque strate du domaine **faire**
 - 3: **Pour** chaque point (i,k) de la strate courante **faire**
 - 4: // $pdf1 = p_1(X_{1,(i,k)})$, $pdf2 = p_2(X_{1,(i,k)})$
 - 5: $ContribImportS = MISImportSampl(pdf1, pdf2)$;
 - 6: // $pdf3 = p_2(X_{2,(i,k)})$, $pdf4 = p_1(X_{2,(i,k)})$
 - 7: $ContribStratifS = MISStratif(pdf3, pdf4)$;
 - 8: // *Contribution finale*
 - 9: $MISSample[i] = ContribImportS + ContribStratifS$;
 - 10: **Fin Pour**;
 - 11: **Fin Pour**;
-

L'algorithme 5 illustre comment calculer $p_2(X_{1,(i,k)})$ et le poids ω_1 de deux PDF différentes, sachant $(pdf1, pdf2)$. Premièrement, nous utilisons l'algorithme 2 pour générer une direction définie par les coordonnées polaires $(THETA, Phi)$ et calculons la valeur de la pdf1 en fonction de $(THETA, Phi)$. Deuxièmement, nous utilisons l'algorithme 3 pour générer une autre direction qui est définie par les coordonnées polaires $(THETA1, Phi1)$ et nous calculons la valeur de la pdf2 en fonction de $(THETA, Phi)$. Troisièmement, nous calculons la valeur du premier poids ω_1 (voir la formule 5.4).

Algorithme 5: MIS_ImportSampl(PDF pdf1, PDF pdf2)

```
1: // pdf1 = p1(X1,(i,k)) , pdf2 = p2(X1,(i,k))
2: vec2(THETA,Phi) = Import_Sampl(current_stratum) ; // Algorithme 2
3: pdf1 = (cos(THETA) × sin(THETA))/π; // voir la formule (5.6)
4: vec2(THETA1,Phi1) = Stratif_Sampl(current_stratum) ; // Algorithme 3
5: pdf2 = ( sin(THETA1))/ 2π ;); // voir la formule (5.7)
6: w1 = BalanceHeuristic(pdf1,pdf2); // voir la formule (5.4)
7: ContribImportS = w1 × estimator1; // voir la formule (5.1)
8: Return ContribImportS
```

L'algorithme 6 montre comment calculer $p_1(X_{2,(i,k)})$ et calculer le poids ω_2 à partir de deux PDF différents, sachant $(pdf3, pdf4)$. Premièrement, nous utilisons l'algorithme 3 pour générer une direction définie par les coordonnées polaires $(THETA, Phi)$ et nous calculons la valeur de la pdf3 en fonction de $(THETA, Phi)$. Deuxièmement, nous utilisons l'algorithme 2 pour générer une autre direction définie par les coordonnées polaires $(THETA1, Phi1)$, et nous calculons la valeur de la pdf4 en fonction de $(THETA, Phi)$. Troisièmement, nous calculons la valeur du premier poids ω_2 (voir la formule 5.7).

Algorithme 6: MIS_Stratif(PDF pdf3, PDF pdf4)

```
1: // pdf3 = p2(X2,(i,k)) , pdf4 = p1(X2,(i,k))
2: vec2 (THETA,Phi)= Stratif_Sampl(current_stratum) ; // Algorithme 3
3: pdf3 = ( sin(THETA))/ 2π ; // voir la formule (5.7)
4: vec2 (THETA1,Phi1) = Import_Sampl(current_stratum) ; // Algorithme 2
5: pdf4 = (cos(THETA1) × sin(THETA1))/π // voir la formule (5.6)
6: w2 = BalanceHeuristic(pdf4,pdf3); // voir la formule (5.7)
7: ContribStratifS = w2 × estimator2; // voir la formule (5.2)
8: Return ContribStratifS
```

5.3.2.2 Calculer SSAO

Dans cette étape, nous calculons le facteur d'occlusion ambiante en utilisant nos stratégies d'échantillonnage. Cette étape est entièrement implémentée dans le GPU avec un programme shader à travers les étapes suivantes:

a) Dans le Vertex Shader

Nous effectuons les transformations géométriques pour déterminer la position de chaque sommet dans l'espace approprié, et nous calculons les coordonnées de texture qui sont nécessaires pour récupérer l'information du G-Buffer. Nous calculons les positions des sommets dans l'espace monde. La valeur de la carte de position est représentée par une couleur (Texel) RVB, où chaque composante est dans la plage [0, 1]. Chaque composante vectorielle (x,y,z) est dans la plage [-1, 1], donc la conversion d'un Texel RGB vers un vecteur est effectuée par la formule suivante: (RGB * 2.0 - 1.0).

b) Dans le fragment Shader

Le contenu du G-Buffer (normales, profondeurs et positions) est envoyé au fragment shader comme variables uniformes pour convertir les informations géométriques de l'espace écran en espace monde. Ensuite, un échantillonnage dans l'hémisphère est effectué selon la méthode d'échantillonnage sélectionnée pour calculer le facteur d'occultation ambiante.

$$OAF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(p, \omega) \quad (5.8)$$

où N est le nombre d'échantillons, OAF est le facteur d'occultation ambiante, et $V(p, \omega)$ est la fonction de visibilité binaire (inverse) d'un rayon de p dans la direction $\vec{\omega}$ (voir la figure 5.4).

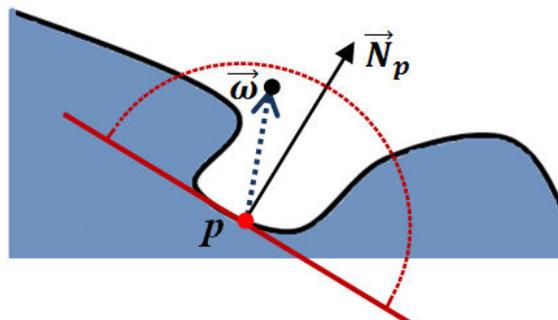


Figure 5.4: Direction d'un échantillon dans un hémisphère.

Nous utilisons l'OA tel que défini par Landis [Lan02] (équation (5.8)) pour estimer la valeur du facteur SSAO (SSAOF), où nous approchons les rayons projetés dans l'hémisphère en utilisant une stratégie d'échantillonnage sélectionnée. Pour chaque fragment, nous obtenons les informations de profondeur, de normale et de position à partir du G-Buffer. Les valeurs de la normale et de la position qui sont stockées dans les G-Buffers sont dans l'intervalle [0,1] (coordonnées de texture), et elles doivent être transformées en vecteurs qui sont dans la plage [-1,1] dans les coordonnées de l'espace monde. Nous obtenons les informations de la position, de la profondeur et de la normale restaurée dans l'espace monde, qui seront utilisées pour calculer le facteur d'occultation ambiante.

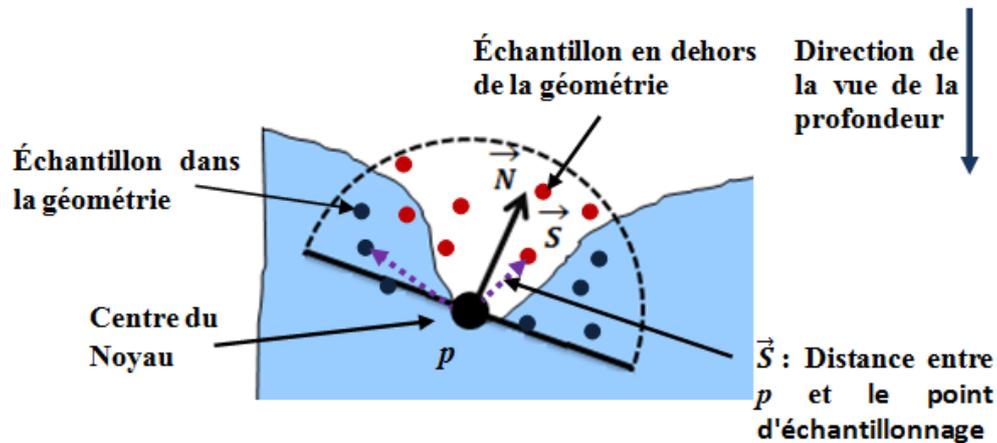


Figure 5.5: Échantillonnage autour de l'hémisphère.

L'algorithme 7 montre la façon de calculer la valeur du facteur SSAO. Pour chaque échantillon dans l'hémisphère et selon la stratégie d'échantillonnage choisi, nous récupérons la profondeur de chaque échantillon dans le tampon de profondeur. Ensuite, nous calculons la position de chaque échantillon par rapport à la position du centre du noyau (sommet actuel p). Nous obtenons la position de chaque échantillon de l'hémisphère centré au point p . Ensuite, nous normalisons le vecteur normal \vec{N} et le vecteur de distance \vec{S} (entre le centre du noyau p et le point d'échantillonnage) et nous calculons le produit scalaire entre ces deux derniers vecteurs, comme le montre la figure 5.5. À partir de cette valeur, nous pouvons déterminer si l'échantillon est à l'intérieur ou à l'extérieur de la géométrie. Si ce point est à l'intérieur de la géométrie, on incrémente la valeur du facteur SSAO; sinon, ce point ne contribue pas à la valeur du facteur SSAO.

Algorithme 7: Calcul du facteur SSAO.

```

1: Tab = Echantillon [NB_Echant] // générer un noyau d'échantillon
2: Pour chaque sommet de la scène faire
3:   SSAO = 0 ;
4:   // Calculer la valeur de SSAO
5:   Pour i =1 à NB_Echant faire
6:     //Pos_Ech_HS : la position de l'échantillon dans l'hémisphère
7:     // Position: la position du sommet
8:     Pos_Ech_HS = Position + Echantillon[i] ;
9:     // Prof_Ech : la profondeur de l'échantillon
10:    Prof_Ech = Calule_Prof_Ech(Pos_Ech_HS) ;
11:    // Thêta: angle entre la normale et la position de l'échantillon
12:    // Dot : produit scalaire
13:    Cos(Thêta) =Dot(Normal, Prof_Ech ) ;
14:    Si (Cos(Thêta) >0) alors //Thêta ∈[0°,90°]
15:      SSAO = SSAO +1 ;

```

- 16: **FinSi** ;
17: **FinPour** ;
18: SSAO = SSAO/ NB_Echant ;
19: **FinPour**
-

Après avoir calculé le facteur SSAO, nous devons éclairer notre scène pour améliorer la qualité. Nous appliquons le modèle d'éclairage de Phong [Pho75] pour l'éclairage local car il est rapide, simple et largement utilisé par de nombreux systèmes de synthèse d'images. Il combine trois éléments: la lumière ambiante, la lumière diffuse et la lumière spéculaire. Nous appliquons ce modèle d'illumination pour deux cas différents: Premièrement, nous utilisons un modèle d'éclairage Phong avec un éclairage local en utilisant une lumière ambiante uniforme (comme illustrée sur la figure (5.10) à gauche). Deuxièmement, nous appliquons le modèle d'éclairage Phong avec éclairage indirect en remplaçant la valeur de la lumière ambiante uniforme par le facteur d'SSAO (comme illustré sur la figure (5.10) à droite). Après avoir calculé le facteur d'SSAO et l'éclairage, nous enregistrons le résultat dans le Frame Buffer pour le filtrer et l'afficher sur l'écran.

5.3.3 Troisième passe de rendu: étape de filtrage

La qualité visuelle des résultats augmente avec le nombre d'échantillons généré; cependant, le nombre d'échantillons affecte sur la fréquence d'images. Pour obtenir une fréquence d'images appropriée, le nombre d'échantillons doit être minimisé. Cependant, cette réduction du nombre d'échantillons produit des bandes artefacts (bruit) dans le résultat. Il est simple d'enlever ce bruit en utilisant une passe de rendu de filtrage. Le filtre bilatéral [PAR09] est utilisé pour résoudre ce problème car ce filtre prend en compte les valeurs de profondeur et ne brouille pas les bords. Deux passes de rendu sont nécessaires pour appliquer ce filtre: une première passe à travers le filtre horizontal et une seconde passe à travers le filtre vertical, comme décrit sur la figure (5.6).

Le filtre commence par le filtre gaussien standard avec un noyau d'espace c . La formule de la fonction gaussienne la plus générale est [PAR09]:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.9)$$

Où σ est l'écart-type de la fonction gaussienne et (x, y) sont les coordonnées cartésiennes de l'image.

$$h(x) = \frac{1}{k(x)} \iint_{-\infty}^{+\infty} c(\varphi, x) g(f(\varphi), f(x)) f(\varphi) d\varphi \quad (5.10)$$

Où $k(x)$ est le terme de normalisation:

$$k(x) = \iint_{-\infty}^{+\infty} c(\varphi, x) g(f(\varphi), f(x)) d\varphi \quad (5.11)$$

L'intégrale dans les applications réelles est remplacée par une somme sur un noyau

de taille définie:

$$J_p = \frac{1}{k_p} \sum_{q \in \Omega} I_q c(p - q) g(I_p - I_q) \quad (5.12)$$

Où I_p , I_q sont les intensités de l'image originale, Ω est le support spatial pour le noyau c , et k_p est le facteur de normalisation.

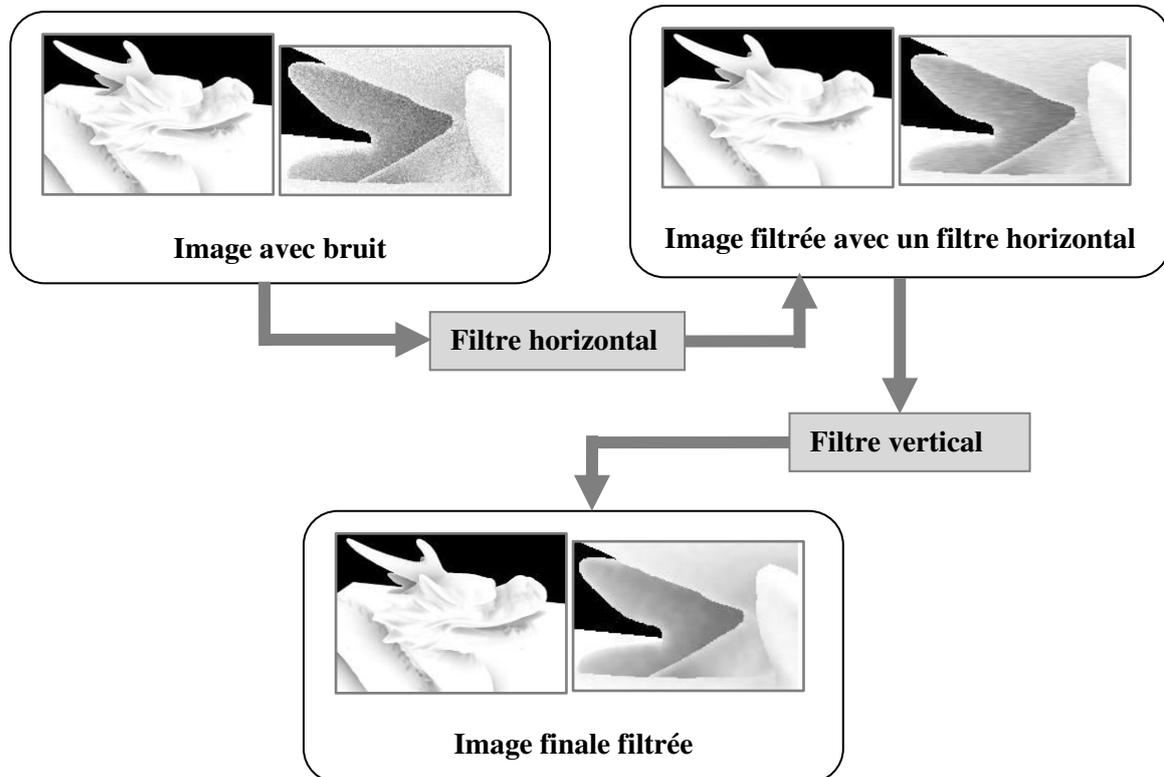


Figure 5.6: Un exemple du filtre bilatéral.

5.4 Tests et évaluation

Dans cette partie, nous détaillons l'ensemble des tests que nous avons réalisés sur plusieurs scènes, nous testons également la validité de la technique proposée en terme de qualité et de temps de calcul et nous discutons enfin des avantages et limites en utilisant des métriques perceptuelles.

5.4.1 Outils et matériels utilisés

Pour évaluer la technique proposée, nous avons utilisé une machine dotée d'un processeur Intel (R) Core (TM) i7-7700K @ 4,20 GHz, Nvidia GeForce GTX 1070 / PCIe / SSE2, avec 32 GB RAM sur un système d'exploitation Microsoft Windows 8.1 64 bits utilisant OpenGL 4.5. Pour comparer nos résultats, nous avons choisi les critères standards FPS (Frame Par Second) et le temps du calcul pour la génération d'une image. Les changements de performance sont mesurés en faisant varier le nombre de noyaux d'échantillonnage de

16 à 256. Les images générées sont comparées aux images de références calculées avec la méthode du Tracé de chemins (*path tracing*) (appelée aussi image *Ground Truth*) en utilisant différents nombres d'échantillons par pixel (**epp**). Toutes les images générées par la technique proposée sont des images HDR; la résolution des images calculées est de 512 × 512 (HDR). Nous avons utilisé la technique du Tone Mapping de Reinhard [Rei+02] pour la visualisation sur des écrans LDR.

Nous avons évalué nos techniques en utilisant la métrique RMSE (Root Mean Square Error) [WM05] et la métrique HDR-VDP-2 [Man+11], nous avons validé qualitativement et quantitativement nos résultats sur des images de scènes à rendre en temps réel. Nos scènes de tests, qui contiennent divers objets, sont illustrées dans [McG17; Sta96].

Table 5.1 Spécifications de chaque scène et temps de calcul de différents objets en utilisant la méthode du tracé de chemins avec 256 échantillons.

Scène	Nombre de triangles	Temps de calcul en utilisant le tracé de chemins
Sibenik Cathedral	75,284	39 sec
Crytek Sponza	262,195	87 sec
Fireplace Room	143,173	51 sec
Living Room	580,637	221 sec
Dragon	100,002	44 sec
Bunny	69,688	36 sec
Buddha	100,000	43 sec
Lucy	33,446	25 sec

Le tableau 5.1 montre le temps de calcul des images générées par la méthode de tracé de chemins qui utilise 256 échantillons. Ces images seront considérées comme images de référence tout le long de ce chapitre.

5.4.2 Les métriques utilisées pour la validation

Pour faciliter et valider les comparaisons, il est nécessaire d'utiliser des métriques perceptuelles et mathématiques.

La première métrique utilisée est l'erreur moyenne de prévision RMSE (Root Mean Squared Error) ou RMSD (Root Mean Squared Deviation) [WM05] qui est une mesure fréquemment utilisée de la différence entre les valeurs prédites et les valeurs réellement observées. La RMSE d'une prédiction d'une image de référence $X_{réf}$ par rapport à une image de test X_{test} est définie comme la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{réf,i} - X_{test,i})^2}{n}} \quad (5.13)$$

Où : n est le nombre de pixels de l'image, $X_{réf,i}$ est le pixel i de l'image de référence, $X_{test,i}$ est le pixel i de l'image de test.

Une erreur quadratique moyenne petite est le signe d'une faible variance de l'erreur de prévision et d'une erreur moyenne réduite. Dans la pratique si cette valeur est inférieure à un millième alors l'image de référence et l'image de test sont presque identique.

La seconde métrique utilisée est la métrique de prédiction de différence visuelle (HDR-VDP-2 pour "Visible Difference Metric for High Dynamic Range Images" [Man+11], qui est une mesure de la visibilité (discrimination) et de la qualité capable de détecter les différences dans les images achromatiques couvrant une large plage de valeurs absolues de luminance, elle compare aussi une paire d'images (une référence et une image de test) et prédit:

- La visibilité : quelle est la probabilité que les différences entre les deux images soient visibles pour un observateur moyen ?
- Qualité : Quelle est la dégradation de la qualité par rapport à l'image de référence ?



Figure 5.7: Les valeurs de la métrique HDR-VDP-2.

Le résultat de la comparaison de la métrique HDR-VDP-2 entre une référence et une image de test est une image qui contient des couleurs comprises entre la couleur bleue et la couleur rouge comme illustré dans la figure 5.7. La couleur rouge signifie la grande probabilité qu'aura le spectateur à distinguer une différence entre l'image de référence et l'image de test. Au contraire, la couleur bleue montre une faible probabilité à percevoir une différence visuelle.

Comme les images utilisées dans cette partie sont des images du type HDR, elles ne peuvent pas être visualisées sur un écran LDR. Nous avons utilisé la technique Tone Mapping de Reinhard [Rei+02] pour la visualisation sur des écrans LDR.

La métrique Tone Mapping de Reinhard [Rei+02] est le processus de transformation d'une image représentée en unités approximativement précises physiquement, telles que la luminance et la luminance, en des valeurs de pixels qui peuvent être affichées sur un écran d'une plage dynamique limitée. Le Tone Mapping fait partie d'une pile de traitement d'images de n'importe quel appareil photo numérique.

5.4.3 Résultats et comparaison

Afin de valider et tester nos techniques nous devons les comparer avec des méthodes efficaces existant dans la littérature. Nous avons choisi de comparer les résultats de nos techniques par différentes méthodes telles que: Mittring [Mit12], Alchemy [McG+11] originale et HBAO [BSD08] originale. Tout d'abord, nous avons implémenté l'algorithme Alchemy original, en raison de son efficacité et de son estimation stochastique, puis nous

avons aussi implémenté les algorithmes HBAO original et la méthode de Mittring qui sont considéré par plupart des méthodes de SSAO en synthèse d'images (voir chapitre 3 pour plus de détails).

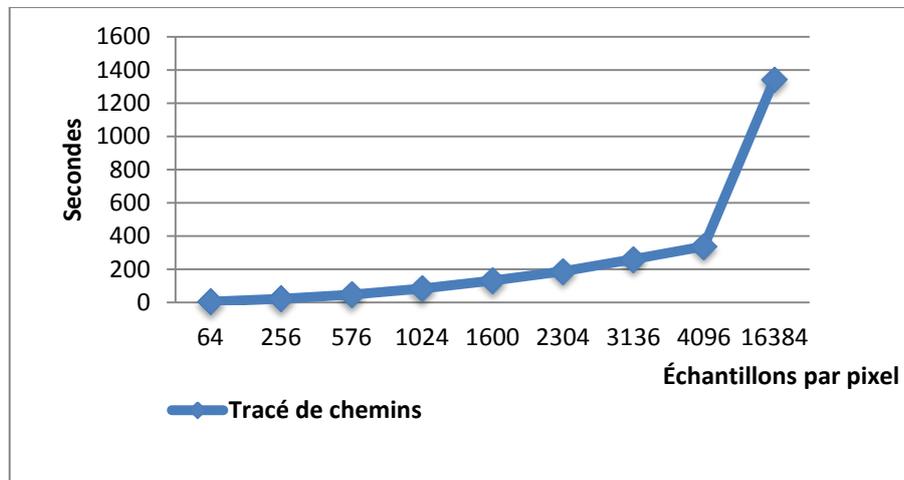


Figure 5.8: Évolutivité lorsque le nombre d'échantillons augmente avec la méthode de tracé de chemins pour la scène Dragon (le temps du rendu en seconde).

Dans la figure 5.8, nous montrons les valeurs de temps du rendu mesuré en secondes pour chaque image en fonction du nombre d'échantillons par pixel dans une scène rendue par la méthode du tracé de chemins, l'objet 3D utilisé est le modèle Dragon. Nous remarquons que le temps du rendu progresse de manière raisonnable de 5 jusqu'à 1400 secondes avec la progression du nombre d'échantillons.

La figure 5.9 fournit une comparaison entre les résultats obtenus avec la technique proposée basée sur l'échantillonnage préférentiel multiple et de la méthode Mittring [Mit12] ainsi que l'image de référence des quatre scènes de tests (Dragon, Fireplace Room, Living Room et Sponza). Les images dans la colonne à gauche sont les résultats du tracé de chemins qui sont considérés comme images de référence qui utilisent 256 échantillons, sur la base de laquelle nous mesurons et comparons les autres méthodes. La colonne au milieu contient des images obtenues avec la méthode SSAO de Mittring avec 24 epp (échantillonnage uniforme régulier). La colonne de droite montre les images obtenues par la technique proposée d'échantillonnage préférentiel multiple avec 24 epp. Notez que pour la méthode Mittring et la technique proposée d'EPM, le temps de rendu pour chaque scène différente est le même. Les temps du rendu pour les images de référence sont listés dans le tableau 5.1.

Les images de la technique proposée donnent de meilleurs résultats et sont plus réalistes que ceux obtenus avec la méthode de Mittring puisque certaines régions de l'image sont mieux ombrées. L'approximation de l'ombre douce est le résultat de ces techniques; les ombres douces apparaissent clairement et ajoutent un réalisme supplémentaire à nos scènes 3D. Chaque image obtenue avec la technique proposée ressemble à l'image de référence correspondante. Cela est dû au fait que la technique proposée privilège les échantillons distribués autour de l'hémisphère. Au contraire, de la méthode de Mittring qui utilise une distribution uniforme régulière.

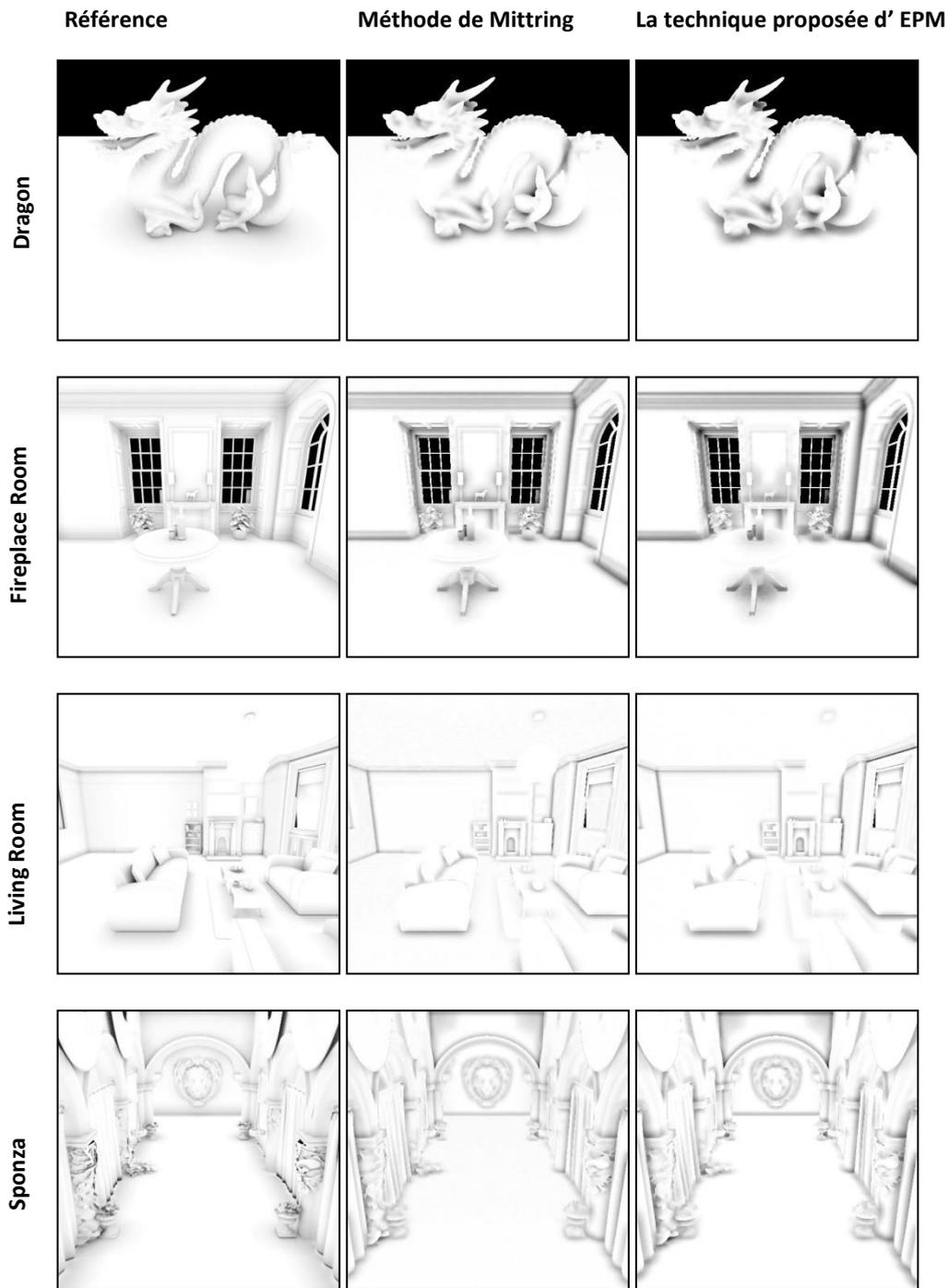


Figure 5.9: Résultats qualitatifs choisis pour plusieurs scènes et techniques. À gauche: OA calculé par le tracé de chemins avec 256 epp. Milieu: SSAO avec la méthode de Mitrting avec 24 epp. À droite: la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM avec 24 epp.

Pour prendre en compte les interactions entre la lumière et les objets 3D, il est nécessaire d'ajouter une source de lumière et choisir un modèle d'ombrage pour augmenter le réalisme de nos scènes. L'ombrage avec le modèle de Phong en temps réel est une solution possible (voir la figure 5.10).



Figure 5.10: L'influence du concept ambiant dans une scène 3D. Avec 24 epp. À gauche: la scène est illuminée par l'ombrage de Phong en utilisant une lumière ambiante uniforme (51 FPS). Au milieu: la scène est illuminée par l'ombrage de Phong en utilisant la méthode de Mittring (47 FPS). À droite: la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM avec ombrage de Phong (47 FPS).

La figure 5.10 montre une scène illuminée par trois techniques différentes. Dans l'image de gauche : la scène est éclairée par l'ombrage de Phong en utilisant une lumière ambiante uniforme à 51 FPS. L'image du milieu montre une scène illuminée par l'ombrage de Phong en utilisant la méthode de Mittring [Mit12] comme composante ambiante à 47 FPS. L'image de droite illustre une scène éclairée par l'ombrage de Phong en utilisant la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM comme composante ambiante avec un FPS égal à 47.

L'ajout de textures dans cette scène améliore remarquablement la qualité des images. Les détails des images générées par la technique proposée sont plus nets et plus faciles à identifier que les images générées par la méthode de Mittring. Notre technique produit des résultats de meilleure qualité visuelle que la méthode Mittring avec le même FPS.

D'autre part, la réduction du nombre d'échantillons provoquée par la méthode de SSAO introduit un certain bruit (des artefacts) très visibles dans les zones où la technique de SSAO se produit, ce bruit peut être toutefois supprimé dans l'étape de post-filtrage. Le filtre bilatéral est utilisé pour réduire ce bruit (voir la section 5.3.3). La figure 5.11 illustre le processus de filtrage utilisé dans la technique proposée.

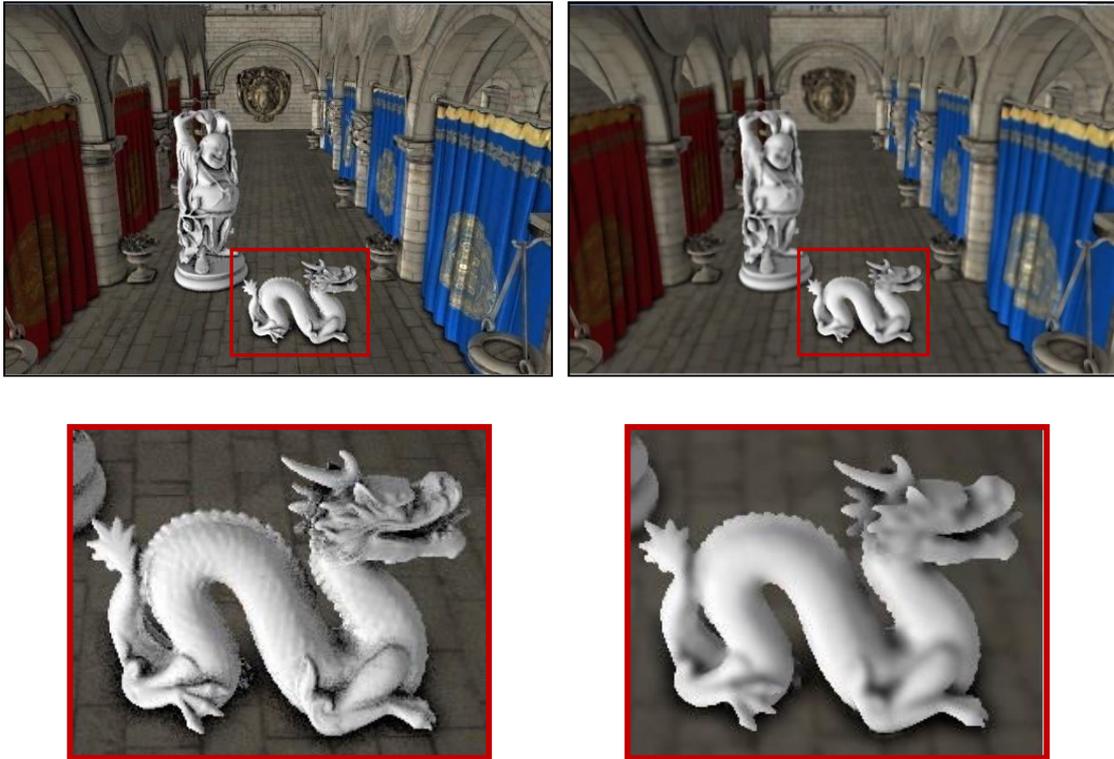


Figure 5.11: Une scène rendue par la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM en utilisant 24 epp. À gauche : sans filtrage et avec un FPS égal à 47. À droite en utilisant un filtre et avec un FPS égal à 45.

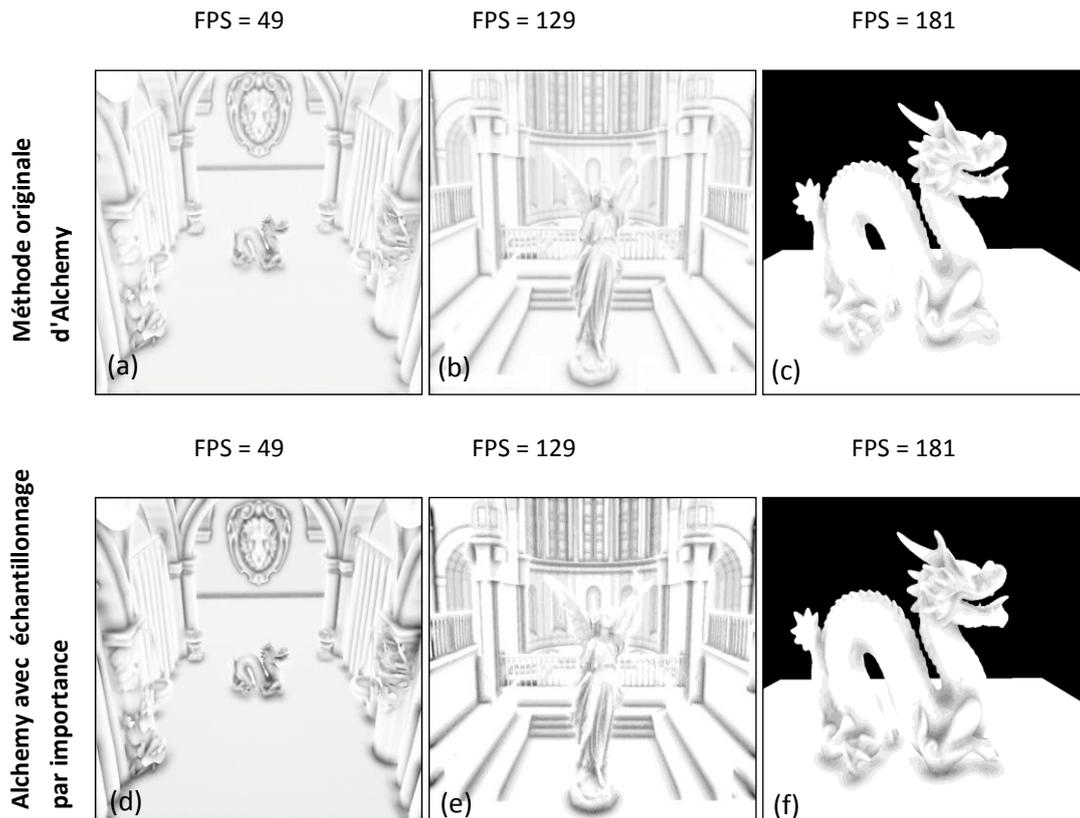


Figure 5.12: Avec 24 epp. Comparaison des images rendues entre la méthode originale d'Alchemy (image (a), (b) et (c)) et notre version améliorée de la technique Alchemy (image (d), (e) et (f)).

Dans la figure 5.12, nous présentons une comparaison entre la méthode originale d'Alchemy [McG+11] et la technique proposée [Zer+16] qui utilisent l'échantillonnage par importance appliquée à la méthode originale d'Alchemy. Les résultats obtenus montrent que notre amélioration a un impact positif sur la qualité visuelle sans perte de performance (avec un même FPS). Par conséquent, l'application de la technique proposée à la méthode d'Alchemy fournit une amélioration visuelle, fait apparaître clairement les détails fins et les relations spatiales entre les objets. Les ombres douces de la technique proposée sont plus évidentes que les ombres douces de la méthode originale d'Alchemy. Cela est causé par le fait que la technique proposée privilège les échantillons utilisés pour la méthode d'Alchemy. Au contraire, de la méthode originale d'Alchemy qui utilise une distribution aléatoire.

La figure 5.13 montre la comparaison entre la méthode de Mittring et la technique proposée en utilisant l'échantillonnage par importance et l'échantillonnage stratifié [Zer+16] avec des scènes 3D différentes. La comparaison visuelle montre que les images produites par la technique proposée sont meilleures que les images produites par la méthode de Mittring, et toujours sans toucher aux performances. Cela est dû au fait que la technique proposée privilège les échantillons générés autour de l'hémisphère. Au contraire, de la méthode de Mittring qui utilise une distribution uniforme régulière.

Méthode de Mittring

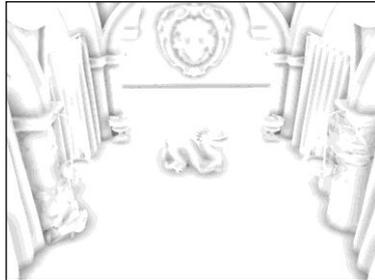
Notre méthode avec échantillonnage par importance

Notre méthode avec échantillonnage stratifié

FPS = 51

FPS = 51

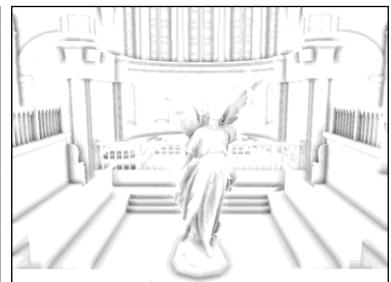
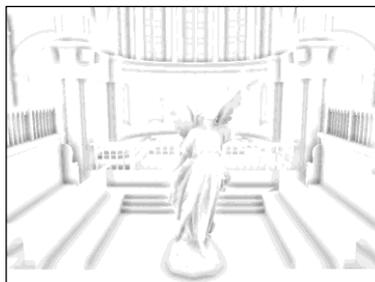
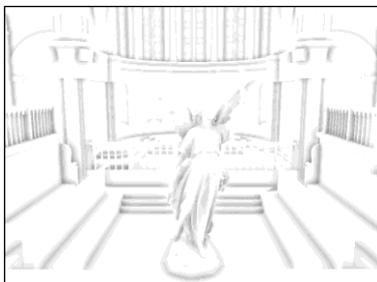
FPS = 51



FPS = 131

FPS = 131

FPS = 131



FPS = 193

FPS = 193

FPS = 193

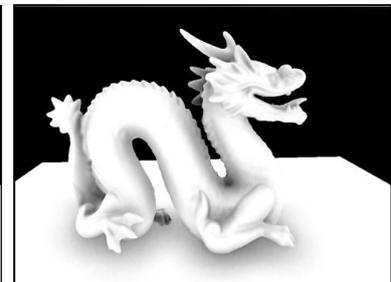


Figure 5.13: Avec 24 epp. Comparaison d'images rendues par la méthode de Mittring avec différents scènes et entre nos images rendues en utilisant la technique proposée.

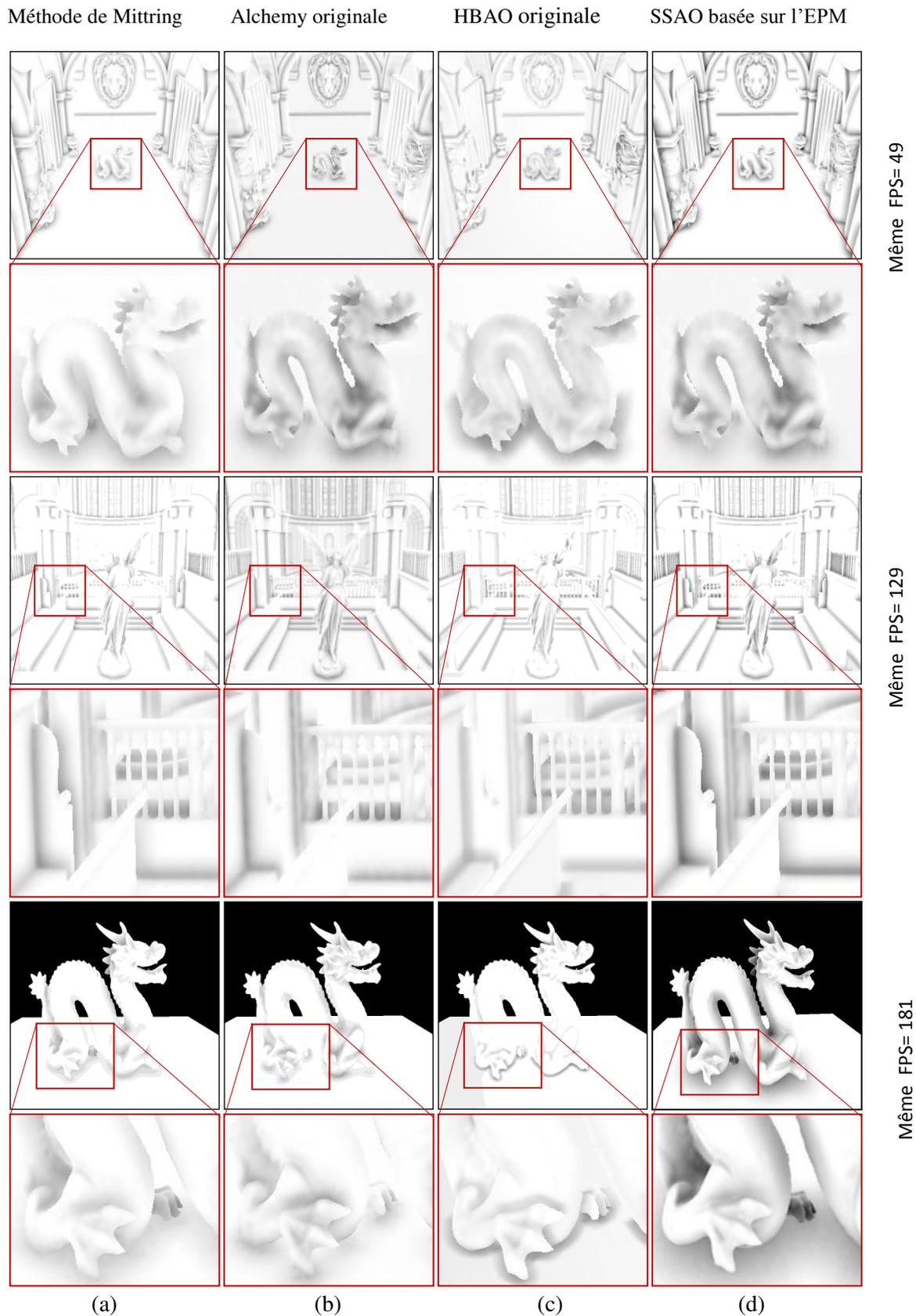


Figure 5.14: Comparaison des images rendues en utilisant 24 epp, obtenus par différentes méthodes. (a) Méthode de Mittring. (b) Méthode originale d'Alchemy. (c) Méthode originale d'HBAO. (d) la technique proposée SSAO basée sur l'EPM.

Les scènes Sibenik Lucy, Sponza Dragon et Dragon sont rendues en utilisant 24 epp. La figure 5.14 fournit une étude comparative des images rendues par la méthode originale de Mittring, la méthode originale d'Alchemy, la méthode originale de HBAO ainsi que la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM, et par différentes scènes. Les résultats obtenus montrent que la qualité visuelle de la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM donne de meilleurs résultats comparés aux autres méthodes, sans diminuer le temps de rendu, puisque certaines régions de l'image font apparaître nettement les détails et sont mieux ombrées. Les ombres douces générées par la technique proposée sont plus visibles et plus réalistes. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'avec un l'échantillonnage préférentiel multiple les échantillons sont mieux répartis sur l'hémisphère.

Après avoir comparé visuellement les images obtenues par la méthode que nous avons proposée avec l'image de référence et avec d'autres méthodes, nous évaluons maintenant nos techniques en calculant la métrique RMSE mathématique et la métrique HDR-VDP-2, qui est une métrique perceptuelle appliquée aux images HDR (High Dynamic Range). La métrique RMSE représente l'écart-type de l'échantillon des différences entre les valeurs prédites et les valeurs observées pour nos images.

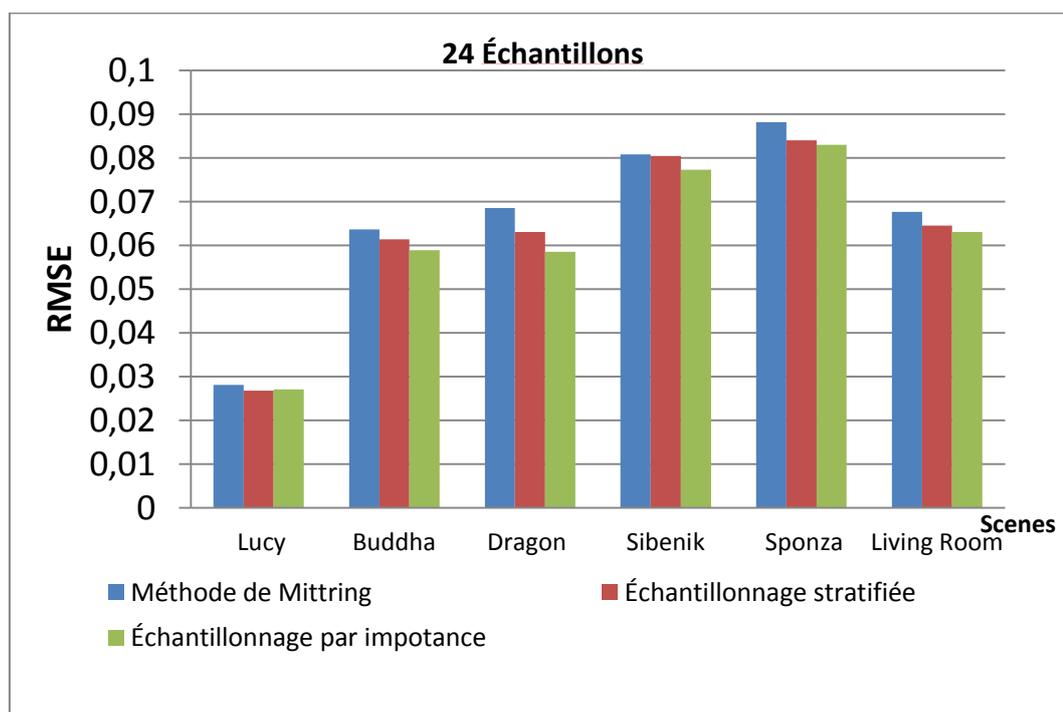


Figure 5.15: Résultats RMSE pour différentes méthodes selon différentes scènes de rendu avec 24 epp.

Dans la figure 5.15 nous présentons les valeurs RMSE obtenues par différentes méthodes rendues avec 24 epp: la méthode originale de Mittring, la technique proposée d'échantillonnage par importance et la technique proposée d'échantillonnage stratifiée, chacune des images est comparé avec sa propre image de référence. Notez que l'image de référence est générée par la méthode de tracé de chemins en utilisant 256 epp. Nous pouvons remarquer que la valeur RMSE est faible pour nos deux techniques proposés. Un

résultat intéressant est que, pour nos deux techniques, la valeur RMSE atteint sa valeur inférieure par rapport à la méthode de Mittring pour toutes les scènes rendues, ce qui signifie que ce nombre est suffisant pour juger que nos techniques obtiennent des résultats de bonne qualité.

La figure 5.16 montre les valeurs RMSE obtenues en comparant une image de référence pour chaque scène avec une image générée par la méthode Mittring et avec une image créée par la technique proposée d'échantillonnage préférentiel multiple. Notez que l'image de référence est générée par la méthode de tracé de chemins en utilisant 256 epp et que les images rendues par la méthode Mittring et par la technique proposée d'EPM utilisent 24 epp. La valeur RMSE atteint une valeur plus faible pour la technique proposée d'échantillonnage préférentiel multiple que pour la méthode Mittring sur toutes les scènes, ce qui signifie que ce nombre est suffisant pour juger que la technique proposée obtient des résultats qui surpassent les résultats de la méthode Mittring en termes de qualité visuelle.

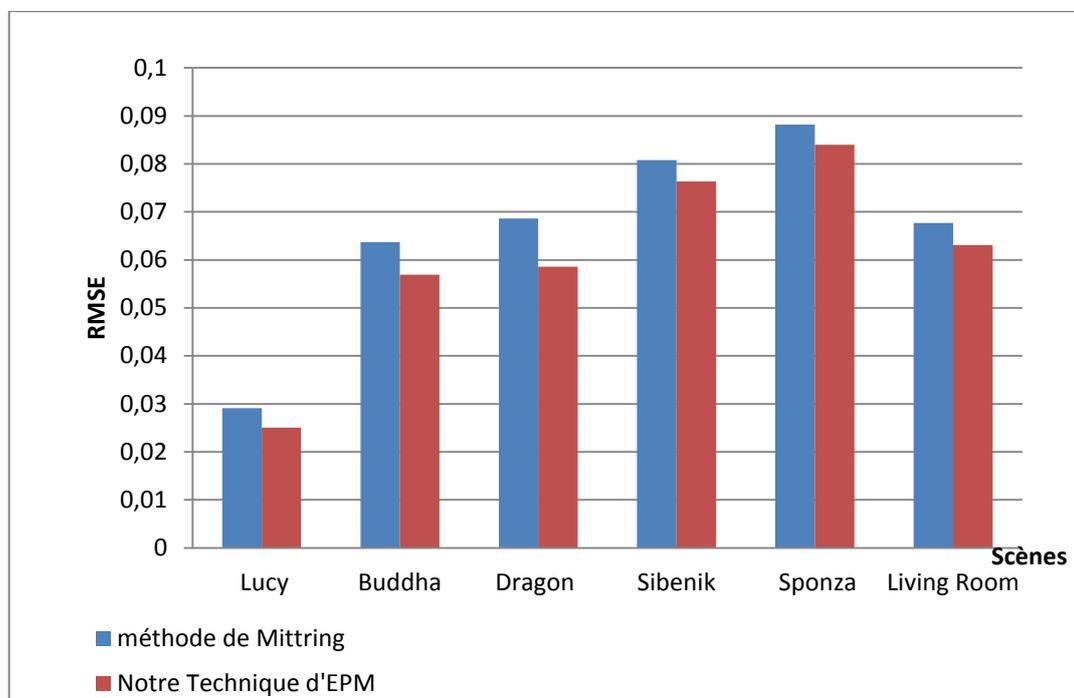


Figure 5.16: Résultats RMSE pour différentes méthodes utilisant 24 epp, selon différentes scènes. Les images de référence sont générées par la méthode du tracé de chemins en utilisant 256 epp.

Table 5.2 Les valeurs RMSE entre les images de référence et les images de la technique proposée basée sur l'EPM.

Méthode	Scène	Nombre d'échantillons	FPS	RMSE
Référence	Sponza	128	41	
La technique proposée	Sponza	16	61	0.009226
Référence	Living Room	128	18	

CHAPITRE 5: OCCULTATION AMBIANTE DANS L'ESPACE ÉCRAN BASÉE SUR L'ECHANTILLONNAGE PRÉFÉRENTIEL MULTIPLE

La technique proposée	Living Room	16	28	0.008032
Référence	Sibenik	128	98	
La technique proposée	Sibenik	16	145	0.018461
Référence	Dragon	128	181	
La technique proposée	Dragon	16	210	0.014294
Référence	Fireplace Room	128	71	
La technique proposée	Fireplace Room	16	103	0.018788

Dans la table 5.2, nous évaluons la technique proposée de SSAO basée sur l'échantillonnage préférentiel multiple en utilisant la métrique RMSE. Toutes les images générées par la technique proposée sont comparées aux images créées par la méthode Mittring. Notez que dans ce cas, les images générées par la méthode Mittring sont considérées comme les images de référence, qui utilisent 128 epp. Toutes les images générées par la technique proposée utilisent 16 epp. Une évaluation visuelle de ces résultats est présentée à la figure 5.17. Selon les valeurs de la RMSE pour la plupart des scènes de rendu, nous concluons que les images obtenues par la technique proposée, qui utilise que 16 epp, ressemblent énormément aux images de référence, qui sont rendues en utilisant 128 epp. De plus, les valeurs des fréquences d'affichage (FPS) montrent que le temps de calcul de la technique proposée est plus court que le temps de calcul de la méthode Mittring. Par conséquent, la fréquence d'images requise pour la technique proposée est supérieure à la fréquence d'images de l'image de référence

La figure 5.17 montre les différences perceptuelles entre les images générées avec la technique proposée de SSAO basée sur l'EPM et les images de référence. Nous évaluons les différences perceptuelles en appliquant la métrique perceptuelle HDR-VDP-2 aux images HDR. Notez que les images de référence, dans ce cas, sont produites avec la méthode de Mittring (échantillonnage uniforme régulier) en utilisant 128 epp, tandis que les images qui sont rendues par la technique proposée utilisent seulement 16 epp. La table 5.2 présente les valeurs des fréquences d'images obtenues avec différentes méthodes ainsi que les valeurs RMSE. Nous observons que toutes les images des scènes de tests ont une faible erreur selon la métrique HDR-VDP-2 (les champs vert et bleu dans les images dans les colonnes de droite). Par conséquent, notre technique est plus rapide et génère des images très similaires aux images de référence.

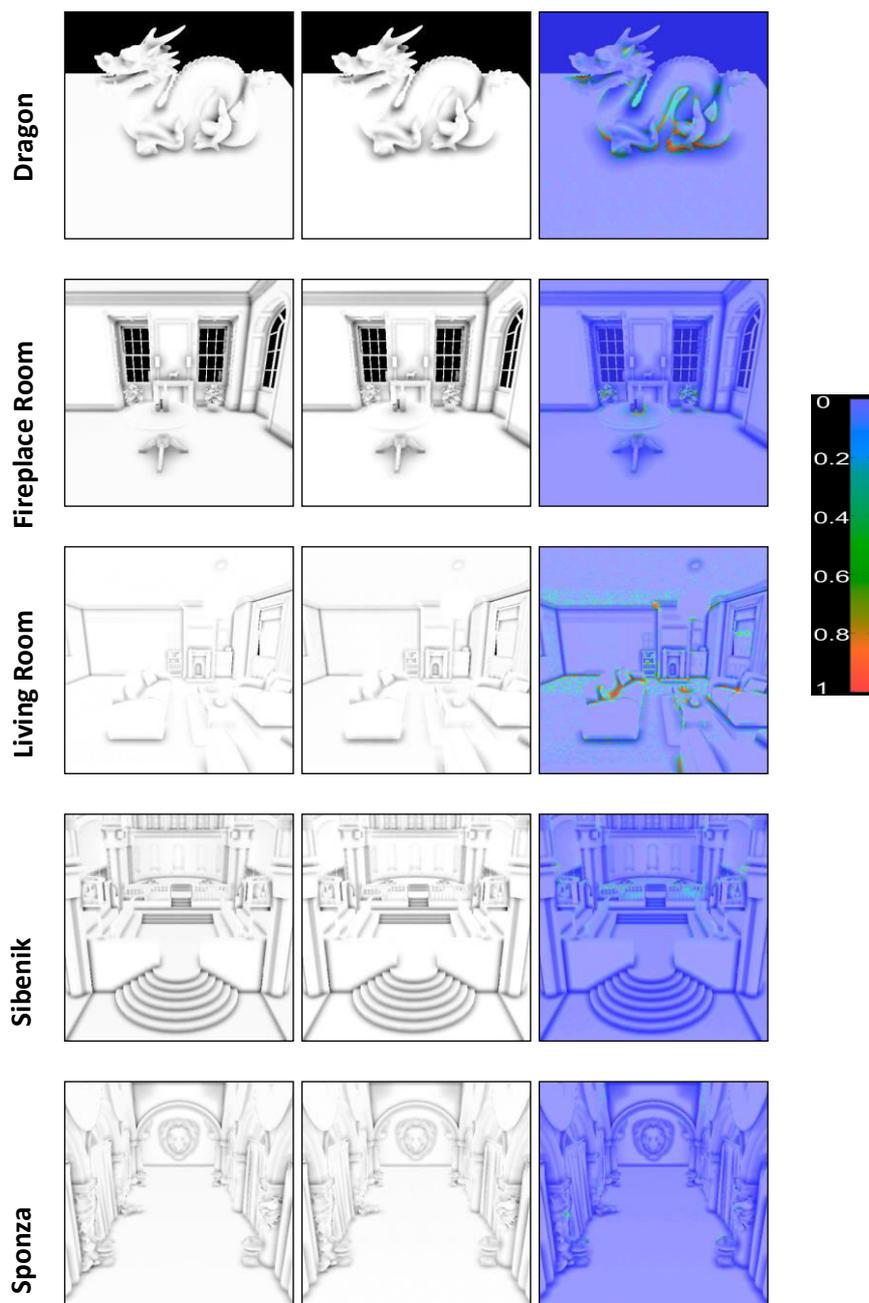


Figure 5.17: Métrique HDR-VDP-2 entre les images de référence et celles obtenues avec la technique proposée pour les quatre scènes de tests. À gauche: images de référence. Au milieu: images générées avec notre technique d'EPM. À droite: images représentant la métrique HDR-VDP-2 entre les images de référence (à gauche) et les images générées par la technique proposée d'EPM (au milieu).

La technique proposée est efficace et rapide, et donne de très bon résultat visuel. Pour la mettre à l'échec notre technique, nous choisissons une scène 3D composée de 2.878.452 triangles illuminés par l'ombrage de Phong (figure 5.18) est généré avec une fréquence d'affichages qui est égale à 01. Par conséquent, l'augmentation de la complexité de la scène réduit les performances de la machine.



Figure 5.18: Une scène complexe avec plusieurs modèles 3D différents, éclairée par la technique proposée basée sur l'EPM utilisant 24 epp (01 FPS).

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle technique qui est capable de traiter les challenges importants et nécessaires dans le calcul de l'occultation ambiante dans l'espace écran et la création d'ombre douce basée sur le GPU via les shaders. Premièrement, nous avons proposé nos techniques basées sur l'échantillonnage préférentiel multiple, l'échantillonnage par importance et l'échantillonnage stratifié qui coopèrent efficacement avec le GPU. La technique proposée améliore la sélection d'échantillons les plus contributifs et utilise moins d'échantillons pour le calcul de l'occultation ambiante dans l'espace écran. Deuxièmement, nous avons présenté nos résultats et plusieurs comparaisons ont été faites avec les méthodes connues dans la littérature. La validation des tests a été faite en utilisant deux métriques RMSE et HDR-VDP-2.

Conclusion générale

L'illumination globale en temps réel est un défi en informatique graphique, elle ne peut être obtenue que par des approximations. La méthode l'occultation ambiante dans l'espace écran est une ces méthodes. Elle est très utilisée dans les applications interactives, et permet de visualiser les détails de la géométrie sous forme d'ombres douces dans les endroits où la lumière directe ne peut pas les atteindre. Le problème avec cette méthode est qu'elle exige un nombre important d'échantillons par pixel, ce qui est couteux en matière de temps de calcul. Tous les travaux antérieurs dans ce domaine utilisent des distributions aléatoires, ce qui entraînait une surcharge de calcul et une estimation d'OA erronée car chaque échantillon est choisi sans importance. Les ombres douces physiquement correctes ne peuvent pas être générées par l'occultation ambiante, car elles sont produites à partir d'une source de lumière surfacique. Elles sont produites par échantillonnage de la source de lumière surfacique, le nombre d'échantillons peut augmenter significativement en fonction de la taille de la lumière, ce qui affecte négativement les performances.

Dans le rendu interactif, le besoin accru de prendre en charge des environnements dynamiques complexes en conjonction avec les exigences partagées en matière de qualité et d'interactivité constitue la recherche d'algorithmes d'occultation ambiante dans l'espace écran et d'algorithmes de création d'ombres douces plus efficaces et d'une importance capitale.

Dans cette thèse, nous avons proposé des solutions aux problèmes liés à la méthode de l'occultation ambiante dans l'espace écran et aux problèmes des ombres douces physiquement correctes en temps réel. Nous avons présenté deux contributions :

1. La première contribution est de concevoir une technique pour calculer efficacement des ombres douces physiquement correctes générées par l'échantillonnage d'une source de lumière surfacique. Nous utilisons un nombre réduit d'échantillon de la lumière surfacique avec de multiples filtres PCF visant à améliorer la qualité de l'image rendue.

2. La seconde contribution est d'améliorer l'effet perceptuel de la méthode de SSAO sur la qualité de l'image tout en affectant positivement le temps de calcul et en générant une approximation visuelle des ombres douces, ce qui améliore la qualité visuelle de l'image. L'intégration de la méthode d'échantillonnage préférentiel multiple dans le calcul de la SSAO améliore la qualité visuelle sans diminuer la cadence, ce qui permet de générer des scènes en temps réel.

Pour visualiser les résultats sur les écrans LDR, les images HDR utilisées ont été converties par la technique de Tone Mapping en utilisant l'opérateur de Reinhard [Rei+02]. Les résultats montrent que la technique proposée basée sur l'EPM, qui privilège les échantillons les plus significatifs, génère de bonnes images en terme de qualité et plus rapides par rapport à aux autres méthodes. De plus, nous avons appliqué la métrique HDR-VDP-2[Man+11] pour montrer les différences perceptuelles entre nos images HDR et les images de référence obtenues avec la méthode de tracé de chemins avec un nombre élevé d'échantillons.

Notre étude d'évaluation démontre que notre technique d'EPM est générique et donc, peut être appliquée sur divers algorithmes de SSAO, améliorant la convergence totale de l'estimateur de l'occultation ambiante dans les techniques de l'écran espace. Elle peut être intégrée dans plusieurs domaines interactifs, tels que les derniers jeux vidéo, les reconstructions 3D, la visualisation médicale, la conception architecturale, la vision par ordinateur et toute application nécessitant un éclairage indirect.

En général, nous croyons que la recherche menée tout au long de cette thèse a abordé plusieurs questions importantes dans les domaines de temps réel et rendu interactif en mettant l'accent sur l'efficacité, la qualité et la robustesse des techniques d'occultation ambiante dans l'espace, ainsi que sur la capacité globale des méthodes basées sur la génération des ombres douces physiquement correctes pour un rendu temps réel.

Bien que la première contribution fournisse des ombres douces correctes et précises, des problèmes peuvent apparaître comme la taille des régions de pénombre qui peut changer radicalement en peu de temps, le nombre d'échantillons nécessaires peut également varier considérablement, ce qui rend la technique proposée inadaptée aux applications interactives.

Une limitation de la seconde technique proposée est qu'elle ne peut pas être appliquée au rendu à base de points et au rendu à base d'images ; elle est uniquement applicable au rendu polygonal. À mesure que la complexité de la scène change, le temps de traitement augmente exponentiellement, ce qui rend notre algorithme inadapté à l'utilisation interactive.

Pour la première technique, nos perspectives concernent la réduction du temps de calcul nécessaire pour l'étape de comparaison en trouvant de meilleures façons de gérer les longues requêtes d'occlusion et en particulier la synchronisation GPU / CPU correspondante. Ceci pourrait par exemple être réalisé en exploitant la cohérence temporelle entre des trames consécutives, de sorte que l'état de subdivision actuel de la source lumineuse surfacique soit réutilisé et seulement adapté le cas échéant dans la trame suivante. De plus, nous prévoyons d'étudier la relation entre les bandes d'artefacts dans le

CONCLUSION GENERALE

cas d'une cible de rendu de comparaison de résolution inférieure et les tailles de noyau de filtrage d'ombres nécessaires, de sorte que des mécanismes de filtrage autorégulation puissent être trouvés. En tant qu'amélioration similaire, le filtrage pourrait être limité aux régions ayant uniquement des bandes d'artefacts, ce qui augmenterait encore les performances de rendu. Des efforts de recherche supplémentaires pourraient également être consacrés à la recherche de techniques pour une stratégie de subdivision plus aléatoire, ou à l'extension de l'algorithme aux sources de lumière volumique.

Enfin pour la seconde technique, les travaux futurs chercheront à étendre notre étude à des scènes plus complexes en utilisant des textures d'occultation ambiante pré-calculées pour accélérer les calculs et améliorer le réalisme. De plus, nous pouvons utiliser un autre type d'échantillonnage plus efficace pour réduire encore le nombre d'échantillons. Nous prévoyons également de remplacer le filtre bilatéral par un autre filtre, ce qui peut fournir de meilleurs résultats visuels sans affecter les performances de calcul. La cohérence temporelle peut également accélérer le processus de rendu en économisant du temps de calcul et en obtenant des résultats plus précis qui dépassent les capacités des techniques SSAO traditionnelles. Nous pensons que la technique proposée pourrait également être appliquée à d'autres effets d'espace écran tels que la radiosité instantanée de l'espace écran [Eng09], la carte d'ombre réfléchissante [DS05] les réflexions de l'espace écran et plus encore.

Bibliographie

- [AAM03] Ulf Assarsson and Tomas Akenine-Möller. A Geometry-based Soft Shadow Volume Algorithm using Graphics Hardware. *In: ACM Transactions on Graphics*, volume 22, n° 3, pages: 511–520, July 27 - 31, 2003. <https://doi.org/10.1145/1201775.882300>.
- [AAM04] Timo Aila and Tomas Akenine-Möller. A hierarchical shadow volume algorithm. *In HWWS '04 Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, pages: 15–23, August 29 - 30, 2004. Eurographics, Eurographics Association. <https://doi.org/10.1145/1058129.1058132>.
- [AHH08] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines and Naty Hoffman. Real-Time Rendering Third Edition. *Publisher: CRC Press*. Reference - 1045 Pages, A. K. Peters, Ltd., 2008. ISBN 978-1-56881-424- 7.
- [AKS17] Hatam H. Ali, Hoshang Kolivand and Mohd Shahrizal Sunar. Soft bilateral filtering shadows using multiple image-based algorithms. *In: Journal Multimedia Tools and Applications*, Volume 76 Issue 2, pages: 2591-2608, January 2017. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-3254-0>.
- [Ann+07] Thomas Annen, Tom Mertens, Philippe Bekaert, Hans-Peter Seidel and Jan Kautz. Convolution Shadow Maps. *In: EGSR'07 Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques* (Grenoble, France), Kautz J., Pattanaik S., (Eds.), volume 18, Eurographics, pages: 51–60, June 2007. <https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR07/051-060>.
- [ASK06] Barnabás Aszódi and László Szirmay-Kalos. Real-time Soft Shadows with Shadow Accumulation. *In Eurographics 2006 Short Presentations*. Pages: 53–56, 2116.
- [Att+06] Lionel Atty, Nicolas Holzschuch, Marc Lapierre, Jean-Marc Hasenfratz, François X. Sillion and Hansen Charles. Soft Shadow Maps: Efficient Sampling of Light Source Visibility. *Computer Graphics Forum*. Volume 25, N° 4, pages: 725 – 741, December 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.00995.x>.
- [Agr+00] Maneesh Agrawala, Ravi Ramamoorthi, Alan Heirich and Laurent Moll. Efficient Image-based Methods for Rendering Soft Shadows. *In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Pages: 375–384, 2000. <https://doi.org/10.1145/344779.344954>.
- [AW04] Graham Aldridge and Eric Woods. Robust, geometry-independent shadow volumes. *In Proceedings 2nd International Conference on Computer graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia (Graphite)*, volume 2, pages: 250–253, June 15 - 18, 2004. ACM, ACM Press. <https://doi.org/10.1145/988834.988877>.

- [AW87] John Amanatides and Andrew Woo. A fast voxel traversal algorithm for ray tracing. In *G. Marechal, editor, Proceedings of Eurographics '87*, Issue 3, pages: 3-9, North-Holland, 1987. Elsevier Science Publishers B.V, 1987. ISSN: 1017-4656.
- [Bli88] Jim Blinn. Me and my (fake) Shadow. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Volume 8, N°1, pages: 82 -86, 1988.
- [Ber86] Philippe Bergeron. A general version of crow shadow volumes. *Published in IEEE Computer Graphics and applications*. Volume 6, N°9, pages17 – 28, 1986. <https://doi.org/10.1109/MCG.1986.276543>.
- [BGC16] Jose María Buades, Jesús Gumbau and Miguel Chover. Separable soft shadow mapping, In: *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*. Volume 32 Issue 2, pages: 167-178, February 2016.
- [Bre02] Rob Bredow. Renderman on film. *Course 16: RenderMan in Production. ACM SIGGRAPH Course Notes*, July 2002.
- [Bab+17] Djihane Babahenini, Adrien Gruson, Mohamed Chaouki Babahenini, and Kadi Bouatouch. Efficient inverse transform methods for vpl selection in global illumination. *Published in: Journal Multimedia Tools and Applications*, pages: 1-25, July 2017. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4976-3>.
- [BMH98] Dirk Bartz, Michael Meißner and Tobias Hüttner. Extending Graphics Hardware for Occlusion Queries in OpenGL. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware* (New York, NY, USA, 1998), HWWS '98, ACM, pages: 97–103. <http://dx.doi.org/10.2312/EGGH/EGGH98/097-103>.
- [Bun05] Michael Bunnell. Dynamic ambient occlusion and indirect lighting. In book *GPU Gems: Programming techniques for high-performance graphics and general-purpose computation*. Editor: Matt Pharr, publisher: Addison-Wesley. Chapter 14, volume 2, N°2, pages: 223–233, 2005. ISBN: 0-321-33559-7.
- [BSD08] Louis Bavoil, Miguel Sainz, and Rouslan Dimitrov. Image-space Horizon-based Ambient Occlusion. In *Proceeding: ACM SIGGRAPH 2008 Talks*. Article N°: 22, Los Angeles, California, August 11 - 15, 2008. ISBN: 978-1-60558-343-3. <https://doi.org/10.1145/1401032.1401061>.
- [CW93] Michael F. Cohen and John R. Wallace. Radiosity and Realistic Image Synthesis. *Academic Press Professional, Inc. San Diego, CA, USA*, 1993.
- [Cro77] Franklin C. Crow. Shadow algorithms for computer graphics. In *the Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques SIGGRAPH 77*, Association for Computing Machinery, Inc. volume 11, pages: 242–248, July 1977.

- [CD04] Eric Chan and Frédo Durand. An efficient hybrid shadow rendering algorithm. *In Proceedings. Eurographics Symposium on Rendering*, pages: 185–195, Eurographics Association 2004.
- [CG85] Michael F. Cohen and Donald P. Greenberg. The Hemi-cube. A Radiosity Solution for Complex Environments. *In: Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '85*. Pages: 31–40, New York, NY, USA: ACM, 1985. ISBN: 0-89791-166-0. <https://doi.org/10.1145/325334.325171> (Cited on pages 36, 37).
- [Cox85] P. Cox ; Ping Yang ; S.S. Mahant-Shetti and P. Chatterjee. Statistical modeling for efficient parametric yield estimation of MOS VLSI circuits. Published in: *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Volume: 20, Issue: 1, pages: 391-398, February 1985. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1985.1052319>.
- [DL06] William Donnelly and Andrew Lauritzen. Variance Shadow Maps. *In SIGD 06: Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages: 161– 165, March 14-17, 2006 Redwood City, California, USA. <https://doi.org/10.1145/1111411.1111440>.
- [DPA94] M. A. Dupertuis, M. Proctor, and B. Acklin. Generalization of complex snell-descartes and fresnel laws. *Journal of the Optical Society of America A*. Volume 11, issue 3, pages: 1159–1166, 1994. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.001159>.
- [DS05] Carsten Dachsbacher and Marc Stamminger. Reflective Shadow Maps. *In Proceedings of the symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages: 203-231, 2005. ISBN: 1-59593-013-2. <https://doi.org/10.1145/1053427.1053460>.
- [Dut03] Philip Dutré. Global illumination compendium. *In the journal of Computer Graphics*, Cornell University: Department of Computer Science, Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- [Dee+88] Michael Deering, Stephanie Winner, Bic Schediwy Chris Duffy and Neil Hunt. The Triangle Processor and Normal Vector Shader: a VLSI System for High Performance Graphics. *In SIGGRAPH '88 Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Volume 22, N° 4, pages 21–30, August 1988. <https://doi.org/10.1145/54852.378468>.
- [Eis+11] Elmar Eisemann, Michael Schwarz, Ulf Assarsson and Michael Wimmer. Real-Time Shadows. *Book, Publisher : Taylor & Francis Inc ,1st Edition, A. K. Peters, Ltd. Natick, MA, USA ©2011*. ISBN: 1568814380 9781568814384.
- [Eng09] Wolfgang Engel. ShaderX7: Advanced Rendering Techniques. Course Technology/Cengage Learning, 2009 - 773 pages. ISBN : 1584505982,9781584505983.
- [FBP06] Vincent Forest, Loïc Barthe and Mathias Paulin. Realistic Soft Shadows by Penumbra-Wedges Blending. *In the Proceedings of the 21st ACM*

SIGGRAPH/EUROGRAPHICS symposium on Graphics hardware, pages: 39–48, *Eurographics*, Sep 2006, Vienna, Austria. <http://dx.doi.org/10.1145/1283900.1283907>.

- [Fer+01] Randima Fernando, Sebastian Fernandez, Kavita Bala and Donald P. Greenberg. Adaptive shadow maps. *In SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pages: 387–390, New York, NY, USA, August 2001. <https://doi.org/10.1145/383259.383302>.
- [FE99] Benichou Fabien, and Gershon Elber. Output Sensitive Extraction of Silhouettes from Polygonal Geometry. *In Proceedings of the 7th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages: 60-69, Seoul, Korea, 1999. <https://doi.org/10.1109/PCCGA.1999.803349>.
- [Fer05] Randima Fernando. Percentage-closer Soft Shadows. *In: ACM SIGGRAPH 2005 Sketches and Applications*. Article N° : 35 ACM, New York, NY, USA, July 31-August, 2005. <https://doi.org/10.1145/1187112.1187153>.
- [FM08] Dominic Filion, and Rob McNaughton. Effects and techniques. *In advances in real-Time Rendering in 3D Graphics and Games Course*, edited by Natarchuk, Chapter 5, pages: 133-164, ACM 2008. <https://doi.org/10.1145/1404435.1404441>.
- [GBP06] Gaël Guennebaud Loïc Barthe and Mathias Paulin. Real-time Soft Shadow Mapping by Backprojection. *In Eurographics Symposium on Rendering (EGSR 2006), Nicosia, Cyprus*. Eurographics, pages: 227–234, 2006. <https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR06/227-234>.
- [GBP07] Gaël Guennebaud Loïc Barthe and Mathias Paulin. High-Quality Adaptive Soft Shadow Mapping. *Computer Graphics Forum, Eurographics 2007 proceedings*, Volume 26, N° 3, pages: 525–534, September 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01075.x>.
- [GCS94] Steven Gortler, Michael F. Cohen, and Philipp Slusallek. Radiosity and Relaxation Methods. *In: IEEE Comput. Graph. Appl.* Volume 14 N°6, pages: 48–58, November 1994. ISSN: 0272-1716. <https://doi.org/10.1109/38.329094>. (Cited on page 37).
- [Gor+84] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg, and Bennett Battaile. Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces. *In: Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '84. New York, NY, USA: ACM, volume 18, pages: 213–222, July 1984. ISBN: 0-89791-138-5. <https://doi.org/10.1145/800031.808601>.
- [Gre09] Simon Green. NVIDIA Effects, GDC 2009. *Published in: Entertainment & Humor, Technology, Art & Photos*, April 15, 2009.

- [Gro+12] Sebastian Grottel, Michael Krone, Katrin Scharnowski and Thomas Ertl. Object-space ambient occlusion for molecular dynamics. *Published in: Pacific Visualization Symposium (PacificVis) 2012 IEEE Pacific*, pages: 209–216, 28 Feb.-2 March 2012. <https://doi.org/10.1109/PacificVis.2012.6183593>.
- [HH97] Paul S. Heckbert and Michael Herf. Simulating Soft Shadows with Graphics Hardware. *Technical Report CMU-CS-97-104*, Computer Science Department, Carnegie Mellon University, January 1997.
- [Has+03] Jean-Marc Hasenfratz, Marc Lapierre, Nicolas Holzschuch and François Sillion. A survey of real-time soft shadows algorithms. *In Computer Graphics Forum*, volume 22, N°4, pages: 753–774, 2003.
- [Hei91] Tim Heidmann. Real shadows real time. IRIS Universe, Silicon Graphics Inc., Volume 18, page : 23–31, 1991.
- [HLY10] Frida Hernell, Patric Ljung and Anders Ynnerman. Local ambient occlusion in direct volume rendering. *Published in: Journal IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Volume 16, Issue: 4, pages: 548–559, July 2010. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.45>.
- [Hua+11] Jing Huang, Tamy Boubekeur, Tobias Ritschel, Matthias Holländer and Elmar Eisemann. Separable Approximation of Ambient Occlusion. *In: Proceedings Eurographics 2011*. Short papers. 2011, pages 29-32. <https://doi.org/10.2312/EG2011/short/029-032>.
- [JC95] Henrik Wann Jensen and Niels Jørgen Christensen. Photon maps in bidirectional monte carlo ray tracing of complex objects. *Computers & Graphics*, Volume 19 N° 2, pages: 215–224, March 1995. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(94\)00145-O](https://doi.org/10.1016/0097-8493(94)00145-O).
- [Jim+16] Jorge Jimenez, Xian-Chun Wu, Angelo Pesce and Adrian Jarabo. Practical Real-time Strategies for Accurate Indirect Occlusion. *In Proceeding of SIGGRAPH 2016*. Courses: Physically based shading in theory and practice, pages: 112-161, 2016.
- [Kil01] Mark J. Kilgard. Robust stencil shadow volumes. *In CEDEC Presentation, Tokyo*, 2001.
- [Kaj86] James T Kajiya. The rendering equation. *In Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, volume 20, pages: 143-150, ACM August 1986. <https://doi.org/10.1145/15922.15902>.
- [Kel97] Alexander Keller. Instant Radiosity. *In Turner Whitted, editor, SIGGRAPH 97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Annual Conference Series*. ACM SIGGRAPH, pages: 49–56, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, 1997. ISBN: 0-89791-896-7. <https://doi.org/10.1145/258734.258769>.

- [Kil02] Mark J. Kilgard. Shadow Mapping with Today's OpenGL Hardware. *In SIGGRAPH 2002 Course 31: Interactive Geometric Computations Using Graphics Hardware*, NVIDIA Corporation, 2002.
- [Lik+15] Gabor Liktó, Stanislav Spassov, Gregor Muckl and Carsten Dachsbacher. Stochastic soft shadow mapping. *In journal: Computer Graphics Forum*, Volume 34, N° 4, pages: 1–11, 27 July 2015. <https://doi.org/10.1111/cgf.12673>.
- [Loy+04] Brandon Lloyd, Jeremy Wend, Naga K. Govindaraju, and Dinesh Manocha. Cc shadow volumes. *In Rendering Techniques, In Proc. Eurographics Symposium on Rendering*. Eurographics Association, pages: 197-206, 2004. <https://doi.org/10.1145/1186223.1186406>.
- [LS10] Bradford J. Loos and Peter-Pike J. Sloan. Volumetric Obscurance. *In Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH symposium on Interactive 3D Graphics and Games ACM*, pages: 151–156, New York, NY, USA, I3D 2010. <https://doi.org/10.1145/1730804.1730829>.
- [LCD06] Thomas Luft, Carsten Colditz and Oliver Deussen. Image enhancement by unsharp masking the depth buffer. *In Journal of ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006*, Volume 25 Issue 3, pages: 1206–1213, 2006. ISBN: 1-59593-364-6. <https://doi.org/10.1145/1141911.1142016>.
- [Lan02] Hayden Landis. Production-ready global illumination. *In RenderMan in Production. Course 16: ACM SIGGRAPH 2002 Course Notes*. ACM, Boston (2002).
- [Lai+07b] Samuli Laine, Hannu Saransaari, Janne Kontkanen, Jaakko Lehtinen, and Timo Aila. Incremental Instant Radiosity for Real-time Indirect Illumination. *In: Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*. EGSR'07. Pages: 277–286, Grenoble, France: Eurographics Association, 2007. ISBN: 978-3-905673-52-4. <https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR07/277-286> (Cited on page 59).
- [MU49] Nicholas Metropolis and Stanislas Ulam. The Monte-Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*. Volume 44, N° 247, pages: 335–341, September 1949. <https://doi.org/10.2307/2280232>.
- [Met+53] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, and E. Teller. Equations of state calculations by fast computing machines. *Chemical Physics*, Volume 21, N° 6, pages: 1087–1091, 1953. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0667-5_6.
- [MSM10] Oliver Mattausch, Daniel Scherzer, and Michael Wimmer. High Quality Screen Space Ambient Occlusion using Temporal Coherence. *In: Computer Graphics Forum*. Volume 29, N° 8, December 2010. ISSN: 0167-7055. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2010.01784.x>.

- [Mit07] Martin Mittring. Finding next gen: Cryengine 2. In *Proceeding of SIGGRAPH 2007, Advanced Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games Course, Chapter 8*, pages: 97–121, ACM, New York, NY, USA, 2007. <https://doi.org/10.1145/1281500.1281671>.
- [Mit12] Martin Mittring. The technology Behind the Unreal engine 4 Elemental demo. In *Proceeding of SIGGRAPH 2012: 39th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques, Advances in Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games course*, ACM, Los Angeles Convention Center, August 2012.
- [Man+11] Rafat Mantiuk, Kil Joong Kim, Allan G Rempel, and Wolfgang Heidrich. Hdr-vdp-2: a calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions. In *Journal ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 30 Issue 4, Article N° 40, July 2011. ISBN: 978-1-4503-0943-1. <https://doi.org/10.1145/1964921.1964935>.
- [McG10] Morgan McGuire. Ambient occlusion volumes. *Conference: Proceedings of the 2010 Symposium on Interactive 3D Graphics, SI3D 2010*, February 19-21, 2010, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.1145/1730804.1730984>.
- [McG17] Morgan McGuire. Computer Graphics Archive, July 2017. <http://casual-effects.com/data/index.html>.
- [McG+11] Morgan McGuire, Brian Osman, Michael Bukowski, and Padraic Hennessy. The alchemy screen-space ambient obscurance algorithm. In *proceeding: HPG '11 Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics*. Pages: 25-32, Vancouver, British Columbia, Canada August 05-07, 2011. ISBN: 978-1-4503-0896-0. <https://doi.org/10.1145/2018323.2018327>.
- [Mig04] Pascal Mignot, Cours de Maitrise d'informatique, Universite de Reims (FRANCE) Année Uniersitaire 2004 -2005.
- [Nic65] Fred E. Nicodemus. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Applied Optics*. Volume 4, issue 7, pages: 767–773, 1965. <https://doi.org/10.1364/AO.4.000767>.
- [NRS14] Oliver Nalbach, Tobias Ritschel, and Hans-Peter Seidel. Deep Screen Space. In: *Proceedings of the 18th Meeting of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. I3D '14*. Pages: 79–86, San Francisco, California: ACM, 2014. ISBN: 978-1-4503-2717-6. <https://doi.org/10.1145/2556700.2556708> (Cited on pages 45, 60, 105).
- [OZ00] Art Owen and Yi Zhou. Safe and effective importance sampling. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 95, N° 449, pages: 135 - 143. Published by: Taylor & Francis, Ltd. on behalf of the American Statistical Association, 2000. <https://doi.org/10.2307/2669533>.

- [OHH10] John-Paul Ownby, Chris Hall and Rob Hall. Toy story 3: The video game rendering techniques. In *Proceeding of SIGGRAPH 2010: The 37th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques, Advances in Real-Time Rendering course*, SIGGRAPH 2010, Los Angeles CA, 25-29 July 2010.
- [PWG79] Atherton Peter, Kevin Weiler, and Donald Greenberg. Polygon Shadow Generation. *Program of Computer Graphics*, pages: 275 – 281, 1979.
- [Pin02] Jean-Marie Pinel. Etude des conditions d'éclairage dans une séquence d'images et application à la composition et au codage de scènes vidéo. *Thèse de doctorat*, Université de Rennes1, 28 novembre 2002.
- [PB07] Bernard Peroche et Dominique Bechmann. *Informatique Graphique et rendu*. 352 pages, Hermès, Traité IC2. Série Traitement du signal et de l'image. Information - Commande - Communication, février 2007. ISBN: 978-2-7462-1515-3.
- [Per97] Volker Perlick. Fermat's principle, morse theory and applications to the gravitational lens effect. In *Journal of Nonlinear analysis-theory methods & applications*. Volume 30, Issue 1, pages: 617–625, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0362-546X\(97\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0362-546X(97)00036-9).
- [PF05] Matt Pharr and Randima Fernando. GPU Gems 2. *Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation (Gpu Gems)*. Addison-Wesley Professional, 2005. ISBN: 0321335597.
- [Pho75] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated images. *Communications of the ACM*, Volume 18, N° 6, pages: 311 - 317, June 1975.
- [Par09] Sylvain Paris, Pierre Kornprobst, Jack Tumblin, and Frédo Durand. Bilateral Filtering: Theory and Applications. *Journal of Foundations and Trends, in Computer Graphics and Vision*: Volume 4, N° 1, pages: 1-73, August 2009. <https://doi.org/10.1561/0600000020>.
- [RSC87] William T. Reeves, David H. Salesin, and Robert L. Cook. Rendering Antialiased Shadows with Depth Maps. In *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (1987)*, ACM Press, Volume 21, N°. 4, pages: 283–291. July 1987. <https://doi.org/10.1145/37401.37435>.
- [Rit+08] Tobias Ritschel, Thorsten Grosch, Min H. Kim, Hans-Peter Seidel, Carsten Dachsbacher, and Jan Kautz. Imperfect Shadow Maps for Efficient Computation of Indirect Illumination, pages: 1–8, *ACM Transactions on Graphics*, 2008. ISBN: 978-1-4503-1831-0. <https://doi.org/10.1145/1457515.1409082>.
- [Rei+02] Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley and James Ferwerda. Photographic Tone Reproduction for Digital Images. *ACM Transactions on*

Graphics (TOG Homepage), Volume 21 Issue 3, pages: 267 – 276, (Proceedings of SIGGRAPH 2002). <https://doi.org/10.1145/566570.566575>.

- [Rit+12] Tobias Ritschel, Carsten Dachsbacher, Thorsten Grosch, and Jan Kautz. The state of the art in interactive global illumination. In *Computer Graphics Forum*, volume 31, pages: 160-188. Wiley Online Library, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.02093.x>.
- [RGS09] Tobias Ritschel, Thorsten Grosch, and Hans-Peter Seidel. Approximating Dynamic Global Illumination in Image Space. In: *Proceedings of the 2009 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. I3D '09. Pages: 75–82, Boston, Massachusetts: ACM, 2009. ISBN: 978-1-60558-429-4. <https://doi.org/10.1145/1507149.1507161>. (Cited on pages 53, 58, 59, 68, 79).
- [Rub81] Reuven Y. Rubinstein. Simulation and the Monte Carlo Method. *John Wiley & Sons, Inc. Wiley series in probability and mathematical statistics*. New York, NY, USA©1981. ISBN: 9780471089179,0471089176.
- [Seg+92] Mark Segal, Carl Korobkin, Rolf van Widenfelt, Jim Foran and Paul E. Haeberli. Fast shadows and lighting effects using texture mapping. In *Proceedings SIGGRAPH 92*, volume 26, pages: 249–252, July 1992. <https://doi.org/10.1145/133994.134071>.
- [SS07] Michael Schwarz and Marc Stamminger. Bitmask Soft Shadows. In *Proceedings Computer Graphics Forum*. Volume26, Issue3, pages: 515–524, 12 October 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01074.x>.
- [SPP05] Jean-François St-Amour, Eric Paquette and Pierre Poulin. Soft Shadows from Extended Light Sources with Penumbra Deep Shadow Maps. *Published in GI '05 Proceedings of Graphics Interface 2005*, pages: 105– 12, May 2005. ISBN:1-56881-265-5.
- [Sch+09] Daniel Scherzer, Michael Schwärzler, Oliver Mattausch and Michael Wimmer. Real-Time Soft Shadows Using Temporal Coherence. In *Advances in Visual Computing: 5th International Symposium on Visual Computing*, pages: 13-24, (ISVC 2009) (December 2009), Lecture Notes in Computer Science, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10520-3_2.
- [SEA08] Erik Sintorn, Elmar Eisemann and Ulf Assarsson. Sample based Visibility for Soft Shadows Using Alias-free Shadow Maps. In *EGSR '08 Proceedings of the Nineteenth Eurographics conference on Rendering*, pages: 1285–1292, June 23 - 25, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01267.x>.
- [Sch+12] Michael Schwärzler, Oliver Mattausch, Daniel Scherzer and Michael Wimmer. Fast Accurate Soft Shadows with Adaptive Light Source Sampling. In *Proceedings of the 17th International Workshop on Vision, Modeling, and Visualization (VMV 2012)*, pages: 39-46, November 2012. <http://dx.doi.org/10.2312/PE/VMV/VMV12/039-046>.

- [Sol98] Cyril Soler. Représentations hiérarchiques de la visibilité pour le contrôle de l'erreur en simulation de l'éclairage. *PhD thesis, Université Joseph Fourier* (Grenoble), 1998.
- [SS03] A. Sabra and A. Mark Smith. *Alhacen's theory of visual perception. A critical edition, with english translation and commentary, of the first three books of alhacen's de aspectibus, the medieval latin version of ibn al-haytham's kitab al-manazir*. *Isis: A Journal of the History of Science* 94, pages:136-138, 2003. <https://doi.org/10.1086/376125>.
- [Sta96] Stanford University: The Stanford 3D Scanning Repository, 1996. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>.
- [St90] Takafumi Saito and Tokiichiro Takahashi. Comprehensible Rendering of 3-D Shapes. In: *Proceedings of the 17th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '90. Pages: 197–206, Dallas, TX, USA: ACM, 1990. ISBN: 0-89791-344-2. <https://doi.org/10.1145/97879.97901>. (Cited on page 49).
- [SV16] Marc Sunet, Pere-Pau Vazquez. Optimized Screen-Space Ambient Occlusion in Mobile Devices. In *the proceedings of the 21st International Conference on Web3D Technology Technology*, pages: 127–135, Anaheim, California, July 22-24, 2016. ISBN: 978-1-4503-4428-9. <https://doi.org/10.1145/2945292.2945300>.
- [Tha89] Tessman Thant. Casting Shadows on Flat Surfaces. *Iris Universe, Silicon Graphics, Inc* 1989, pages 16-19.
- [Tak09] Nawel Takouachet. Utilisation de critères perceptifs pour la détermination d'une condition d'arrêt dans les méthodes d'illumination globale. *Mémoire de thèse de doctorat en informatique*, Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Informatique du Littoral, 29 Janvier 2009.
- [Var16] Konstantinos Vardis. Efficient Illumination Algorithms for Global Illumination In Interactive and Real-Time Rendering. *PhD thesis*. Department of Informatics Athens University of Economics & Business Greece. December 2016.
- [VG97] E. Veach and L.J. Guibas. Metropolis light transport. In *Turner Whitted, editor, SIGGRAPH 97*, Addison Wesley, pages: 65–76, August 1997.
- [Vea97] Eric Veach. Robust Monte Carlo methods for light transport simulation. *PhD thesis*. Stanford University, 1997. ISBN: 0-591-90780-1.
- [VPG13] Kostas Vardis, Georgios Papaioannou and Athanasios Gaitatzes. Multi-view ambient occlusion with importance sampling. *Published in: Proceeding I3D '13 Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pages: 111-118, Orlando, Florida — March 21 - 23, 2013. ISBN: 978-1-4503-1956-0. <https://doi.org/10.1145/2448196.2448214>.

- [Whi80] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. Published in Magazine Communications of the ACM, Volume 23, N° 6, pages: 343–349, 1980.
- [WPF90] Andrew Woo, Pierre Poulin and Alain Fournier. A survey of shadow algorithms. *IEEE Computer Graphics & Applications*, pages: 13–32, Volume 10, N° 6, November 1990.
- [Wad07] Nicholas. J Wade. Image, eye, and retina (invited review). *Journal of the Optical Society of America A*. Volume 24, Issue 5, pages: 1229-1249, May 2007. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.24.001229>.
- [WM05] Cort J Willmott, Kenji Matsuura. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance. *Published in Climate Research*, Volume 30, pages: 79–82, 2005. <http://dx.doi.org/10.3354/cr030079>.
- [Wil78] Lance Williams. Casting curved shadows on curved surfaces. *In ACM SIGGRAPH '78 Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Volume 12 Issue 3, pages: 270–274, August 1978.
- [WH03] Chris Wyman and Charles D. Hansen. Penumbra Maps: Approximate Soft Shadows in Real-Time. *In Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering Techniques*, Leuven, Belgium, pages: 202–207, June 25-27, 2003. ISBN:3-905673-03-7.
- [Xu+15] Zhe Xu, Bixuan Li, Xianjie Cai, Hanqiu Sun and Yanci Zhang. Generate Accurate Soft Shadows Using Complete Occluder Buffer. *Published in: Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics), 2015 14th International Conference*, pages: 97-104, August 26-28, 2015, IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/CADGRAPHICS.2015.35>.
- [ZIK98] Sergej Zhukov, Andrej Inoes, and Grigorij Kronin. An ambient light illumination model. *In: Drettakis, G., Max, N. (eds.) Rendering Techniques '98 (Proceedings of Eurographics Rendering Workshop '98)*. Pages: 45–56, Springer, Berlin Heidelberg New York, 1998. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6453-2_5.
- [ZB18] Abd El Mouméne Zerari and Mohamed Chaouki Babahenini. *Screen Space Ambient Occlusion Based Multiple Importance Sampling for Real-Time Rendering*. *Published in: Journal 3D Research*. Volume 9, issue 1, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13319-017-0152-9>.
- [Zer+16] Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini, Naima Bahi and Sarra Khemliche. Fast Soft Shadow with Screen Space Ambient Occlusion for Real Time Rendering. *In Proceedings of the first Mediterranean Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. Pages : 71-77 At Tebessa, Algeria on November 22-23, 2016. <https://doi.org/10.1145/3038884.3038896>.

- [Zer+14] Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini, Naima Bahi et Sarra Khemliche, Ombres douces avec source de lumière surfacique. *La quatrième Journées Doctorales en Informatique*, Université de 8 Mai 1945-Guelma, 03-04 décembre 2014.