

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

Université Mohamed Khider – BISKRA  
Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie  
Département d'informatique  
Laboratoire LESIA

N° d'ordre:.....

Série:.....



## Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT  
EN SCIENCE

**Spécialité : Informatique**

*Intitulée*

**Eclairage dynamique et ombrage temps réel  
des forêts exploitant les GPUs**

*par*

**Fayçal ABBAS**

Soutenue le 30/04/2018 devant le jury composé de :

NourEddine DJEDI	Professeur	Université de Biskra	Président
Mohamed Chaouki BABAHENINI	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
Mohamed Nadjib KOUAHLA	MCA	Université de Guelma	Examineur
Kamal Eddine MELKEMI	Professeur	Université de Batna 2	Examineur

# *Résumé*

L'illumination des scènes naturelles, à l'instar d'une forêt fait partie des problèmes les plus complexes à résoudre à cause de la complexité géométrique et photométrique multi-échelle caractérisant ce type de scènes, le but de cette thèse est de gérer la complexité photométrique, qui provient des multiples inter-réflexions lumière-matière des objets composant la scène. Vu que la présence de l'illumination indirecte est indispensable pour le réalisme des scènes de forêts, nous proposons une nouvelle approche permettant de l'approximer. Notre proposition procède en deux étapes :

La première étape consiste à générer un nuage de points représentant les feuilles des arbres, ce nuage de points est composé de deux classes (visible, non-visible) non linéairement séparables.

La seconde étape consiste à effectuer une classification de nuage de points en appliquant la fonction radiale Gaussienne qui mesure la ressemblance en terme de distance entre chaque feuille et une feuille noyau, cela permet d'approximer les requêtes de visibilité afin d'extraire les feuilles qui seront utilisées pour calculer l'illumination indirecte échangée entre les feuilles voisines.

Notre approche permet de traiter efficacement les échanges lumineux dans une scène de forêt, elle permet un calcul rapide et produit des images de bonne qualité visuelle, tout en tirant profit du traitement parallèle offert par les GPUs.

**Mots-clés :** Illumination indirecte des forêts, fonction noyau à base radiale gaussienne, rendu des scènes naturelles

## ملخص

إن إضاءة المشاهد الطبيعية، مثل الغابة، هي واحدة من أكثر المشاكل المعقدة التي يجب حلها بسبب التعقيد الهندسي المتعدد الأبعاد والتعقيد الضوئي الذي يميز هذا النوع من المشاهد. الهدف من هذه الأطروحة هو إدارة التعقيد الضوئي، وبأني هذا التعقيد من خلال الانعكاسات المتعددة لأشعة الضوء ومكونات مواد الأجسام في المشهد، لأن وجود الإضاءة غير المباشرة أمر ضروري لواقعية مشاهد الغابات، فإننا نقترح طريقة جديدة لتقدير الإضاءة غير المباشرة، تتكون هذه الطريقة من خطوتين:

تتمثل الخطوة الأولى في انشاء سحابة نقطية تمثل الأوراق، نفترض أن السحابة النقطية تتكون من فئتين (مرئية وغير مرئية)، لا يمكن فصلهما خطيا والخطوة الثانية اجراء تصنيف للسحابة النقطية من خلال تطبيق الدالة ذات النواة الشعاعية الغوسية التي تقيس التشابه من حيث المسافة بين الورقة النواة وكل أوراق الشجرة، هذا يجعل من الممكن تقريب استعلامات الرؤية من أجل استخراج الأوراق التي سيتم استخدامها لحساب كمية الإضاءة غير المباشرة المتبادلة بين الأوراق المجاورة.

تتيح طريقتنا التعامل بفعالية مع التبادلات الضوئية في الغابات، وهذا يسمح بحساب سريع وينتج صوراً بجودة جيدة، كل هذا بالاستفادة من القوة الهائلة لوحدة معالجة الرسومات.

### الكلمات المفتاحية

الإضاءة غير المباشرة للغابات، الدالة الشعاعية الغوسية، تقدير الرؤية، تقديم المشاهد الطبيعية

# ***Abstract***

The illumination of natural scenes like a forest is one of the most complex problems to solve because the multi-scale geometric complexity and photometric complexity characterizing this type of scene. The goal of this thesis is to manage photometric complexity, this complexity comes from the multiple inter-reflections between light-matter of the objects composing the scene. The presence of indirect illumination is essential for the realism of forest scenes, we propose a new method to approximate indirect illumination. Our method proceeds in two steps:

The first step is to generate a cloud of points representing the leaves, we suppose that the point cloud is composed of two classes (visible, non-visible) non-linearly separable.

The second step is to perform a classification of points cloud by applying the Gaussian radial function which measures the similarity in terms of distance between each leaf and a kernel leaf, this allows to approximate the visibility requests to extract the leaves that will be used to calculate the amount of indirect illumination exchanged between neighboring leaves.

Our approach allows efficiently treat the light exchanges in the scene of a forest, it allows a fast computation and produces images of good visual quality, all this takes advantage of the immense power of computation of the GPU.

**Keywords** : Indirect illumination of forest , Gaussian Radial basis Function, Approximation visibility \_ Rendering natural scene

## **Dédicace**

*A mes parents, mes frères et mes soeurs.*

*Ma femme et mes enfants*

*A la mémoire de notre soeur Ouannes Nesrine.*

## ***Remerciement***

En premier lieu, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la force et la patience nécessaire pour achever ce travail de thèse.

Je tiens tout d'abord à manifester ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse Pr. Mohamed Chaouki BABAHENINI pour m'avoir fait profiter de son expérience dans la recherche et de la qualité de son encadrement pendant toute la durée de la thèse, sa disponibilité et ses conseils ont été très constructifs.

Je suis extrêmement reconnaissant à tous les membres de jury qui ont pris le temps d'examiner mon travail :

Pr. NourEddine DJEDI, Professeur à l'Université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse, ainsi Dr. Mohamed Nadjib KOUAHLA, Maître de conférences à l'Université de Guelma, Pr. Kamal Eddine MELKEMI, Professeur à l'Université de Batna, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Pour finir, je suis infiniment reconnaissant à ma famille, à mes enfants pour leur patience et leur soutien sans faille pendant la réalisation de ce travail.

# Table de Matières

Introduction Générale

Motivations .....	1
Contributions .....	3
Organisation de la thèse .....	5
Chapitre 1 Les Méthodes de l'Illumination Globale .....	7
1.1 Introduction .....	7
1.2 Radiométrie.....	7
1.2.1 Angle solide .....	7
1.2.2 Le flux lumineux.....	8
1.2.3 Intensité lumineuse.....	8
1.2.4 L'éclairement (irradiance) .....	9
1.2.5 La luminance (radiance) .....	9
1.2.6 La relation entre les différentes quantités radiométriques .....	10
1.3 Propriétés et concepts.....	11
1.3.1 Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle.....	11
1.3.1.1 La loi de de Helmholtz .....	12
1.3.1.2 Conservation de l'énergie.....	12
1.4 Illumination locale et illumination globale.....	14
1.5 Équation du rendu .....	15
1.6 Algorithmes pour la résolution de l'équation de rendu.....	16
1.7 Méthodes à base des techniques des éléments finis .....	17
1.7.1 Radiosité classique .....	17
1.7.2 Radiosité hiérarchique.....	18
1.8 Méthodes stochastiques .....	19
1.8.1 Intégration par la méthode de Monte Carlo .....	19
1.8.2 Échantillonnage préférentiel (importance sampling) .....	21
1.8.3 Roulette russe.....	22
1.8.4 Metropolis .....	22
1.8.5 Le tracé de chemins ( Path-Tracing ) .....	23
1.8.6 Lancer de photon.....	24
1.8.7 Radiosité instantané.....	25

1.8.8	Le cache d'éclairage (Irradiance caching).....	26
1.9	Transfert de radiance pré-calculé .....	28
1.10	Bilan et conclusion.....	30
	Chapitre 2.....	33
	Modèles d'éclairages pour les scènes de Forêts.....	33
2.1	Introduction .....	33
2.2	Modèle à base d'occultation Ambiante .....	33
2.3	Modèle probabiliste.....	37
2.4	Modèle à base de pré-calcul .....	42
2.5	Conclusion .....	46
	Chapitre 3 .....	47
	Approximation de Visibilité pour le l'éclairage Global .....	47
3.1	Introduction .....	47
3.2	Calcul exact de la visibilité .....	48
3.3	Approximation de visibilité.....	48
3.4	Conclusion .....	53
	Chapitre 4 .....	55
	Eclairage Direct et Indirect pour les Scènes de Forêts .....	55
4.1	Introduction .....	55
4.2	Modèle d'illumination.....	55
4.3	Réflexion de la lumière par les feuilles .....	57
4.4	L'illumination due au soleil.....	58
4.5	L'illumination due au ciel.....	59
4.6	L'illumination indirecte.....	59
4.6.1	Bases théoriques des méthodes Noyaux .....	60
4.6.2	Caractéristiques des fonctions noyaux.....	61
4.6.3	Noyau radial Gaussien.....	63
4.6.4	Solution proposée pour le calcul d'illumination indirecte .....	65
4.7	Description du pipeline.....	70
4.8	Conclusion .....	74
	Chapitre 5 .....	75
	Résultats et validation.....	75
5.1	Introduction .....	75
5.2	Validation .....	77



5.3	Discussion.....	86
	Chapitre 6.....	87
6.1	Conclusion.....	87
6.2	Perspectives.....	88

## Liste des figures

Figure 1-1 Illustration d'un angle solide.....	8
Figure 1-2 Illustration du concept de Flux .....	8
Figure 1-3 Représentation de l'irradiance à l'intérieur d'un hémisphère $\Omega$ .....	9
Figure 1-4 Représentation de la luminance.....	10
Figure 1-5 Représentation de l'éclairement énergétique E en fonction de la luminance.....	10
Figure 1-6 Schéma illustrant la fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle (BRDF). .....	12
Figure 1-7 Illustration de la relation entre l'éclairement E et la luminance incidente.....	13
Figure 1-8 BRDF spéculaire.....	14
Figure 1-9 Illustration de l'équation de rendu.....	15
Figure 1-11 La géométrie associée à la formulation surfacique de l'équation de rendu. ....	16
Figure 1-12 Quatre échanges à des niveaux différents.....	19
Figure 1-13 une scène rendue avec path tracing.....	24
Figure 1-14 La méthode du Photon Mapping permet de simuler de nombreux effets et notamment les caustiques. [RM10]......	25
Figure 1-15 Rendu avec l'algorithme de radiosité instantanée [KL08]......	26
Figure 1-16 Le rendu final d'une scène illuminée en utilisant un lancer de rayon pour l'illumination directe et le cache d'éclairement pour l'illumination indirecte [GSH+92]. ....	27
Figure 1-17 (a) le terme de visibilité (b) le facteur géométrique (c) la fonction transfert.....	29
Figure 2-1 Un point p situé dans une zone encaissée recevra moins de lumière.....	34
Figure 2-2 Approximation d'arbres avec ellipsoïdes [KSM+06]. ....	34
Figure 2-3 La visibilité approximative [KSM+06]. ....	35
Figure 2-4 L'interaction entre l'arbre et le terrain [KSM+06]......	35
Figure 2-5 Approximation de visibilité pour l'herbe [KSM+06] .....	36
Figure 2-6 Représentation Ellipsoïde [JMB07]......	37
Figure 2-7 Paramétrisation de l'enveloppe d'un arbre depuis la feuille centrée en P [BBP08]....	38
Figure 2-8 La radiance de patch de forêt modélisée par ellipsoïde (a) Ombrage de feuillage (b). Mise à l'échelle verticale (c) suivi d'une rotation (d)arbres sphériques sur un sol horizontal[EF12]......	39
Figure 2-9 Lattice de Boltzman [GS08]. ....	41
Figure 2-10 a - illumination locale, b- illumination locale plus une composante ambiante, c- visualisation volumique à l'aide de lattice de Boltzman, d- illumination à base lattice de Boltzman[GS08]. ....	42
Figure 2-11 le développement d'une fonction sphérique en harmoniques sphériques[MM07]..	42
Figure 2-12 Illustre quelques premiers termes de $Y_{lm}$ , la couleur rouge représente les valeurs positives et la couleur verte représente les valeurs négatives [MM07]......	43
Figure 2-13 Arbre avec (126,000 triangles), approximation en utilisant 60 Billboards avec illumination [BCF+05]......	44
Figure 2-14 a- arbre avec illumination globale, b- illumination directe due au soleil, c- illumination directe due au ciel, d- illumination indirecte[CBL+11]......	45
Figure 3-1 Illumination globale avec shadow map imparfait [TR12]......	49

Figure 3-2 Aperçu de la méthode de transformée inverse pour le calcul de l'illumination indirecte[BGB+17].	50
Figure 3-3 Illumination globale en temps réel d'une scène architecturale rendu avec l'algorithme de[REK+11].	51
Figure 3-4 Comparaison entre les résultat de VPL tracing running on the GPU (a) et l'image de référence en CPU(b) [BT11].	52
Figure 3-5 Illustration de visibilité à partir des trois points rouges [NBM+14].	52
Figure 3-6 a : Illumination directe, b : illumination indirecte rendu en 1.21 frame per seconde [Tim12].	53
Figure 4-1 illustration des principaux interaction des rayons de lumière pour l'arbre.	56
Figure 4-2 Réflexion de l'environnement map sur l'arbre	59
Figure 4-3 Exemples de valeurs de noyau radial obtenus pour $\sigma = 0.1$ .	61
Figure 4-4 illustre la somme de deux noyaux orthogonaux de dimension 1.	62
Figure 4-6 Illustration de la fonction noyau à base gaussienne [DK14].	64
Figure 4-7 <i>Les points voisins sont en rouge et les points non-voisins sont en bleu.</i>	64
Figure 4-8 Illustre la transition depuis le modèle géométrique vers le nuage de points.	66
Figure 4-11 Le GPU récupère les données pour le calcul de la composante indirecte.	71
Figure 5-1 Les performance de notre modèle en fonction du nombre d'arbres et $\sigma$ .	76
Figure 5-2 Comparaison qualitative pour les différentes composantes d'illumination entre notre approche et la méthode de path tracing.	79
Figure 5-3 Le RMSE et SSIM des différentes composantes de l'illumination calculée entre les images résultats obtenus par notre approche et les images de référence.	80
Figure 5-4 Comparaison entre notre approche et la méthode de suivi de chemin.	81
Figure 5-5 Illumination due au soleil, (c) illumination due au ciel, (c) illumination directe + indirecte.	82
Figure 5-6 (a) La somme des trois composantes, (b) l'éclairage direct dû au soleil, (c) l'éclairage dû au ciel, (c) l'éclairage indirect.	82
Figure 5-7 Plusieurs arbres avec texture de feuilles différentes.	83
Figure 5-8 Feuillage avec différent texture rendu avec notre approche.	83
Figure 5-9 Forêt avec illumination directe et indirecte rendu avec notre approche.	84
Figure 5-10 Feuillage avec ombre porté.	84
Figure 5-11 Rendu de dense forêt avec notre technique.	85
Figure 5-12 Rendu d'une forêt avec rochers et herbes.	85

## Liste des tableaux

Tableau 1-1 Comparatif des quantités radiométriques et photométriques.....	11
Tableau 4-1 Les différents types de noyaux .....	62

## Liste des Algorithmes

Algorithme 01	Illumination directe due au ciel.....	73
Algorithme 02	Illumination directe due au soleil.....	73
Algorithme 03	Illumination indirecte.....	74

## **Introduction générale**

Rendre des scènes naturelles de manière réaliste est un sujet d'intérêt majeur pour la recherche en images de synthèse, ainsi que pour de nombreuses applications dans de nombreux domaines tels que la conception architecturale, les jeux vidéo, l'industrie cinématographique, la visualisation cartographique et scientifique. Dans ces applications, les images doivent être calculées et affichées entre 15 et 60 fois par seconde, et ce afin de tromper le cerveau de l'utilisateur et lui donner une sensation de mouvement continu et d'immersion.

Générer donc des images de synthèse comportant des forêts basées sur l'éclairage réaliste d'une scène 3D en temps réel peut s'avérer une tâche difficile à cause de sa grande complexité géométrique, car on peut remarquer que celle-ci est constituée d'une multitude d'arbres, tous différents les uns des autres, eux même construits selon des lois naturelles relativement complexes. En particulier, l'ombrage dû aux variations du terrain, aux arbres entre eux, et à la forêt sur sol, est un aspect essentiel du réalisme. De même, l'apparence de la forêt est fonction de la direction du soleil, qui, à cause de fait que le feuillage est translucide, éclaire plus ou moins toutes les feuilles de la forêt.

L'étude du transport de la lumière dans un environnement virtuel, doit être accomplie par le biais d'algorithmes d'illumination globale. Ce vaste domaine a suscité de nombreux efforts de recherche qui se sont concentrés sur le développement d'algorithmes d'illumination globale en rendu temps réel, précis et robustes au fil des ans.

## Motivation

Dans le cas de rendu photo-réaliste, une représentation précise d'une scène virtuelle exige une modélisation géométrique détaillée, ainsi qu'une simulation d'éclairage physiquement correcte. Vu que les machines sont limitées dans leurs ressources de calcul, et que les simulations graphiques sont extrêmement coûteuses, le temps de calcul de rendu devient alors un critère majeur.

Dans la réalité les objets sont éclairés par une combinaison de lumière directe et indirecte, en effet la lumière directe éclaire les objets directement à partir des sources de lumière, cependant la lumière indirecte prend en compte les multiples inter-réflexions entre le rayon de lumière et les objets composant la scène. Le calcul de la composante indirecte impose aux développeurs de gérer une grande quantité d'informations, provoquant beaucoup de calculs et consommant l'espace mémoire afin de produire des images plus riches.

L'illumination globale en temps réel des scènes complexes à l'instar d'une forêt fait partie des problèmes les plus difficiles à résoudre à cause des multiples inter-réflexions (illumination indirecte) entre lumière - matière des objets composant la scène, désormais une simulation précise est trop coûteuse n'est pas envisageable pour ce type de scène, en temps réel.

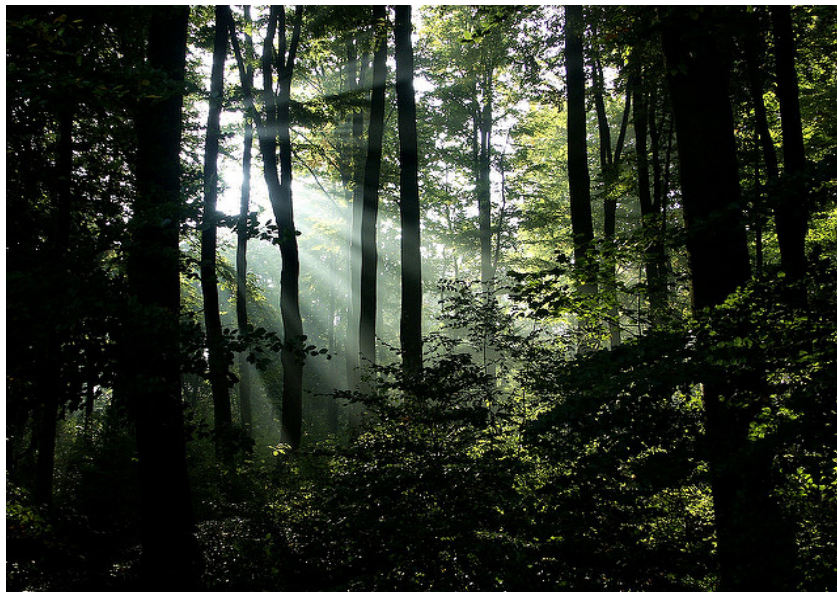
Avec le développement des processeurs graphiques (GPU) et du calcul parallèle, le calcul approché de l'illumination globale devient plus accessible, en utilisant des compromis entre la richesse visuelle (détail) et la complexité des calculs liée à la complexité photométrique.



(a) Jorden Esser /flickr sous licence Creative Commons.

<https://www.flickr.com/photos/48206448@N06/37698809206/sizes/l>

Un exemple de diffusion de la lumière au sein d'une forêt.



(b) Joeke Pieters/flickr sous licence Creative Commons.

<https://www.flickr.com/photos/joekepieters/2951366595/sizes/z/>

Illustrant la complexité géométrique et photométrique.



## Contribution

Notre travail représente une tentative dans la voie d'explorer les implications de l'approximation de l'éclairage indirect dû aux feuilles et aux branches des arbres, en procédant à l'accélération de techniques existantes, en utilisant une fonction permettant de calculer l'illumination en fonction de la distance entre les feuilles.

Dans ce contexte, nous proposons une nouvelle approche qui permet d'approximer les requêtes de visibilité, cette approche traite le problème en deux étapes :

la première étape consiste à générer un nuage de points représentant les feuilles, où nous supposons que le nuage de points est composé de deux classes (visible, non-visible) non linéairement séparable, la seconde étape consiste à effectuer une classification du nuage de points en appliquant la fonction noyau à base radiale Gaussienne qui mesure la ressemblance en terme de distance entre chaque feuille et une feuille noyau. Cela permet d'approximer les requêtes de visibilités afin extraire les feuilles qui seront utilisées pour calculer la quantité de l'illumination indirecte échangée entre les feuilles voisines.

L'approche proposée permet de traiter efficacement les échanges lumineux dans la scène, elle permet un calcul rapide et produit des images de bonne qualité visuelle, en tirant profit de l'immense puissance de calcul des processeurs graphique GPU.

Les problèmes et les défis posés par les scènes naturelles en particulier les forêts est la complexité géométrique et photométrique, en effet les forêts contiennent une quantité très importante de petites détails difficile à modéliser, ainsi la complexité photométrique (absorption, transmission et réflexion) due aux multiples interactions lumière-matière de différents organes constituent les arbres d'une forêt.

Nous proposons donc, un modèle analytique pour gérer l'illumination solaire directe et l'illumination due au ciel, la présence d'effets d'illumination indirecte est primordial pour le réalisme de la scène mais le calcul précis de toutes les interactions implique une très grande complexité et un coût de calcul important en temps d'exécution et espace mémoire.

Nous proposons une nouvelle approche pour approximer les requêtes de visibilité pour calculer l'illumination indirecte, dans un délai interactif. L'approche est basée sur la fonction radiale gaussienne afin d'extraire les feuilles qui seront utilisées pour calculer la quantité de l'illumination indirecte échangée entre les feuilles voisines, à partir de cette classification.

La contribution principale est donc la proposition d'une technique permettant de surmonter la complexité posée par la composante indirecte, basée sur l'approximation de la visibilité, qui utilise la fonction noyau radiale gaussienne afin d'extraire les feuilles qui contribuent le plus pour calculer la quantité de l'illumination indirecte échangée entre les feuilles voisines.

Les principales caractéristiques de cette approche sont :

- Proposition d'un modèle indépendant de la géométrie de l'arbre.
- Le calcul des inter-réflexions lumineuses échangés entre une feuille et les feuilles voisines est indépendant du point de vue.
- Les gains de performances en remplaçant le temps de calcul consommé par les requêtes de visibilité par une formule simple basée sur des calculs de distance entre les feuilles.
- Réduction de la complexité imposée par l'équation de réflexion multiple à un modèle simple à mettre en œuvre.
- Exploitation du parallélisme fourni par les GPUs.

## L'organisation de la thèse

Nous avons organisé notre manuscrit sous la forme d'une introduction générale, de six chapitres d'une conclusion générale, et d'une bibliographie regroupant l'ensemble de références que nous avons utilisé.

**Chapitre 1** : le premier chapitre présente une vue d'ensemble, ainsi que les concepts fondamentaux qui sont indispensables pour comprendre l'illumination globale. Plus précisément, nous allons expliquer comment la simulation de l'éclairage se fait dans un environnement synthétique. Nous allons brièvement expliquer les phénomènes de transport de la lumière et ses implications.

**Chapitre 2** présente les modèles d'illuminations des forêts. Dans ce chapitre nous avons classé les modèles en trois classes, les modèles à base de facteur d'occultation, les modèles probabilistes et les modèles à base de pré-calcul, une étude bibliographique de ces techniques est présentée, ensuite nous exposons un bilan pour montrer les avantages et les inconvénients de chaque modèle.

**Chapitre 3** : nous introduisons plus en détail la problématique de calcul des requêtes de visibilité en présentant un état de l'art des méthodes à base d'approximation de visibilité pour le calcul d'illumination globale.

**Chapitre 4** : décrit une description de notre contribution, où nous proposons un modèle analytique pour gérer l'illumination solaire directe et l'illumination due au ciel, nous présentons les concepts fondamentaux des méthodes noyaux gaussiennes, une attention particulière est accordée à la méthode noyau radial gaussien, ainsi nous proposons une nouvelle approche à base de noyau gaussien pour approximer les requêtes de visibilité afin de calculer l'illumination indirecte.

**Chapitre 5** : est consacré pour la présentation des résultats obtenus par notre approche, une comparaison à travers des mesures quantitatives avec la méthode de suivi de chemin afin d'évaluer l'efficacité de notre approche en termes de performance.

Enfin dans le **chapitre 6** nous concluons en faisant une synthèse de nos travaux et nous discutons les futures pistes de recherche permettant de poursuivre ce travail.

**Première partie**

**Concepts Fondamentaux et Etat de  
l'art de L'éclairage Global**

# 1 Chapitre 1

## Les Méthodes de l'Illumination Globale

### 1.1 Introduction

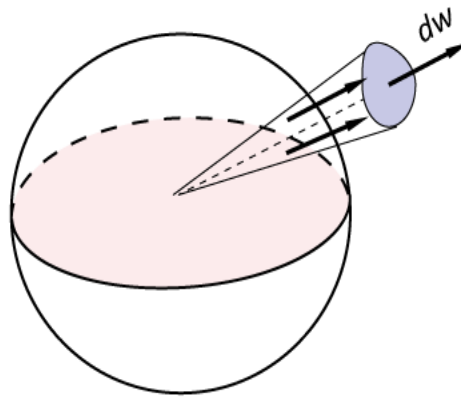
Dans ce chapitre nous explorons les concepts de calcul d'illumination globale pour une scène 3D, en d'autres termes le calcul de la quantité de l'énergie lumineuse répartie dans cette dernière, cela implique la compréhension des quantités physiques qui représentent l'énergie lumineuse, En effet la radiométrie est le domaine d'étude de lumière, nous expliquerons d'abord les grandeurs radiométriques de la lumière nécessaires à la compréhension de l'équation de rendu et ses implications.

### 1.2 Radiométrie

La radiométrie décrit la mesure physique du rayonnement électromagnétique, ce dernier qui transporte à travers l'espace une certaine quantité d'énergie, associée à une source et caractérisée par une position, une direction de propagation et une longueur d'onde. Les unités radiométriques sont utiles pour décrire les algorithmes d'éclairage. Dans cette section, nous passons en revue les grandeurs radiométriques de bases.

#### 1.2.1 Angle solide

L'angle solide d'une surface  $S$ , associé à un objet est défini comme le rapport entre l'aire représentant la projection de l'objet sur la sphère et le rayon au carré de cette dernière, autrement dit c'est l'angle solide sous lequel on voit une surface, son unité est le stéradian ( $sr$ ).

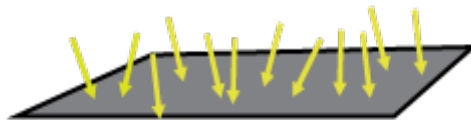


**Figure 1-1** Illustration d'un angle solide.

### 1.2.2 Le flux lumineux

Le flux lumineux est la quantité radiométrique fondamentale, cette quantité exprime la puissance de flux énergétique reçu par une surface  $S$ , émise par une source lumineuse par angle solide pendant une unité de temps  $t$ , le flux est noté par  $\Phi$  et exprimé en Watt ou le joule par seconde.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1-1)$$



**Figure 1-2** Illustration du concept de Flux

### 1.2.3 Intensité lumineuse

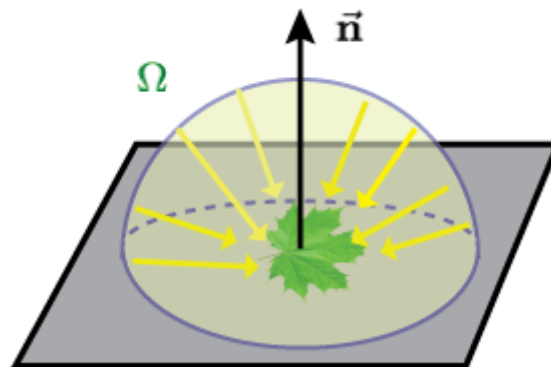
L'intensité lumineuse est définie comme le flux par unité d'angle solide dans une direction donnée, l'intensité lumineuse est exprimée en Watt par stéradian ( $W \cdot sr^{-1}$ ).

$$\mathbf{I}(\vec{w}) = \frac{d\phi}{d\vec{w}} \quad (1-2)$$

### 1.2.4 L'éclairement (irradiance)

L'éclairement reçu par un point  $p$  est le flux lumineux arrivant d'une source lumineuse par un élément de surface  $dA$ , l'irradiance est exprimée en *Watt* par mètre carré ( $W/m^2$ ).

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{d\phi}{dA} \quad (1-3)$$

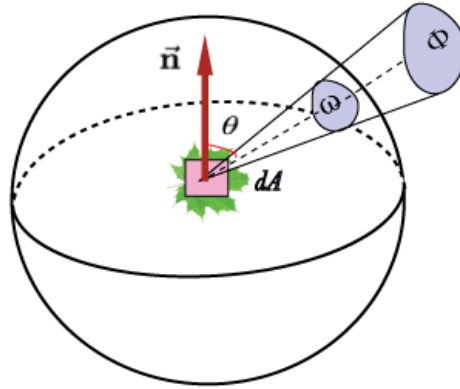


**Figure 1-3** Représentation de l'irradiance à l'intérieur d'un hémisphère  $\Omega$ .

### 1.2.5 La luminance (radiance)

La luminance  $L$  correspond au rapport entre le flux lumineux émis par un élément de surface  $dS$  dans une direction  $w$  par unité d'aire projetée, la luminance  $L$  est exprimé en *Watt* par mètre par stéradian ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ ).

$$L(x, \vec{w}) = \frac{d^2\phi}{\cos\theta dA d\vec{w}} \quad (1-4)$$



**Figure 1-4** Représentation de la luminance.

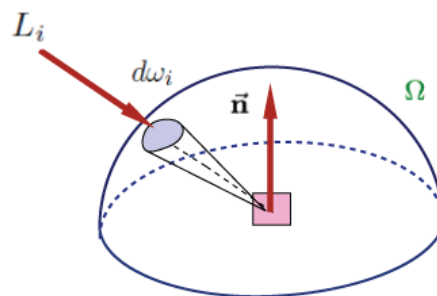
La radiance (la luminance) est en quelque sorte la quantité physique de lumière la plus utilisée dans le rendu photo-réaliste.

Il est probablement plus utile de considérer le rayonnement comme la puissance de la lumière à un point dans une direction particulière, ou de manière équivalente, comme la puissance radiante portée le long d'un rayon.

### 1.2.6 La relation entre les différentes quantités radiométriques

La perspective de pouvoir calculer l'illumination globale d'une scène 3D suscite également une véritable complexité, pour cela il est fortement intéressant de connaître la relation entre les différentes grandeurs.

Comme nous pouvons remarquer à partir des définitions de la section précédente nous pouvons établir une relation entre les différentes grandeurs et la luminance car la luminance est le seul terme à lequel l'œil est sensible, en effet c'est le terme le plus important pour le calcul de l'illumination globale, l'équation suivante décrit la relation entre l'éclairement (l'illuminance) et la luminance :



**Figure 1-5** Représentation de l'éclairement énergétique  $E$  en fonction de la luminance incidente  $L_i$ .



$$E(x) = \int_{\Omega} L_i(x \leftarrow \vec{w}) (\vec{w} \cdot \vec{n}) d\vec{w} \quad (1-5)$$

Autrement dit, l'éclairement en un point  $p$  est la somme de la luminance incidente  $L_i$  de toutes les directions de l'hémisphère par angles solides. La relation entre le flux et la luminance est exprimée par :

$$\Phi = \int_A \int_{\Omega} L_i(x, \vec{w}) \cos\theta d\vec{w} dx \quad (1-6)$$

Considérons une surface  $S$ , le flux pour chaque point de cette surface est la somme de la luminance venant de toutes les directions de l'hémisphère.

Quantité Radiométrique	Unité	Quantité photométrique	Unité
Flux énergétique	W	Flux lumineux	lm
Irradiance	W.m <sup>-2</sup>	Illuminance	lm.m <sup>-2</sup> i.e. lx
Intensité énergétique	W.sr <sup>-1</sup>	Intensité lumineuse	lm.m <sup>-2</sup> i.e.cd
Radiance	W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>	Luminance	W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>

**Tableau 1-1** Comparatif des quantités radiométriques et photométriques.

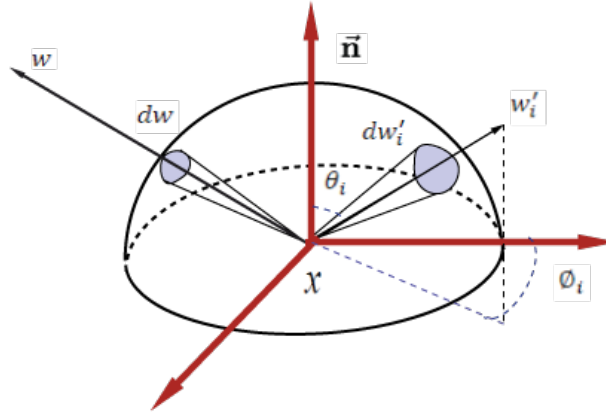
### 1.3 Propriétés et concepts

Dans cette section, nous décrivons quelques concepts et relations nécessaires pour la compréhension des algorithmes de calcul de l'éclairage.

#### 1.3.1 Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle

Cette fonction permet de modéliser la façon dont la lumière est réfléchié ou transmise par une surface quand un rayon lumineux atteint un point de cette surface, elle est définie comme le rapport entre la luminance réfléchié  $L_r$  dans une direction  $\vec{w}$ , et l'éclairement  $E$  au point  $x$  provenant de la direction  $\vec{w}'$ .

Par la suite nous utilisons l'acronyme BRDF pour la désigner, introduite par [NFE68]. Ce travail a été étendu au cas des rayons lumineux transmis [WJT71], [BGH82].



**Figure 1-6** Schéma illustrant la fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle (BRDF).

$$\mathbf{f}_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}', \vec{\omega}) = \frac{dL_r(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{dE_i(\mathbf{x}, \vec{\omega}')} = \frac{dL_r(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{L_i(\mathbf{x}, \vec{\omega}') \cos \theta_i d\vec{\omega}'} \quad (1-7)$$

#### 1.3.1.1 La loi de de Helmholtz

La BRDF est indépendante du sens de propagation de lumière cela dit :

$$\mathbf{f}_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}_1, \vec{\omega}_r) = \mathbf{f}_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}_r, \vec{\omega}_1) \quad (1-8)$$

#### 1.3.1.2 Conservation de l'énergie

Une surface ne peut réfléchir plus de lumière qu'elle n'en reçoit.

$$\int_{\Omega} \mathbf{f}_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}_1, \vec{\omega}_r) \cos \theta_i d\omega_i \leq 1 \quad (1-9)$$

La BRDF est un moyen formel pour décrire les interactions entre lumière et matière, en d'autres termes, elle modélise la quantité de lumière réfléchie dans une direction d'observation, en effet plusieurs modèles de BRDF utilisés pour représenter différents types de matériaux présentant les objets géométriques, nous distinguons deux types de bases de modèle de réflexion qui se produisent quand la lumière atteint un objet :

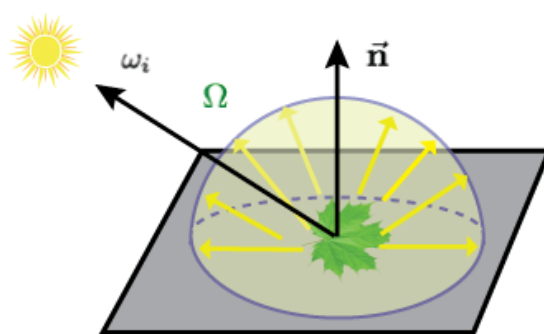
- Réflexion diffuse qui représente le phénomène de réflexion de lumière qui provient d'une source lumineuse, lors de l'interaction de la lumière avec les objets composant la scène, la lumière est réfléchiée dans toutes les directions. Si la surface est rugueuse (papier, pierre...) dans ce cas, une partie de la lumière est absorbée par la surface et une autre partie sera réfléchiée, cependant si la surface est lisse (miroir), toute la lumière incidente sera réfléchiée par la surface.

Dans le cas d'une surface lambertienne (parfaitement diffuse), la luminance réfléchiée à partir d'un point  $x$  est constante dans toutes les directions de l'hémisphère, la partie d'énergie réfléchiée par rapport à l'énergie incidente est connue sous le nom albedo, prend ses valeurs entre 0 et 1, cette constante dépend de la surface.

$$\rho_d(\mathbf{x}) = \frac{B(\mathbf{x})}{E(\mathbf{x})} = \frac{\int_{\Omega} L_r(\mathbf{x})(\vec{n} \cdot \vec{w}) d\omega}{E(\mathbf{x})} = \frac{L_r(\mathbf{x})\pi}{E(\mathbf{x})} \quad (1-10)$$

Une expression analytique qui gouverne une réflexion parfaitement diffuse est donnée par :

$$f_{r,d} = \frac{\rho_d(\mathbf{x})}{\pi} \quad (1-11)$$



**Figure 1-7** Illustration de la relation entre l'éclairement  $E$  et la luminance incidente.

- La réflexion spéculaire qui représente le phénomène de réflexion de lumière en fonction de rayon d'incidence et la direction de vue dont l'intensité est la même que le rayon incident.

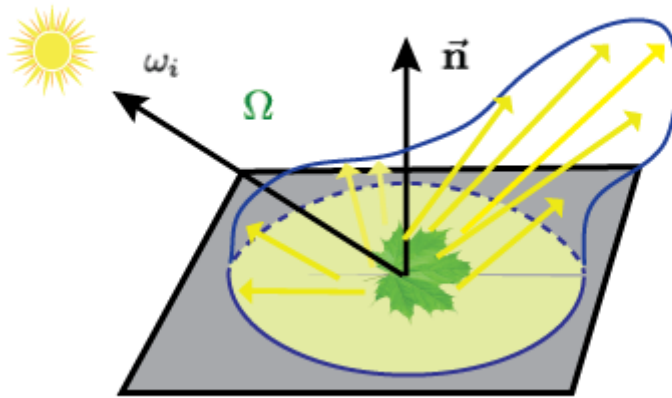


Figure 1-8 BRDF spéculaire.

Il est souvent possible de représenter la BRDF comme étant la somme de deux composantes.

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i \leftrightarrow \mathbf{w}_r) = f_{r,s}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i \leftrightarrow \mathbf{w}_r) + f_{r,d}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i \leftrightarrow \mathbf{w}_r) \quad (1-12)$$

## 1.4 Illumination locale et illumination globale

Le calcul d'illumination dans une scène 3D est une tâche difficile, notamment pour les scènes complexes, en effet la quantité de lumière atteignant un point de la surface est due à l'illumination directe et indirecte, l'éclairage direct prend en compte que l'éclairage qui atteint un point d'observation en ligne droite depuis la source lumineuse, en revanche l'éclairage indirect est l'apport de lumière obtenu par réflexion ou transmission sur les différentes surfaces présentes dans une scène. La présence des effets d'illumination indirecte permet de produire des images plus réalistes, cependant ce réalisme se répercute directement sur les performances, les évolutions apportés aux GPU suggère une excellente alternative pour réduire cette complexité notamment pour les applications temps réel.

## 1.5 Équation du rendu

Introduite par Kajiya en 1986 [Kaj86], cette équation permet d'exprimer la luminance sortant de n'importe point de la scène comme étant la somme de la luminance émise par ce point dans une direction donnée et la luminance réfléchie par ce point.

$$\mathbf{L}(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\omega}) = \mathbf{L}_e(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\omega}) + \mathbf{L}_r(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\omega}) \quad (1-13)$$

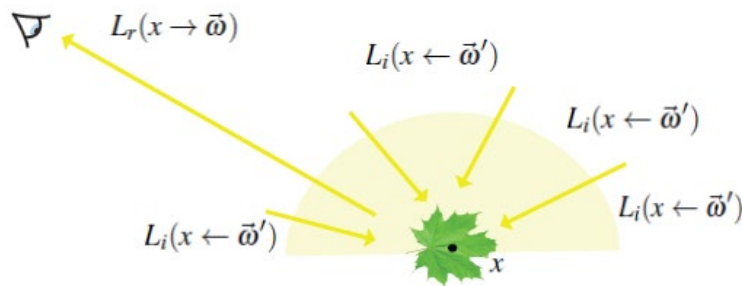
A partir de l'équation de la BRDF, nous pouvons déduire la relation entre la luminance incidente et la luminance réfléchie.

$$\mathbf{L}(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\omega}) = \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}' \leftrightarrow \vec{\omega}) \mathbf{L}(\mathbf{x} \leftarrow \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \mathbf{n}) d\omega' \quad (1-14)$$

Par substitutions de l'équation 2.14 dans l'équation 2.13 on trouve :

$$\mathbf{L}(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\omega}) = \mathbf{L}_e(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\omega}) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}' \leftrightarrow \vec{\omega}) \mathbf{L}(\mathbf{x} \leftarrow \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \mathbf{n}) d\omega' \quad (1-15)$$

Il est parfois plus pratique de passer d'une intégration par angle solide à une intégration par surface, ce qui va permettre de calculer la luminance émise pour chaque point de la scène que le calcul de la luminance incidente provient de toutes les directions de l'hémisphère.



**Figure 1-9** Illustration de l'équation de rendu.

L'angle solide différentiel  $d\omega'$  est exprimé par :

$$d\omega'_{xy} \cong \frac{(\mathbf{n}_y \cdot \mathbf{y}\mathbf{x}) dA_y}{\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|^2} \quad (2-16)$$

Avec  $dw'_{xy}$  est l'angle solide centré en  $x$  autour d'une direction  $xy$ .

Par substitutions de l'équation (2-16), on obtient la version surfacique de l'équation de rendu :

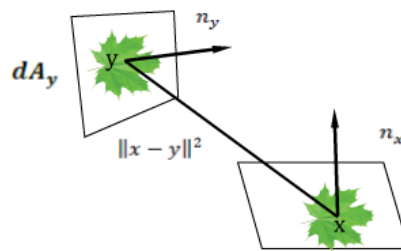
$$\mathbf{L}(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\mathbf{w}}) = \mathbf{L}_e(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\mathbf{w}}) + \int_A \mathbf{f}_r(\mathbf{x}, \mathbf{xy}, \vec{\mathbf{w}}) \mathbf{L}_i(\mathbf{x}, \mathbf{xy}) \frac{|n_{x,xy}| |n_{y,yx}|}{\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|^2} \mathbf{V}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{dA}_y \quad (1-17)$$

$$L(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\mathbf{w}}) = L_e(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\mathbf{w}}) + \int_A f_r(\mathbf{x}, \mathbf{xy}, \vec{\mathbf{w}}) L_i(\mathbf{x}, \mathbf{xy}) G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{dA}_y \quad (1-18)$$

Où

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{|n_{x,xy}| |n_{y,yx}|}{\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|^2} \quad \text{le facteur géométrique.}$$

$V(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  le terme de visibilité indiquant si  $x$  et  $y$  sont mutuellement visible.



**Figure 1-10** La géométrie associée à la formulation surfacique de l'équation de rendu.

## 1.6 Algorithmes pour la résolution de l'équation de rendu

Dans cette section, nous présentons les algorithmes qui permettent d'approximer une solution pour l'équation de rendu. Notons que l'équation du rendu telle que présenté par Kajiya est une équation intégrale multidimensionnelle et récursive. Il n'existe pas de solution analytique à cette équation, pour cela on utilise des solutions approchées obtenues par des techniques d'éléments finis comme l'algorithme de radiativité, ou des techniques probabilistes à base de la méthode de Monte-Carlo comme le suivi de chemins ou le tracé de photons, ....

## 1.7 Méthodes à base des techniques des éléments finis

### 1.7.1 Radiosité classique

Les algorithmes de radiosité reposent sur la loi de la conservation de l'énergie, ces derniers sont développés pour l'étude des transferts thermiques. En effet la méthode de radiosité a été introduite par Goral et al. [GTG+84], son principe consiste dans un premier temps de discrétiser toutes les surfaces composant la scène 3D en surface élémentaires "patch", pour chaque surface élémentaire l'algorithme de radiosité établit un bilan énergétique pour toutes les surfaces visibles dans la scène. L'éclairement de chaque point est déterminé en additionnant les flux lumineux reçus depuis toutes les surfaces visibles et la lumière émise par la surface élémentaire, le résultat est indépendant du point de vue, l'équation de radiosité s'écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{B}(x) = \mathbf{B}_e(x) + \rho(x) \int_A \mathbf{B}(y) K(x, y) dA_y \quad (1-19)$$

Avec

$B(x)$  : la radiosité au point  $x$ .

$B_e(x)$  : la radiosité émise depuis  $x$ .

$\rho(x)$  : albédo de la surface à laquelle appartient le  $x$ .

$K(x, y)$  : Paramètre noyau.

Où

$$\mathbf{K}(x, y) = \frac{\mathbf{G}(x, y) V(x, y)}{\pi} \quad (1-20)$$

$$\mathbf{G}(x, y) = \frac{\cos(\theta_{xy}, N_x) \cos(-\theta_{xy}, N_y)}{\pi r_{xy}^2} \quad (1-21)$$

Avec  $V(x, y)$  le terme de visibilité égale 1 si  $x$  et  $y$  sont mutuellement visibles et  $G(x, y)$  est le terme géométrique.

La radiosité  $B_i$  émis par un patch  $i$  et une facette de surface  $A_i$  est donné par :

$$B_i = \frac{1}{A_i} \int_{S_i} \int_{\Omega_x} L(x \rightarrow \theta) \cos(\theta, N_x) dw_\theta dA_x$$

$$B_i = \frac{1}{A_i} \int_{S_i} L(x) \int_{\Omega_x} \cos(\theta, N_x) dw_\theta dA_x$$

$$B_i = \frac{1}{A_i} \int_{S_i} L(x) \pi dA_x$$

$$\mathbf{B}_i = \frac{1}{A_i} \int_{S_i} \mathbf{B}(x) d\mathbf{A}_x \quad (1-22)$$

Pour calculer la radiosité à un point  $x$ , les équations intégrales sont résolues en les réduisant à un système approximatif d'équations linéaires. En supposant que la radiosité  $B(x)$  et la réflexion  $\rho(x) = \rho_i$  sont constantes pour chaque patch  $i$  l'équation (2-22) devient :

$$\mathbf{B}'_i = \mathbf{B}_{ei} + \rho_i \sum_j \mathbf{F}_{ij} \mathbf{B}'_j \quad (1-23)$$

$F_{ij}$  est le facteur de forme associé au patch  $i,j$  et sa valeur est donnée par :

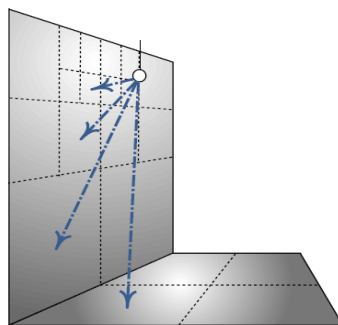
$$\mathbf{F}_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \mathbf{K}(x,y) d\mathbf{A}_y d\mathbf{A}_x \quad (1-24)$$

La précision de simulation d'éclairage par la méthode de radiosité est influée directement par la finesse du maillage des surfaces composant la scène, l'avantage de cette technique est d'être indépendant du point de vue et ses résultats peuvent donc être réutilisés pour la visualisation de la scène 3D lorsque le point de vue change. L'intérêt des algorithmes déterministes est l'absence de bruit dans la solution obtenue [PR09].

### 1.7.2 Radiosité hiérarchique

Les techniques de radiosité hiérarchique [CCW+88], tente de résoudre la limite majeure de la radiosité classique. Cette limite réside dans la lenteur de convergence, la solution apportée par la radiosité hiérarchique consiste à calculer une simulation d'éclairage basée sur le concept de discrétisation des surfaces visibles. En fait si la surface est visible, cette surface sera discrétisée finement, dans le cas contraire la surface sera discrétisée grossièrement, en décomposant la géométrie de la scène dans une hiérarchie tout en sauvegardant des liens sous la forme d'une structure de données, entre les surfaces qui interagissent entre elles pour un niveau donné de la hiérarchie.





**Figure 1-11** Quatre échanges à des niveaux différents.

On construit donc une hiérarchie de haut en bas en commençant par les surfaces qui décrivent la scène subdivisée choisi de telle sorte que son évaluation est rapide. En général, la structure de subdivision de la surface est un quadtree [HSA91].

## 1.8 Méthodes stochastiques

L'idée des méthodes stochastiques est fondée sur la génération des chemins lumineux et l'évaluation de la luminance pour chaque pixel de l'image intercepté par ces chemins lumineux. Les méthodes stochastiques utilisent l'intégration de Monte Carlo pour approximer l'équation de rendu afin de produire des images qualifiant de photo-réaliste, l'avantage principal de cette méthode est la simplicité à mettre en œuvre ainsi que le fait qu'elle prend en compte tous les interactions lumineuses.

### 1.8.1 Intégration par la méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo permet d'approximer l'intégrale d'une fonction sur un intervalle fini quand un calcul direct est impossible en raison de complexité ou de temps de calcul, pour évaluer l'intégrale d'une fonction  $f(x)$  sur un intervalle  $[a,b]$ .

$$\int_a^b f(x) dx \quad (1-25)$$

La première étape consiste à tirer  $n$  point aléatoire uniformément distribuée dans l'intervalle  $[a,b]$ , on obtient l'estimateur suivant :

$$\mathbf{F}_N = (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{f}(\mathbf{X}_i) \quad (1-26)$$

Où

$F_N$  : l'estimateur de Monte Carlo, plus le nombre d'échantillons  $N$  est grand, plus l'estimation est précise.

Nous montrons que l'espérance de l'estimateur  $F_N$  est égal à l'intégrale de  $f$

$$\begin{aligned} E[F_N] &= E \left[ \frac{(b-a)}{N} \sum_{i=1}^N f(X_i) \right] \\ E[F_N] &= \frac{(b-a)}{N} \sum_{i=1}^N E[f(X_i)] \\ E[F_N] &= \frac{(b-a)}{N} \sum_{i=1}^N \int_b^b f(x)p(x)dx \\ E[F_N] &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_b^b f(x)p(x)dx \\ E[F_N] &= \int_b^b f(x)dx \end{aligned} \quad (1-27)$$

Le calcul de l'écart type permet de connaître la vitesse de convergence de l'estimateur  $F_N$ , nous allons montrer comment calculer la vitesse de convergence d'un estimateur  $F_N$ .

Dans un premier temps il faut calculer la variance  $v^2$  ensuite nous calculons la racine carrée de la variance.

$$\mathbf{V}^2 = \frac{1}{N} \left( \int_0^\pi \mathbf{g}(\mathbf{x})^2 \mathbf{d}\mathbf{x} - \mathbf{I}^2 \right) \quad (1-28)$$

$$\mathbf{V} = \frac{1}{\sqrt{N}} [\mathbf{Y}] \text{ avec } [\mathbf{Y}] = \left[ \sqrt{\int_0^\pi \mathbf{g}(\mathbf{x})^2 \mathbf{d}\mathbf{x} - \mathbf{I}^2} \right] \quad (1-29)$$

Nous pouvons constater que le nombre d'échantillons des chemins lumineux à une grande influence sur la valeur de variance de l'estimateur de Monte Carlo, pour diviser l'erreur par deux, il faut quadrupler la valeur de  $N$ .

La limite de la méthode de Monte Carlo est le temps consommé pour converger vers une solution en particulier quand le nombre d'échantillons générés aléatoirement est grand, ainsi la variance qui est perçue sous forme de bruit présent dans cette dernière, cela est causé par le nombre réduit de points échantillonnés atteignant cette région de l'image.

### 1.8.2 Échantillonnage préférentiel (importance sampling)

Dans la section précédente nous avons présenté le concept de l'intégration de Monte Carlo et nous avons montré que cette méthode souffre de problème de bruit, cependant avec l'avènement des techniques d'échantillonnage préférentiel, ces dernières permettent de réduire le bruit pour l'estimateur de Monte Carlo.

Le principe d'échantillonnage préférentiel consiste à augmenter le nombre d'échantillons dans les zones de pixels qui ont une grande importance pour l'image finale et réduire l'échantillonnage pour les zones de pixels où la contribution de ces zones est minime au résultat final. Les échantillons ayant été affectés à l'estimateur  $F_N$  dans l'équation (2-26) sont distribués uniformément, pour passer à une distribution probabiliste une fonction de densité  $p$  est utilisée, l'équation (2-30) illustre cette approximation :

$$\overline{F_N} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(X_i)}{P(X_i)} \right] \quad (1-31)$$

Avec  $\mathbf{P}(\mathbf{X}) \geq \mathbf{0}$  et  $\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{P}(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \mathbf{1}$  (1-32)

Nous allons montrer que l'espérance de l'estimateur est égale à l'intégrale de  $f$

$$\mathbf{E}[F_N] = \mathbf{E} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(X_i)}{P(X_i)} \right] \quad (1-33)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_a^b \frac{f(x_i)}{P(x_i)} p(x) dx \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x) dx \\
 &= \int_a^b f(x) dx
 \end{aligned}$$

Nous constatons que si le choix de  $P(X)$  est adéquat avec la fonction  $f$ , l'estimateur converge rapidement.

### 1.8.3 Roulette russe

La technique de roulette russe [SG08] est une technique probabiliste utilisée pour accélérer les calculs en physique de particules, son principe consiste à éliminer les échantillons qui ne présentent pas assez d'importance pour le résultat finale, l'utilisation de la roulette russe permet de diminuer le temps de calculs par la réduction du nombre de points échantillonnés, la contribution d'un échantillon  $R(x_i)$  avec une probabilité  $P$  et un nombre  $y$  est un nombre aléatoire uniformément distribué est calculé comme suite :

$$\mathbf{R}(x_i) = \begin{cases} \frac{f(x_i)}{P} & \text{si } y_i < P \\ \mathbf{0} & \text{sinon} \end{cases} \quad (1-34)$$

L'espérance est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{E}[\mathbf{R}] = (1 - P) \times \mathbf{0} + P \times \frac{\mathbf{E}[\mathbf{R}]}{P} \quad (1-35)$$

La roulette russe permet aussi de décider si l'évaluation d'un chemin continue ou pas.

### 1.8.4 Metropolis

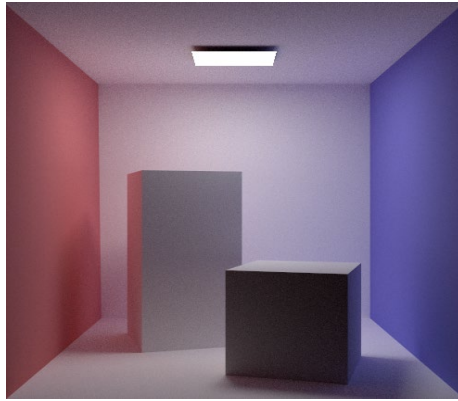
La technique Metropolis, appliquée au calcul de l'illumination globale, a été développée par Veach et Guibas [VG97], ce modèle est basé sur le principe d'échantillonnage Metropolis des chemins lumineux. Cet algorithme permet de générer une séquence de chemins de transport de lumière en appliquant des mutations aléatoires sur des chemins pré-calculés. Des exemples de mutations consistent à ajouter ou supprimer un point dans un chemin, déplacer un point. L'algorithme commence par

calculer un ensemble de  $n$  chemins aléatoires. Des nouveaux chemins sont générés en appliquant des stratégies de mutations. Chaque mutation peut être acceptée ou refusée suivant la contribution du chemin échantillonné associée dans l'image finale. Par exemple, une mutation appliquée à un chemin  $x$  produit un nouveau chemin  $y$ . Si ce chemin  $y$  n'a aucune contribution dans le rendu de l'image finale), sa probabilité d'acceptance est nulle et la mutation engendrée est rejetée.

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

### 1.8.5 Le tracé de chemins ( Path-Tracing )

L'algorithme du tracé de chemins [Kaj86] repose sur une approche stochastique. Il permet d'approximer l'équation de rendu en utilisant la méthode d'intégration de Monte Carlo, Il offre l'avantage de calculer l'illumination directe et indirecte ainsi il produit des images non biaisées, par conséquent l'algorithme de tracé de chemins souffre d'une importante variance, ce qui a pour résultat une convergence très lente. Il est également possible de réduire cette variance avec des techniques d'échantillonnage préférentiel afin d'améliorer la qualité de la solution, le principe de cette technique consiste dans un premier temps de suivre un rayon lumineux dans sa trajectoire dans une scène, à chaque point d'intersection, le rayon réfléchi en fonction du matériel de l'objet, en effet pour produire une image qualifiée de photo réaliste, cela nécessite de lancer un grand nombre de rayons par pixel.



**Figure 1-12** une scène rendue avec path tracing.

### 1.8.6 Lancer de photon

La méthode de Lancer de photon introduite par [Jen01] et permet de calculer l'illumination globale d'une scène 3D, en effet l'énergie lumineuse émise par les sources de lumière est représentée sous forme de photons, les chemins lumineux sont suivis depuis la source de lumière, cette méthode calcule l'illumination en deux étapes :

La première étape consiste à propager les photons depuis les sources lumineuses, un lancer de rayon direct combiné à une structure de stockage (carte de photon) est utilisé, dans cette étape différentes sources de lumière peuvent être utilisées, en occurrence les photons sont émis en fonction de différentes puissances de ces dernières. La puissance émise d'un photon est donnée par :

$$\xi_i = \frac{\xi_{total}}{n} \quad (1-36)$$

Où

$\xi_i$  : Puissance spectrale correspond au photon  $i$ .

$\xi_{total}$  : Puissance spectrale totale correspond à la source de lumière.

$n$  : le nombre de photons.

Trois phénomènes sont apparus lorsqu'un photon intercepte une surface, le photon est soit réfléchi, absorbé ou transmis, le calcul de flux entrant est approximé en utilisant une carte de photon par la localisation des photons les plus proches voisins, la relation entre le flux et la luminance est donnée par l'équation suivante :

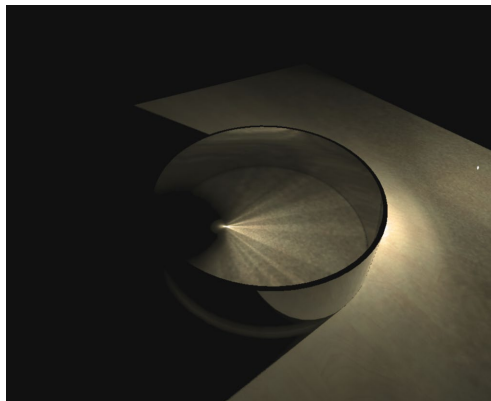
$$\mathbf{L}(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\mathbf{w}}) = \int_{\mathbf{s}} \rho(\mathbf{x}, \vec{\mathbf{w}}' \leftrightarrow \vec{\mathbf{w}}) \frac{d^2 \phi(\mathbf{x}, \vec{\mathbf{w}}')}{d\mathbf{A}(\mathbf{x})} d\mathbf{A}(\mathbf{x}) \quad (1-37)$$

Nous obtenons la luminance sortante depuis un point  $\mathbf{x}$  par:

$$\mathbf{L}(\mathbf{x} \rightarrow \vec{\mathbf{w}}) \approx \sum_{\mathbf{p}=1}^n \rho(\mathbf{x}, \vec{\mathbf{w}}_{\mathbf{p}} \leftrightarrow \vec{\mathbf{w}}) \frac{\Delta \phi_{\mathbf{p}}(\mathbf{x}, \vec{\mathbf{w}}_{\mathbf{p}})}{\pi r^2} \quad (1-38)$$

Où

$\phi$  : est le flux des  $n$  photons voisins de  $\mathbf{x}$  calculés par l'estimation de densité.



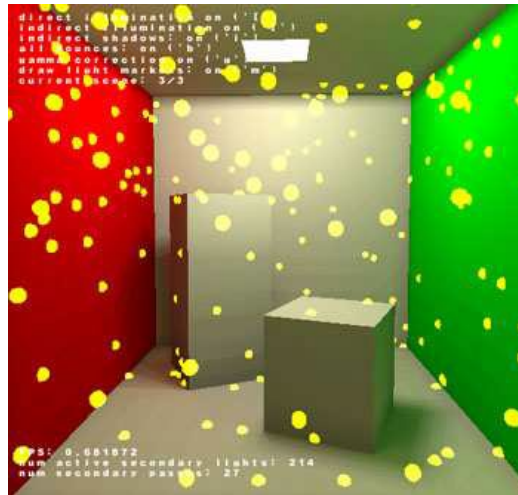
**Figure 1-13** La méthode du Photon Mapping permet de simuler de nombreux effets et notamment les caustiques. [RM10].

Cette méthode, donne des résultats quasi photo-réalistes. Elle permet également de calculer et de visualiser des effets optiques complexes tels que la réfraction par des surfaces courbes ou la diffusion à travers des matériaux translucides, cependant elle montre une forte variance, cette dernière peut être réduite par l'utilisation d'un grand nombre de photon durant la phase d'estimation de radiance, la contribution des photons peut être filtrée par l'utilisation des filtres gaussiens, en occurrence plus le photon est éloigné d'un point  $\mathbf{x}$ , moins il contribue à l'estimation de sa radiance.

### 1.8.7 Radiosité instantané

La radiosité instantanée introduite par Keller [Kel97], son principe repose sur l'idée que l'illumination indirecte peut être modélisée comme un éclairage direct provient d'une source de lumière secondaire dite point de lumière virtuel VPL, dont l'objectif est

de simuler les effets d'illumination globale, en conservant un temps de rafraîchissement interactif. Son algorithme opère en deux passes, le premier passe consiste à propager les photons depuis les sources lumineuses cette étape est similaire au premier passe de la méthode de lancer de photons, ces VPL seront ensuite atténuées pour que le résultat de l'illumination soit consistant avec la conservation d'énergie [KL08].



**Figure 1-14** Rendu avec l'algorithme de radiosité instantanée [KL08].

### 1.8.8 Le cache d'éclairage (Irradiance caching)

Ward et al [WRC88] proposent une méthode pour l'accélération de calcul de l'illumination indirecte pour les surfaces diffuses, son principe est fondé sur l'idée que l'irradiance change sur une surface diffuse d'une manière lisse, l'algorithme de l'irradiance caching consiste dans une première étape de calculer avec précision l'illumination indirecte pour un nombre réduit de points visibles en utilisant l'intégration de Monte Carlo, ces points seront stockés dans un octree afin d'accélérer la recherche des points voisins. La seconde étape consiste à effectuer une interpolation pour le reste de la surface. L'irradiance calculée pour un point  $x$  est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{w}_i(\mathbf{x})\mathbf{E}_i(\mathbf{x})}{\sum \mathbf{w}_i(\mathbf{x})} \quad (1-39)$$



$$\mathbf{w}_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{\xi_{i(\mathbf{x})}} \quad (1-40)$$

$$\xi_{i(\mathbf{x})} = \frac{\|\mathbf{x}-\mathbf{x}_i\|}{R_i} + \sqrt{1 - \mathbf{N}_x \cdot \mathbf{N}_{x_i}} \quad (1-41)$$

Où

$R_i$  : moyenne harmonique des distances de surfaces visibles à partir du points particulier  $x_i$ .

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

$N_{x_i}$  : la normale au point  $x_i$ .

$E_i(x)$  : l'irradiance au point  $x_i$  interpolée au point  $x$ .

Une extension proposée par [GSH+92], plutôt que de stocker les échantillons directement sur les surfaces, ils proposent une méthode à base de volume dont le principe est de calculer l'irradiance pour chaque point, ils construisent une grille tri-linéaire en suivant la géométrie de la scène, lors du calcul de l'éclairage d'un point, le volume construit est interrogé de manière à trouver les échantillons qui forment la boîte englobant avec ce dernier, la valeur de l'éclairement en ce point est évalué par une interpolation tri-linéaire. L'Irradiance caching accélère énormément le calcul de la composante indirecte cela traduit par le faible cout consommé par l'interpolation sur une surface par rapport à l'intégration sur l'hémisphère.



**Figure 1-15** Le rendu final d'une scène illuminée en utilisant un lancer de rayon pour l'illumination directe et le cache d'éclairement pour l'illumination indirecte [GSH+92].

## 1.9 Transfert de radiance pré-calculé

Sloan et al [SKS02] introduit une méthode dont le principe est de Pré-calculer la lumière réfléchie reçue sur la surface d'un objet, en supposant que cet objet est soumis à une lumière distante généralement une texture (carte d'environnement), cette lumière sera projeter sur une base d'harmonique sphérique. L'un des avantages les plus importants de cette méthode est sans doute le gain de performance pour avoir un rendu interactif.

La complexité de calcul de la luminance réfléchie pour un point  $x$  est remplacée par un simple produit matriciel entre la lumière de la scène et la fonction de transfert, Les projections du transfert sont stockées puis réutilisées dans l'application pendant son exécution. L'équation de PRT est basée sur la reformulation de l'équation de rendu de Kajiya [Kaj86], l'équation suivante est le résultat de développement de l'équation de rendu en utilisant les séries de Neumann.

$$\mathbf{L}(x, \mathbf{w}_0) = \mathbf{L}_e(x, \mathbf{w}_0) + \mathbf{L}_0(x, \mathbf{w}_0) + \mathbf{L}_1(x, \mathbf{w}_0) + \mathbf{L}_2(x, \mathbf{w}_0) \dots \dots \dots \quad (1-42)$$

Le terme  $L_e$  représente l'illumination émise par le point  $x$  dans la direction  $w_0$ , le second terme  $L_0$  correspond à l'illumination réfléchie au point  $x$  dans la direction  $w_0$  provenant directement d'une source de lumière de toutes les directions possibles. Le terme  $L_1$  représente la quantité de lumière réfléchie au point  $x$  dans la direction  $w_0$  après qu'elle soit rebondie une fois avant d'atteindre le point  $x$ . De manière générale  $L_i$   $i \geq 2$ , correspond à l'illumination réfléchie au point  $x$  dans la direction  $w_0$  après qu'elle soit rebondie  $i$  fois avant d'arriver au point  $x$ . On constate que le niveau d'indirection  $N$  peut être calculé à partir du niveau d'indirection  $N-1$ . Ainsi, on peut déduire l'équation suivante

$$\mathbf{L}_N(x, \mathbf{w}_0) = \int_{\Omega} \mathbf{L}_{N-1}(x', \mathbf{w}_i) \rho(x, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_0) (1 - V(x, x')) \mathbf{G}(x, x') d\mathbf{w}_i \quad (1-43)$$

Le terme  $(1 - V(x, x'))$  calcul la visibilité depuis le point  $x$ .

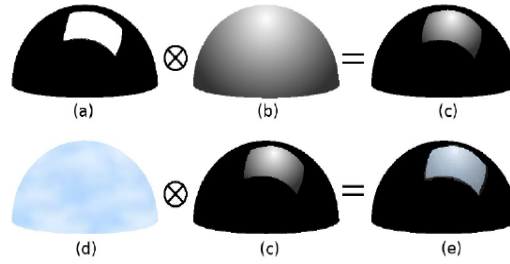
La BRDF et le terme de visibilité et le facteur géométrique sont regroupés dans une fonction de transfert  $T$ .

$$\mathbf{L}_0(\mathbf{x}, \mathbf{w}_0) = \int_{\Omega} \mathbf{L}_e(\mathbf{w}_i) \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_0, \mathbf{x}') d\mathbf{w}_i \quad (1-44)$$

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

$$\mathbf{L}_e(\mathbf{w}_i) = \sum_{k=1}^n \mathbf{l}_k \boldsymbol{\beta}_k(\boldsymbol{\omega}_i) \quad (1-45)$$

$$\mathbf{l}_k = \int \mathbf{L}_e(\mathbf{w}_i) \boldsymbol{\beta}_k(\mathbf{w}_i) d\mathbf{w}_i \quad (1-46)$$



**Figure 1-16** (a) le terme de visibilité (b) le facteur géométrique (c) la fonction transfert  
(a) La radiance reçu (e) l'illumination finale [SOP06].

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_0, \mathbf{x}') = \sum_{k=1}^n \mathbf{t}_k \boldsymbol{\beta}_k(\boldsymbol{\omega}_i) \quad (1-47)$$

$$\mathbf{t}_k = \int \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_0, \mathbf{x}') \boldsymbol{\beta}_k(\boldsymbol{\omega}_i) d\mathbf{w}_i \quad (1-48)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_0(\mathbf{x}, \mathbf{w}_0) &= \int \sum_{k=1}^n \mathbf{c}_k \boldsymbol{\beta}_k(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^n \mathbf{d}_k \boldsymbol{\beta}_k(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ &= \sum_{k=1}^n \mathbf{c}_k \mathbf{d}_k \int \boldsymbol{\beta}_k(\mathbf{x}) \boldsymbol{\beta}_k(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ &= \sum_{k=1}^n \mathbf{c}_k \mathbf{d}_k \quad (1-49) \end{aligned}$$

Ainsi, la deuxième étape consiste à calculer le produit scalaire entre les deux vecteurs représentant la lumière incidente et la fonction de transfert dans la base des harmoniques sphériques, ce traitement est calculé en temps réel.

Le travail de [SKS02] a été limité seulement pour les matériaux difuses et il traite que les environnements de basses fréquences, ces insuffisances sont éliminées dans les travaux de [NRH03].

## 1.10 Bilan et conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes méthodes permettant d'approximer l'équation de rendu, le grand avantage des méthodes déterministes telles que la radiosity offre des résultats impressionnants en termes de précision, la solution est indépendante de la position de vue, cependant, le résultat de rendu dépend de la complexité de la scène et le nombre d'équations explose avec le nombre de patches discrétisés.

Les méthodes stochastiques génèrent des images qui sont souvent les moins bruitées. A l'instar de lancer de photon, elle est la technique la plus réaliste couramment utilisée par l'industrie et elle est la plus rapide permet les techniques d'illumination globale basée sur le lancer de rayons, cependant elle souffre de quelques limites. Il faut lancer un grand nombre de photons, ce qui entraîne des ressources mémoires très volumineuses ainsi pour chaque couple de directions, il faut recalculer les structures de lancer de photon, ce qui entraîne l'impossibilité de faire des pré-calculs. Le principal problème des techniques à base de pré-calcul réside dans la quantité de stockage nécessaire pour stocker toutes les informations notamment quand il s'agit des scènes complexes.

Un problème de recherche important concerne le rendu des scènes naturelles, est que l'éclairage global en temps réel est toujours un problème non résolu pour les scènes naturelles à l'instar d'une forêt. Nous présentons dans le chapitre 3 ensemble de techniques permettant de rendre des scènes naturelles en temps réel, tout cela en effectuant des approximations et en tirant profit de l'immense puissance de calcul des processeurs graphique GPU récents.



## **Deuxième partie**

# **Modèles D'Eclairage pour les Scènes de Forêts et Approximation de Visibilité**

## 2 Chapitre 2

### Modèles d'éclairages pour les scènes de Forêts

#### 2.1 Introduction

Tout au long de ce chapitre, nous présentons les travaux antérieurs en rapport avec notre recherche, nous commençons par une étude des modèles à base de l'occultation ambiante, qui ont également connus des succès concernant l'approximation de l'illumination globale, puis nous exposons les approches probabilistes pour l'estimation de l'éclairage dans les scènes de forêts, de tels modèles utilisent l'inférence probabiliste pour prévoir le rayonnement incident dans un feuillage, enfin nous explorons les modèles à base de pré-calcul.

#### 2.2 Modèle à base d'occultation Ambiante

L'occultation ambiante est une approximation de l'intégration de visibilité pour calculer l'illumination globale [Apo12], son utilisation est dérivée de la notion d'obscurité proposée dans les travaux de [Zh98], l'expression de l'occultation ambiante est :

$$OA = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbf{w} \in \Omega} V_{is\xi}(\mathbf{x}, \mathbf{w})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{w}) d\mathbf{w} \quad (2-1)$$

Où

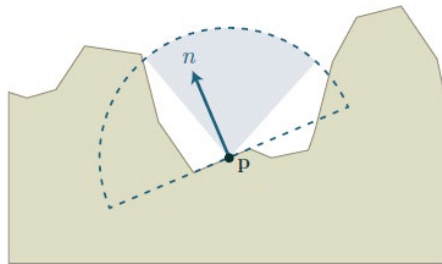
$\mathbf{x}$  : le point recevant l'occultation.

$\mathbf{n}$  : la normale au point  $\mathbf{x}$ .

$\Omega$  : l'hémisphère supérieur de direction principale  $\mathbf{n}$ .

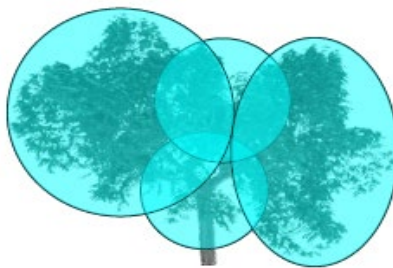
$V_{is\xi}$  : une fonction de visibilité vaut 0 lorsqu'aucune géométrie n'est visible depuis  $\mathbf{x}$  dans la direction  $\omega$  et pour une distance maximale  $\xi$  et 1 sinon .

L'idée de l'occultation ambiante est l'évaluation rapide de l'occultation produite par la géométrie proche. Son principe consiste à créer un hémisphère autour de chaque point d'une face et lancer un nombre de rayons dans toute les directions de l'hémisphère jusqu'à une certaine distance maximale, la résolution de l'occultation ambiante consiste à intégrer l'inter-visibilité de toutes les surfaces, par rapport à un point  $p$ . Si un rayon touche une autre face le point  $x$  est considéré dans l'ombre, sinon le point  $p$  est éclairé.



**Figure 2-1** Un point  $p$  situé dans une zone encaissée recevra moins de lumière.

Dans [KSM+06], les auteurs proposent un modèle simple est efficace basé sur l'approximation de l'occultation ambiante afin de produire des effets d'illumination de qualité et de conserver une visualisation interactive d'une scène naturelle, dynamique et complexe, ils supposent qu'une solution précise n'est pas nécessaire pour l'occultation ambiante, son principe consiste à appliquer des approximations grossières en remplaçant le calcul de visibilité globale par une expression locale. Un arbre sera représenté par plusieurs sphères ou ellipsoïdes.

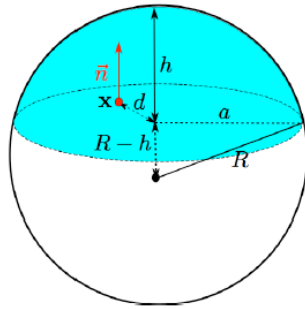


**Figure 2-2** Approximation d'arbres avec ellipsoïdes [KSM+06].

Pour chaque sphère une fonction de visibilité est calculée, la visibilité  $V_i(x, \vec{n})$  sera exprimée seulement par la position dans l'espace d'un point  $x$  et la normale  $n$  pour chacune des sphères.



$$V(x, \vec{n}) = [V_i(x, \vec{n})]$$



**Figure 2-3** La visibilité approximative [KSM+06].

L'approximation de visibilité est donnée par la formule :

$$\mathbf{V} = \exp(-\alpha \rho f \mathbf{V}) \quad (2-2)$$

Où

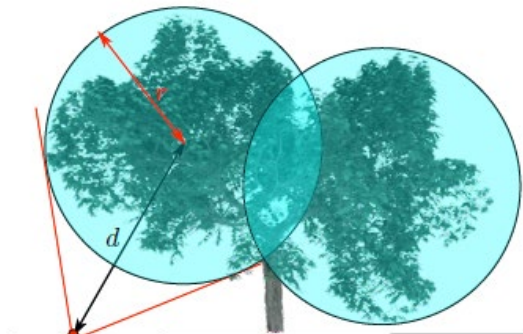
$\alpha$  : une constante ajustée par l'utilisateur.

$\rho$  : la densité.

$f$  : un facteur additionnel exprimé par la formule :

$$\mathbf{f} = \frac{h^2}{h^2 + d^2} \quad (2-3)$$

Ils présentent aussi une formule pour approximer la visibilité entre les objets composant la scène, un arbre peut affecter la visibilité de terrain ou d'un autre arbre dans une forêt, l'approximation de l'occultation ambiante est calculée en fonction de la distance à l'occuluteur et l'angle solide qu'il couvre.



**Figure 2-4** L'interaction entre l'arbre et le terrain [KSM+06].

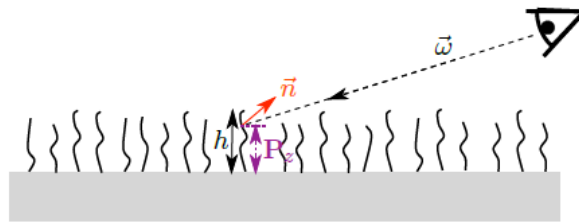
Pour un champ d'herbe l'approximation de visibilité est calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{V} = \frac{P_z}{2h} (\mathbf{1} + \cos\theta) \quad (2-4)$$

Où

$P_z$  : le point d'intersection entre le vecteur  $w$  est la surface présentant le brin d'herbe.

$h$  : est la hauteur total de l'herbe.



**Figure 2-5** Approximation de visibilité pour l'herbe [KSM+06]

Cette technique basée sur l'approximation de l'occultation ambiante permet de rendre des arbres et de larges surfaces herbeuses en temps réel avec un éclairage réaliste, ainsi elle permet de rendre des scènes dynamiques.

[JMB07] propose une méthode d'occultation ambiante pour approximer les effets d'illumination globale pour le rendu d'arbre avec un grand nombre d'organes approximés par un ellipsoïde. Son algorithme opère en trois étapes, la première étape consiste à découper les organes de l'arbre en clusters, la seconde étape consiste à calculer pour chaque cluster une valeur d'occultation interne dite 'intra-cluster ambient occlusion' obtenue par l'analyse des dispersions des positions des organes dans le cluster, enfin dans la dernière étape une valeur d'occultation externe dite 'inter-cluster ambient occlusion' est calculée entre les clusters représentant l'arbre.

Intra-cluster ambient occlusion à un point  $p$  est le pourcentage de la lumière occulté par une géométrie représentant un organe dans le même cluster, tandis que l'inter-cluster ambient occlusion à un point  $p$  est le pourcentage de la lumière occulté par une géométrie d'organe d'un autre cluster.

Les deux facteurs d'occultations sont utilisés pour calculer un coefficient d'atténuation de la contribution diffuse et spéculaire de l'illumination.



**Figure 2-6** Représentation Ellipsoïde [JMB07].

Le principal avantage des méthodes d'occlusion ambiante pour le rendu des scènes naturelles est que la solution de rendu est indépendante de la complexité de la scène, ces techniques ne nécessitent pas une étape de pré-calculs et permettent ainsi de rendre des scènes dynamiques en temps-réel.

### 2.3 Modèle probabiliste

Dans [BBP08], les auteurs proposent un algorithme probabiliste pour le calcul d'illumination directe et indirecte d'une scène naturelle, ils modélisent le feuillage d'un arbre avec une enveloppe de volume  $V$ , cette enveloppe contient un ensemble de feuilles réparties uniformément dans l'espace, avec une densité  $\rho$ , une aire par feuille  $A$  et une distribution uniforme des normales  $N_p$ . Au lieu de définir l'enveloppe une seule fois pour tout l'arbre, ils utilisent une approximation de l'enveloppe du point de vue de chaque feuille. La direction d'échantillonnage  $N_{dir}$  et la distance  $S_{max}(P, w_j)$  sont définies entre le centre de chaque feuille  $p$  et l'enveloppe  $V$ . Les vecteurs des directions  $N_{dir}$  et  $w_j$  sont distribués uniformément sur la sphère unitaire.

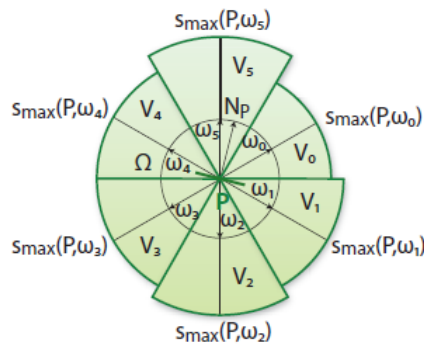
L'évaluation de ces distances est réalisée lors d'un pré-calcul rapide, l'ensemble des directions d'échantillonnage  $w_j$  est le même pour toutes les feuilles. Cela permet l'évaluation de la luminance incidente pour chaque arbre et non pour chaque feuille. Un sous-volume  $V_j$  du volume total  $V$  est associé à chaque direction  $w_j$  avec un angle solide  $\Omega_j$ , les sous volumes  $V_j$  ont une forme pyramidale dont le sommet est  $p$  et de direction  $w_j$ , le nombre de feuilles dans chaque volume est calculé par la formule suivante :

$$\mathbf{N}_{\text{feuille}} = \rho \mathbf{V}_j = \rho \frac{4\pi(s_{\max}(\mathbf{p}, \mathbf{w}_j))^3}{3} \quad (2-5)$$

Le modèle de réflexion est calculé en fonction de quatre paramètres de réflectances. La réflectance  $\rho_{\text{rf}}$  de la face avant, la réflectance  $\rho_{\text{rb}}$  de la face arrière, la transmittance  $\rho_{\text{tf}}$  pour la lumière entrant depuis la face avant et la transmittance  $\rho_{\text{tb}}$  pour la lumière entrant depuis la face arrière, les matériaux des feuilles sont modélisés par une BSDF multipliée par le cosinus de l'angle d'incidence.

$$F(P, \omega_0, \omega) = \begin{cases} \frac{\rho_{\text{rf}}}{\pi} M(N_p \cdot \omega) + \frac{\rho_{\text{tb}}}{\pi} M(-N_p \cdot \omega) & \text{if } N_p \cdot \omega_0 \geq 0 \\ \frac{\rho_{\text{tf}}}{\pi} M(N_p \cdot \omega) + \frac{\rho_{\text{rb}}}{\pi} M(-N_p \cdot \omega) & \text{if } N_p \cdot \omega_0 < 0 \end{cases} \quad (2-6)$$

Cette approche est fondée sur une solution probabiliste pour estimer la composante d'éclairage indirect, des approximations grossières sont faite pour simplifier les équations, le modèle final obtenu est une formulation analytique simple est rapide à évaluer sur GPU.

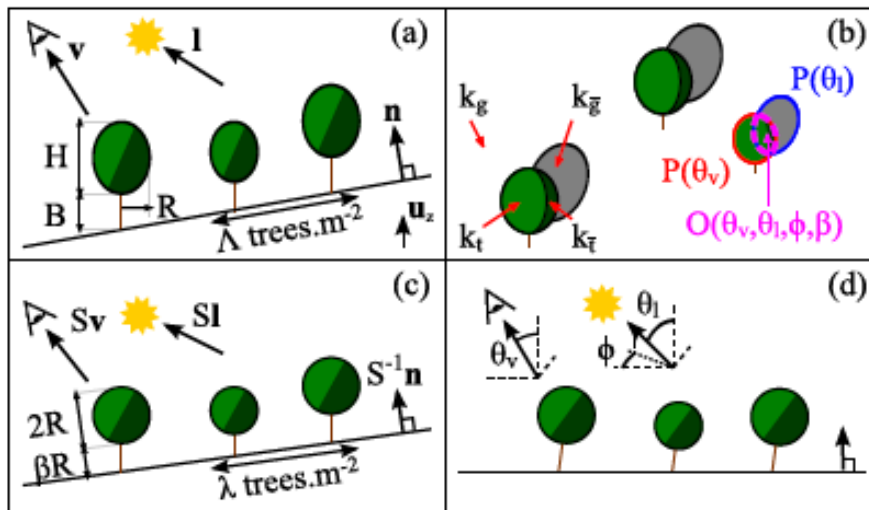


**Figure 2-7** Paramétrisation de l'enveloppe d'un arbre depuis la feuille centrée en P [BBP08].

Pour la présence des ombres, les auteurs ont séparé les ombres en deux bandes de fréquence. Les basses fréquences, représentant la distribution globale des ombres ont été gérées par l'intermédiaire de la fonction d'atténuation, elles utilisent une texture entourant chaque feuille et représentant l'ensemble des feuilles voisines occultant l'environnement. Cette texture contient la fonction de visibilité pour chaque direction

d'éclairage. La texture est définie pour chaque feuille, des rotations de texture sont effectuées pour chaque feuille de manière à cacher l'utilisation de la même texture pour tout le feuillage, le modèle gère l'éclairage Dynamique et la qualité des images obtenues est de haute qualité, cependant cette méthode ne prend pas en compte les sources ponctuelles et l'éclairage indirect du au ciel est ignoré.

Dans [EF12], les auteurs proposent de rendre de très vastes forêts en temps réel en prenant en compte tous les effets d'illumination. L'approche est basée sur deux modèles de représentation, les arbres proches de l'observateur sont représentés par le modèle z-filed, cependant les arbres loin de l'observateur sont représentés par un shader-map appliqué sur le terrain et modulé en fonction du point de vue et la position du soleil, le modèle est basé sur l'adaptation de modèle de Strahler et al [SJ90, LS92, SLS94].



**Figure 2-8** La radiance de patch de forêt modélisée par ellipsoïde (a) Ombrage de feuillage (b). Mise à l'échelle verticale (c) suivi d'une rotation (d)arbres sphériques sur un sol horizontal[EF12].

Cependant la composante directe due au soleil et au ciel est estimée par la combinaison des modèles [RB85], [MO95] et [QNTN03], ils approximent la radiance de ciel  $J_t$  à un point d'intersection  $p_v$  en fonction de  $L_{sky}$  et l'occlusion ambiante  $\xi(p_v)$ . Pour un arbre isolé, ils supposent que l'occultation ambiante à l'intérieur d'arbre et entre les arbres est

non corrélé cela donne  $\xi = \xi_v \xi_e$ , des approximations grossières sont adoptées pour le calcul de cette composante mais cela permet d'obtenir de bon effets d'illumination de ciel.

$$J_t(\mathbf{p}_v) = \frac{\rho}{2} \left( \int_{\Omega^+} \mathbf{P}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) d\mathbf{w} \right) \frac{\xi_v(\mathbf{p}_v)(1+\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_z)}{1+d^2(\mathbf{p}_v)\Lambda_h(x)/4} \mathbf{L}_{sky} \quad (2-7)$$

Avec  $\rho$  est l'albedo.

Pour modéliser l'éclairage incident depuis le ciel est sa réflexion sur le sol, ils modulent le facteur de l'occlusion ambiante  $\xi_g$  avec un terme métrique  $\Delta(x)$ , sa valeur doit être inférieur à 1, la luminance provenant du ciel et soleil est donnée par les formules suivantes :

$$\mathbf{I}_g(\mathbf{x}) = \mathbf{r}(\mathbf{v}, \mathbf{l}, \mathbf{n}) \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}, 0) \mathbf{V}(\mathbf{x}) \mathbf{L}_{sun} \quad (2-8)$$

$$\mathbf{J}_g(\mathbf{x}) = \xi_g \Delta(\mathbf{x}) \int_{\Omega^+} \mathbf{r}(\mathbf{v}, \mathbf{w}, \mathbf{u}_z) \mathbf{u}_z \cdot \mathbf{w} d\mathbf{w} \mathbf{L}_{sky} \quad (2-9)$$

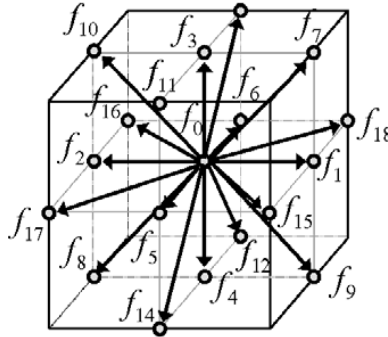
Avec  $r$  est la BRDF du sol.

Une scène de forêt est alors découpée, en zones de sol ou arbres, en fonction de l'angle entre le vecteur soleil et le vecteur de vue, calculée grâce à des projections géométriques. La réflectance est alors calculée en fonction des propriétés optiques et de la proportion de surface occupée par chaque zone.

Cette méthode offre un modèle d'éclairage réaliste et prend en compte tous les effets d'illumination et permet de rendre de très vaste forêts en temps-réel ainsi à toutes les échelles, en revanche cette méthode nécessite un grand espace de stockage des z-fields pour un seul modèle d'arbre et elle ne permet pas de rendre des scènes dynamiques en temps-réel.

[GS08] propose une solution pour l'éclairage global, la solution est basée sur la méthode de lattice de Boltzmann, cette dernière est une méthode numérique de simulation d'écoulement de fluides, son principe consiste à discrétiser l'espace en un ensemble de nœuds distribués uniformément dans l'espace, les mouvements des particules son modélisés par une fonction de distribution, pour chaque nœud de lattice,

la fonction de distribution défini le nombre de molécule à transférer vers les nœuds voisins.



**Figure 2-9** Lattice de Boltzman [GS08].

Les paramètres de réflectance, transmittance et absorptance sont pris à partir des mesures réelle, son modèle d'illumination est composé de deux composantes, une composante directe et indirecte, la composante directe est composée d'un éclairage local diffus et spéculaire, l'éclairage local diffuse calculé par  $k_d(N.L)$

Où

$L$  : la direction de soleil.

$N$  : la normale d'une feuille.

$k_d$  : combinaison de la couleur de soleil est la texture de feuille.

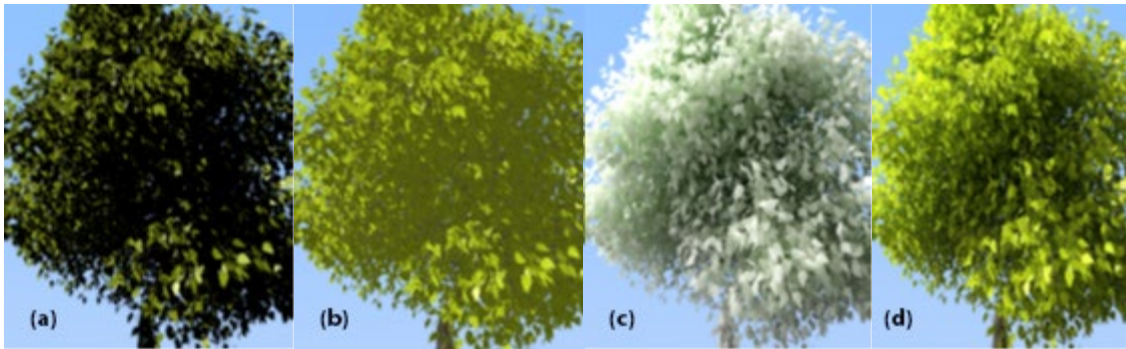
L'éclairage local spéculaire est calculé par  $k_s(V.R)^s$  où :

$V$  : est le vecteur de vue.

$R$  : le vecteur de réflexion de soleil.

$k_s$  : combinaison de la couleur de soleil est la couleur spéculaire de feuille.

L'illumination indirecte est capturée par une lattice de Boltzman puis moduler avec la couleur de texture, ensuite additionner avec la quantité d'illumination directe. La méthode présente de nombreux intérêts du point de vue de la stabilité numérique, de la robustesse et la rapidité de mise en œuvre et la parallélisation sur des architectures parallèles [LWK03] [WLM+04]. La limite de cette technique est l'augmentation du temps de calcul lié au traitement des liaisons entre les nœuds pour les scènes complexes.



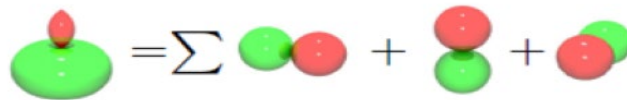
**Figure 2-10** a - illumination locale, b- illumination locale plus une composante ambiante, c- visualisation volumique à l'aide de lattice de Boltzman, d- illumination à base lattice de Boltzman[GS08].

## 2.4 Modèle à base de pré-calcul

Les harmoniques sphériques définissent une base de fonctions orthonormale sur la sphère, ils peuvent être utilisés pour reconstruire n'importe quelle fonction. Ils sont définis sous plusieurs formes, la forme générale des harmoniques sphériques est définie en utilisant des nombres complexes, comme le montre l'équation suivante :

$$Y_l^m(\theta, \phi) = K_l^m e^{im\phi} P_l^{|m|}(\cos\theta) \quad (2-10)$$

Où  $l \in \mathbb{N}, -l \leq m \leq l$



**Figure 3-11** le développement d'une fonction sphérique en harmoniques sphériques[MM07].

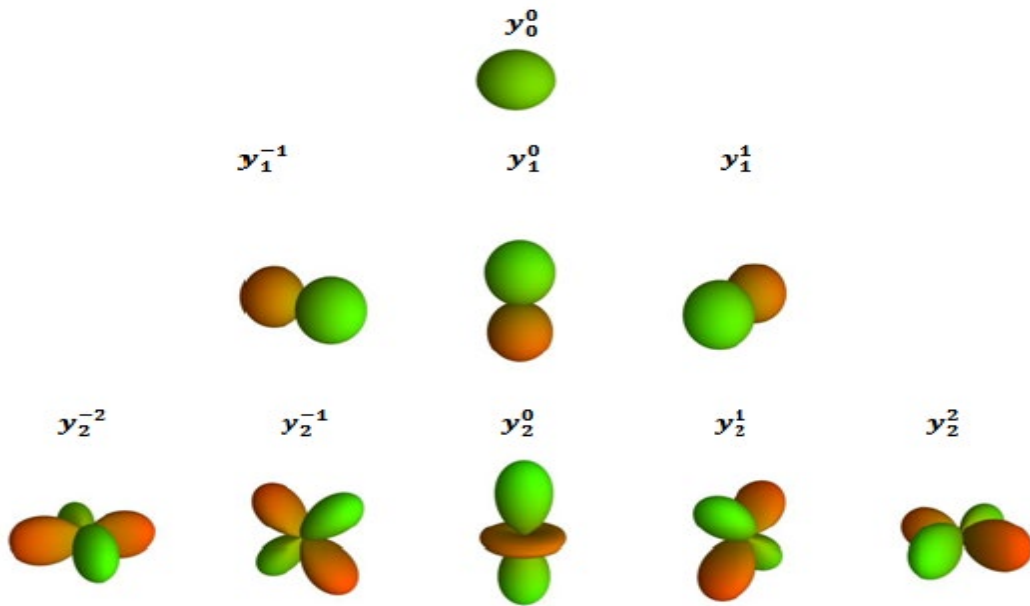
La forme réelle des harmoniques sphériques est utilisée pour approximer les fonctions réelles.

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \begin{cases} \sqrt{2} \operatorname{Re}(Y_l^m), & m > 0 \\ \sqrt{2} \operatorname{Im}(Y_l^m), & m < 0 \\ y_l^0, & m = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$



La forme finale des harmoniques sphériques est définie comme suit :

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \begin{cases} \sqrt{2}K_l^m \cos(m\phi) P_l^m(\cos\theta), & m > 0 \\ \sqrt{2}K_l^m \cos(-m\phi) P_l^{-m}(\cos\theta), & m < 0 \text{ avec } l \in \mathbb{N}, -l \leq m \leq l \\ K_l^0 P_l^0(\cos\theta), & m = 0 \end{cases} \quad (2-12)$$



**Figure 2-12** Illustre quelques premiers termes de  $Y_l^m$ , la couleur rouge représente les valeurs positives et la couleur verte représente les valeurs négatives [MM07].

[KSS02] propose une approche utilisant une base d'harmoniques sphériques permettant de représenter des fonctions sur la sphère, comme les BRDF ou un environnement map, dans un domaine fréquentiel. Elles sont équivalentes à des fonctions sinus et cosinus utilisées par la transformé de Fourier, ainsi elles possèdent deux propriétés très intéressantes, leur utilisation pour représenter l'éclairage et les BRDFs. Elles permettent ainsi de réduire l'équation du rendu à un produit scalaire [CON99][NRH04], pour projeter une fonction  $f$  à l'ordre  $n$  dans l'espace des harmoniques sphériques,  $n^2$  coefficients sont nécessaires [Slo08], une fois que les coefficients de projection sont établis, il est possible de reconstruire la fonction, ou du moins une approximation si elle comporte des éléments à hautes fréquences.

[BCF+05] présente une technique temps réel de rendu à base d'image de grand surface de paysage, l'arbre est représenté par un nuage de posters dite (billboard clouds), tandis que pour l'éclairage, ils ont proposé un modèle d'éclairage dynamique pour une scène de forêt, en utilisant le modèle des harmoniques sphériques. L'environnement éclairé est projeté dans la base des harmoniques sphériques et ensuite utilisé pour éclairer la géométrie en évaluant simplement le produit scalaire des coefficients, cependant cette technique ne permet pas de rendre des scènes dynamiques en temps-réel.



**Figure 2-13** Arbre avec (126,000 triangles), approximation en utilisant 60 Billboards avec illumination [BCF+05].

[CBL+11] propose un modèle à base d'image pour le ré-éclairage des arbres, ils supposent que le matériau des feuilles est Lambertien (diffuse), cela permet de simplifier l'équation de rendu, la radiance reçue par un point  $x$  est donnée par l'équation suivante :

$$L(x) = \rho \left( E_{sky}(x) + E_{sun}(x) + E_{ind}(x) \right) = \rho E \quad (2-13)$$

Où

$\rho$  : la réflectance au point  $x$ .

$E_{sky}$ ,  $E_{sun}$ ,  $E_{ind}$  : est l'éclairement dû au ciel, soleil et indirect respectivement.

Le feuillage de l'arbre est considéré comme un milieu participant, une représentation volumique est créée pour chaque arbre à partir de 10 à 12 images à un seul moment de la

journée comme entrée, il présente une approche à base d'éclairage volumétrique et un modèle analytique pour l'éclairage dû au soleil et au ciel, l'équation de la luminance atteignant l'observateur et provient de soleil est :

$$L_{\text{sun}}(\mathbf{x}) = \int_{x_0}^x \tau(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \mathbf{K}_t(\mathbf{u}) \alpha e^{(-\beta m(w_{\text{sun}}))} N_{\text{max}} \tau(\mathbf{u}, w_{\text{sun}}) d\mathbf{u} \quad (2-14)$$

Où :

$N_{\text{max}}$  : l'éclairement maximal.

$K_t$  : le coefficient d'extinction.

$\alpha$  : un facteur d'échelle.

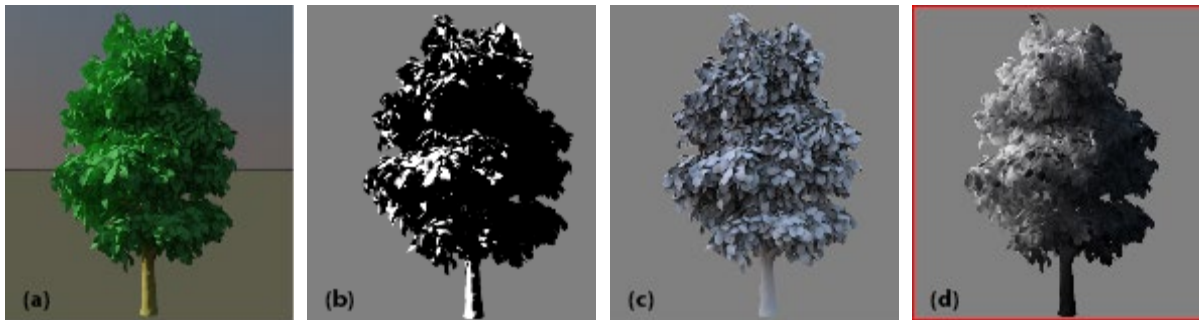
$\beta$  : un coefficient de diffusion.

$\tau(u, x)$ : la transmittance de u à x.

La radiance  $L_{\text{vol}}^{\text{sky}}$  due au ciel dans ce modèle volumétrique est donnée par l'équation suivante :

$$L_{\text{vol}}^{\text{sky}}(x) = \int_{x_0}^x \tau(\mathbf{u}, x) \mathbf{K}_t(\mathbf{u}) \int_{\Omega} L_{\text{sky}}(w) \tau(\mathbf{u}, w) dw d\mathbf{u} \quad (2-15)$$

Ensuite les harmoniques sphériques sont utilisés pour combiner l'effet de transmittance à partir des directions d'échantillonnage du ciel et le vecteur de vue, la solution proposée permet à l'utilisateur de changer l'heure de la journée à laquelle la photo d'origine a été prise, cette technique souffre de problèmes de parallaxe et le coût mémoire pour le stockage des coefficients. Pour d'autres techniques d'illumination des forêts le lecteur peut se référer à la référence [FJ17].



**Figure 2-14** a- arbre avec illumination globale, b- illumination directe due au soleil, c- illumination directe due au ciel, d- illumination indirecte[CBL+11].

## 2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, un état de l'art des méthodes d'illumination des forêts, avec une étude comparative spécifiant pour chaque modèle ces avantages et ces limites. Il est important de bien connaître la complexité des scènes naturelles en particulier une forêt, cette complexité traduite par une quantité énorme de détails, ce qui engendre une réelle difficulté pour préserver la contrainte temps réel et la qualité visuelle, en effet de nombreux travaux traitent le problème d'illumination globale et produisent des images de qualité, cependant ces modèles ne sont pas utiles pour traiter ce type de complexité.

L'objectif de notre travail est de proposer un modèle adapté à cette complexité multi-échelle, tout en conservant un taux d'affichage interactif et également une simulation d'éclairage de qualité.

De nouvelles approches tentent de résoudre ce problème en focalisant leurs travaux sur la problématique de requêtes de visibilité, en effet l'approximation de ce terme permet de réduire énormément le temps de calcul et de préserver la présence de l'illumination indirecte en particulier pour les scènes naturelles.

## **3 Chapitre 3**

### **Approximation de Visibilité pour le l'éclairage Global**

#### **3.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent nous avons décrit les techniques d'éclairage global pour les scènes de forêts. Cependant la visualisation des scènes complexes reste un défi majeur pour ce type de méthodes, Il parait donc indispensable d'introduire des techniques simples à mettre en œuvre et permettant de réduire énormément le coût de calcul et l'espace mémoire pour rendre et visualiser des scènes 3D complexes.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux techniques efficaces pour rendre des scènes larges avec illumination directe et indirecte, leur principe repose sur l'approximation des requêtes de visibilité afin de produire des images de qualité avec un temps de rendu réduit, l'objectif de ces travaux est de proposer des solutions approchées, toute en préservant une bonne qualité visuelle, et un temps de rendu interactif.

### 3.2 Calcul exact de la visibilité

Un calcul exact de la visibilité entre deux points (surface) consiste à déterminer si ces derniers sont mutuellement visibles, ceci est résolu en infographie par l'utilisation des algorithmes de type tampon de profondeur, son principe consiste à projeter toute la géométrie sur une carte de pixel. Cependant si la géométrie est complexe cela pouvait avoir des conséquences négatives sur les performances, d'autres techniques effectuent un calcul de visibilité en utilisant un lancer de rayon, en effet un rayon est envoyé depuis un point vers la scène, à l'intersection d'un autre point. On dit que ces deux points sont mutuellement visibles. Le calcul de visibilité intervient dans les simulations de l'illumination globale par éléments finis tel que la radiosité afin de simuler les échanges énergétiques entre les éléments des surfaces composant la scène. Il est alors difficile de tirer parti des calculs de visibilité précédents, quand il s'agit des scènes complexes à l'instar des scènes naturelles. Certaines méthodes parviennent à accélérer le calcul de visibilité en réduisant de façon drastique le nombre de chemins à tester, cela sous une idée qu'un calcul exact de la visibilité n'est pas nécessaire pour certain type de complexité, en effet pour ces méthodes une solution approchée est suffisante pour produire des images de bonne qualité dans un délai interactif.

### 3.3 Approximation de visibilité

L'approximation de visibilité donne des résultats remarquables, des algorithmes d'illumination indirecte ayant d'ailleurs été conçus à partir de ce principe, l'un de ces travaux repose sur l'idée qu'un calcul précis de l'illumination indirecte pour rendre une scène large en temps réel n'est pas nécessaire [Yu09], l'auteur s'appuie sur une étude psychophysique sur l'influence de l'approximation de visibilité pour la composante indirecte, cette étude révèle qu'un calcul précis de la composante indirecte n'est pas nécessaire et certaines approximation peuvent être introduites.

Le travail de [TR12] repose sur l'idée de calculer la visibilité à l'aide d'une carte d'ombre imparfaite dite ISM (Imperfect Shadow Map) afin de permettre un calcul en temps réel d'illumination globale pour une scène large et dynamique. Les ISMs sont des cartes d'ombre à basse résolution peuvent contenir des informations (Profondeurs) de

visibilité inexacte, la technique ISM peut être combinée avec d'autres techniques d'illumination comme la radiosité instantanée [Kel97], d'autres techniques calculent la visibilité en utilisant les ISMs entre les points de lumière virtuelles (VPL) afin de calculer un éclairage indirect [WKB+02], avant de créer les ISM, une étape de prétraitement est effectuée sur la scène.

L'ISM est approximée par un ensemble de points avec une densité uniforme, chaque point est créé par la sélection aléatoire d'un triangle avec une probabilité proportionnelle à la surface du triangle, pour chaque point, ses coordonnées barycentriques sont stockées par rapport à son triangle ainsi que l'indice du triangle, afin de rendre des scènes dynamiques sans avoir besoin de recalculer la représentation ponctuelle, les coordonnées barycentriques permettent également de récupérer la normale et la réflectance pour chaque point, qui sera nécessaire pour les rebonds de lumière indirecte secondaire, le nombre de points pour représenter la scène est choisi par l'utilisateur.

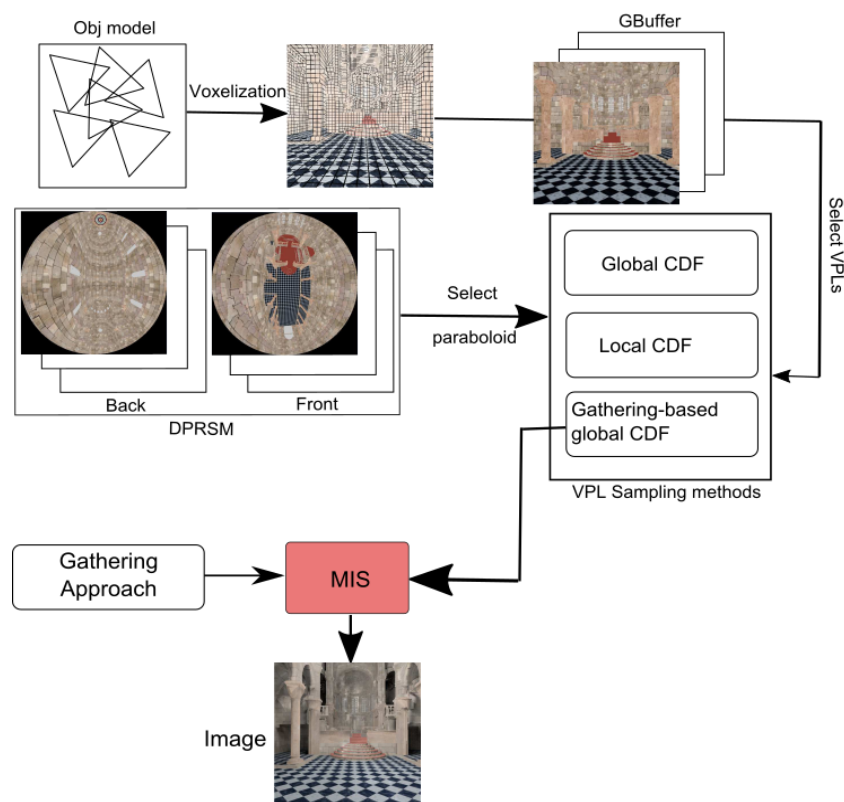


**Figure 3-1** Illumination globale avec shadow map imparfait [TR12].

Les points de lumières virtuelles agissant comme des émetteurs de lumière indirecte, ils sont distribués de manière aléatoire, ensuite les ISM sont utilisées pour déterminer la visibilité pour chaque VPL, en effet un grand nombre ISM peuvent être rendu en une seule passe [SFW+04]. Cette technique permet de rendre des scènes large et dynamique avec illumination indirecte en revanche cette dernière souffre de quelques limites. Leur coût de rendu dépend uniquement du nombre global de polygones, produire de bons résultats nécessitent un grand nombre d'échantillons ponctuels, par conséquent

les scènes avec une grande complexité nécessitent plus d'échantillons, sinon les ISMs ne peuvent pas contenir d'informations significatives.

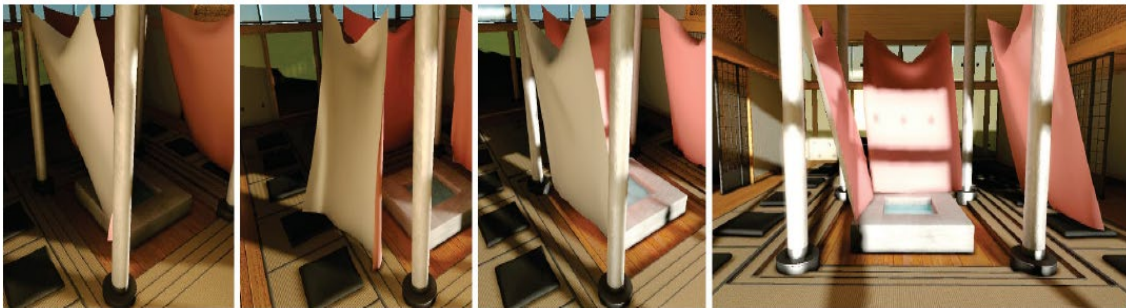
Une récente approche [BGB+17] dont le but est d'accéléré le calcul de l'illumination indirecte en exploitant la puissance des GPU, cela en calculant la visibilité entre les objets composant la scène et les sources lumineuses. Son principe consiste à identifier les points pour chaque pixel d'une caméra 360 degrés composée d'un DPRSM (Dual Paraboloid Reflective Shadow Map) ainsi la position, la normal et la couleur, chaque VPL sera ensuite considéré comme une lumière indirecte. L'évaluation de la contribution de tous les VPL réduit les performances, la solution que les auteurs ont optés est de classifier les VPLs suivant leurs importances et de prendre en compte qu'un sous ensemble de ces derniers, la sélection est effectuée à l'aide d'une méthode de transformé inverse à base d'une CDF (Cumulative Distribution Function). Ils utilisent la voxelisation pour accélérer le processus approximation de visibilité, la méthode traite les matériaux diffus et produit des images réaliste à un temps réduit.



**Figure 3-2** Aperçu de la méthode de transformée inverse pour le calcul de l'illumination indirecte[BGB+17].



Dans [REK+11], l'objectif des auteurs est d'approximer les requêtes de visibilité pour calculer l'illumination indirecte dans des scènes dynamiques contenant des millions de triangles, afin d'optimiser le calcul d'illumination indirecte dans un délai interactif, cette méthode utilise un système de VPL (Virtual point light) pour calculer l'éclairage réfléchi. L'intégration d'un système de lancer de rayon n'était donc pas recommandable, vu le temps de calcul très élevé. Ils utilisent des cartes d'ombre réfléchissantes (Reflective Shadow Maps), afin de placer ses VPLs dans la scène afin d'approximer un rebond d'illumination indirecte. Ces vpl seront ensuite atténuées, Cependant pour l'approximation des requêtes de visibilité ils ont utilisé une représentation à base de points pour la scène, dans le but d'assurer une représentation fidèle de l'illumination indirecte et l'ombre. Les auteurs augmentent le nombre d'échantillons de VPLs dans des zones qui représente plus de détail, cette technique a permis d'obtenir des résultats convaincants en temps réel.



**Figure 3-3** Illumination globale en temps réel d'une scène architecturale rendu avec l'algorithme de[REK+11].

Afin d'approximer d'illumination indirecte [BT11] utilisent une grille d'approximation de visibilité dite AVG (approximation Visibility grid) pour simuler l'illumination indirecte avec multiples rebonds pour les scènes dynamiques en exploitant le GPU. L'algorithme est composé de trois étapes : l'étape initiale implique la construction de la structure de données AVG, qui est une voxelisation de la scène où chaque voxel stocke la réflectance moyenne et la normal. Ces informations seront utilisées pour accélérer la deuxième étape, où les VPL sont tracés et à chaque intersection avec la structure AVG, un VPL est placé dans une liste et d'autres rayons sont générés pour calculer plusieurs rebonds sur l'éclairage indirect, cela représente la contribution de tous

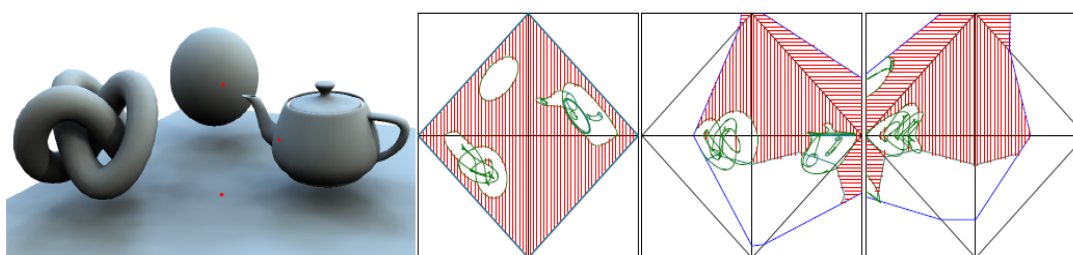
les VPLs, afin de produire l'image finale. Cette méthode permet d'afficher de large scènes en temps réel avec un éclairage dynamique.



**Figure 3-4** Comparaison entre les résultat de VPL tracing running on the GPU (a) et l'image de référence en CPU(b) [BT11].

Dans [NBM+14], les auteurs proposent une solution qui permet de simplifier la géométrie de l'objet, en approximant sa surface par une silhouette afin de simplifier le calcul de visibilité et l'occultation des objets composant la scène, une fois la visibilité est calculée, ils intègrent de manière semi-analytique sur des fonctions de visibilité masquées [GH06] [McG10] [SKS02].

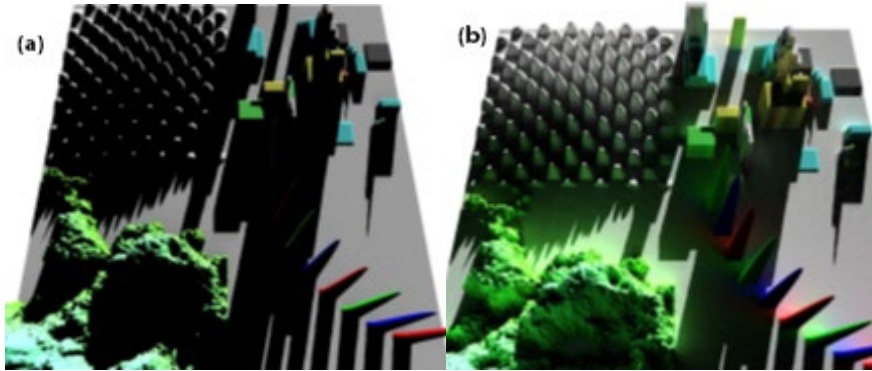
Ils calculent la sphère de contour sur les points d'ombre en utilisant une structure accélératrice 4D, ainsi ils ont démontré la faisabilité de cette technique sur plusieurs applications de rendu.



**Figure 3-5** Illustration de visibilité à partir des trois points rouges [NBM+14].

Timonen [Tim12] présente un algorithme pour déterminer l'inter-visibilité de tous les points des champs de hauteur dynamique (height fields) comme des horizons de visibilité dans des directions azimutales discrètes. L'algorithme construit un arbre d'enveloppes convexes, cet arbre, permet de déterminer l'inter-visibilité entre les

sommets de la carte de hauteurs dans une direction donnée, et ainsi de calculer l'éclairage indirect. En effet, il crée une structure qui alterne les zones visibles et cachées, au lieu de contenir seulement la visibilité de façon discrète pour chaque point, les points retenus sont ceux qui se trouvent sur les contours de ces zones, et il n'est plus nécessaire de faire une supposition de continuité.



**Figure 3-6** a : Illumination directe, b : illumination indirecte rendu en 1.21 frame per seconde [Tim12].

### 3.4 Conclusion

Pour conclure ce chapitre nous revenons à notre question principale est-ce qu'un calcul précis de l'éclairage indirect est nécessaire. Dans ce chapitre les algorithmes que nous avons passés en revue sont fondés sur l'idée qu'un calcul précis de la composante indirecte n'est pas nécessaire, ces modèles ont montré que l'approximation de visibilité permet de produire des images photo réaliste à un faible cout.

C'est la raison pour laquelle nous fondons notre idée pour simuler l'éclairage indirect pour rendre des scènes 3d de forêts, cette dernière caractérisée par une complexité multi-échelle qui nécessite un traitement spécifique. Dans le chapitre 5 nous présentons notre approche qui permet de calculer l'éclairage direct et l'éclairage indirect, en effet le calcul de l'éclairage indirect est basé sur l'approximation de terme de visibilité de l'équation de rendu, tous cela en exploitant la puissance de calcul de GPU.

# **Troisième partie**

## **Contributions et Résultats**

## 4 Chapitre 4

### Eclairage Direct et Indirect pour les Scènes de Forêts

#### 4.1 Introduction

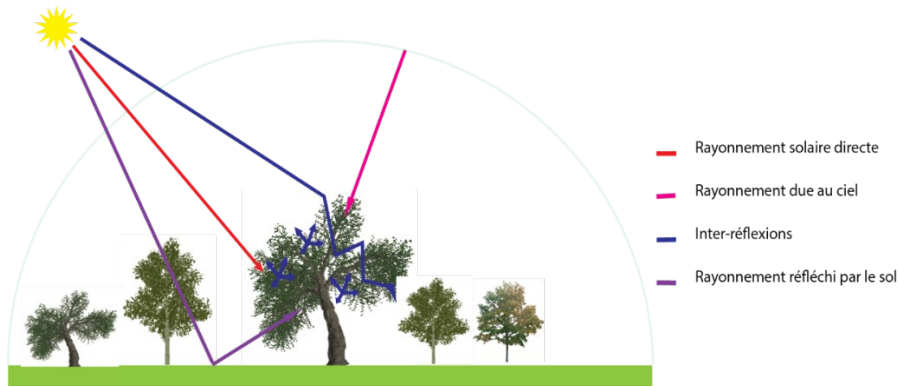
Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent plusieurs contributions différentes pour étudier la complexité photométrique ont montrées qu'un calcul précis de visibilité n'est pas nécessaire. Dans ce chapitre nous décrivons le principe de notre approche pour le calcul de l'illumination globale pour les scènes de forêts. En effet notre approche est basée sur l'approximation des requêtes de visibilité pour le calcul de l'illumination indirecte, tandis que la composante directe qui permet à l'utilisateur de percevoir le détail haut fréquence est calculée en utilisant une visibilité précise. Notre méthode permet de réduire la complexité posée par l'équation de rendu et offre des images de bonne qualité.

#### 4.2 Modèle d'illumination

Dans les scènes extérieures en particulier les scènes naturelles, la lumière traverse l'atmosphère et atteint l'arbre sous forme de deux composantes directe et indirecte.

**Directe :** due aux sources lumineuses (l'illumination solaire directe) et de l'environnement (due au ciel) et due au rayonnement réfléchi par le sol.

**Indirecte :** lorsque la lumière interagit avec un arbre, la réflexion et la transmission se font dans toutes les directions, l'éclairage indirect d'un arbre est le résultat des inter-réflexions de la lumière entre les organes de l'arbre (feuilles, tronc, branche...).



**Figure 4-1** illustration des principaux interactions des rayons de lumière pour l'arbre.

La valeur de luminance en direction de vue  $w$  pour chaque feuille au point  $p$  qui est le centre de la feuille est exprimée par l'équation suivante :

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = L_e(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w}) L_i(\mathbf{p}, \mathbf{w}) (\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{w}_i \quad (4-1)$$

Nous calculons la luminance réfléchi comme étant la somme de luminance directe reçue depuis les sources lumineuses et la luminance indirecte, ce qui conduit à :

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = L_e(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) + \int_{\Omega} (L_{\text{direct}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) + L_{\text{indirect}}(\mathbf{p}, \mathbf{w})) f_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w}) (\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{w}_i \quad (4-2)$$

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = L_e(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) + \int_{\Omega} L_{\text{direct}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) f_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w}) (\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{w}_i + \int_{\Omega} L_{\text{indirect}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) f_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w}) (\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{w}_i \quad (4-3)$$

Nous supposons que le rayonnement reçu par notre scène est dû à deux sources lumineuses qui sont le soleil qui est une source directe caractérisé par une position et une direction et le ciel qui est une source indirecte. Cependant pour notre modèle, nous considérons que le ciel est une source environnementale directe, pour des raisons de calculs en image de synthèse, on suppose que l'illumination due au ciel est une source directe alors que ce n'est pas le cas dans la réalité.

L'équation (4-3) devient

$$\mathbf{L}(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = \mathbf{L}_e(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) + \int_{\Omega} (\mathbf{L}_{\text{sun}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) + \mathbf{L}_{\text{sky}}(\mathbf{p}, \mathbf{w})) \mathbf{f}_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w})(\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) \, d\mathbf{w}_i + \int_{\Omega} \mathbf{L}_{\text{indirect}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) \mathbf{f}_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w})(\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) \, d\mathbf{w}_i \quad (4-4)$$

$$\mathbf{L}(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = \mathbf{L}_e(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) + \int_{\Omega} \mathbf{L}_{\text{sun}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) \mathbf{f}_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w})(\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) \, d\mathbf{w}_i + \int_{\Omega} \mathbf{L}_{\text{sky}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) \mathbf{f}_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w})(\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) \, d\mathbf{w}_i + \int_{\Omega} \mathbf{L}_{\text{indirect}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) \mathbf{f}_r(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w})(\overline{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{n}) \, d\mathbf{w}_i \quad (4-5)$$

Comme simplification la luminance émise n'est pas prise en compte par notre modèle, nous obtenons enfin :

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = L_{\text{sun}} + L_{\text{sky}} + L_{\text{indirect}} \quad (4-6)$$

La valeur de  $L(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0)$  est la somme des trois composantes :  $L_{\text{sun}}$ ,  $L_{\text{sky}}$ ,  $L_{\text{indirect}}$ . Ceci permet d'avoir un traitement spécifique pour chaque composante et réduit énormément la complexité de l'équation de rendu.

### 4.3 Réflexion de la lumière par les feuilles

Chaque feuille est caractérisée par deux faces avant et arrière, la notion d'orientation de face est importante pour le calcul de l'éclairage, en effet la face avant est identifiée par un vecteur perpendiculaire à la surface  $Np$ , cela permet de calculer la répartition directionnelle de la lumière réfléchiée sur une feuille. Comme nous voulons améliorer les performances de notre modèle, au premier abord nous considérons que les matériaux des feuilles sont parfaitement diffuse (Lambartien), sous cette hypothèse, on obtient la simplification suivante :

$$\rho(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w}_i) = \frac{\rho_d}{\pi} \quad (4-7)$$

Le véritable intérêt à retenir de cette première approximation est que la lumière est réfléchiée dans toutes les directions avec la même intensité, ainsi avoir une BRDF indépendante de la direction de vue  $w_0$ .

#### 4.4 L'illumination due au soleil

$L_{sun}$  exprime l'illumination directe due au soleil, en effet pour des raisons de simplification de calcul, on ne prend pas en considération le rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère, le soleil est considéré comme une source directionnelle, caractérisée par une position et une direction  $W$ , cette dernière forme un angle avec le vecteur perpendiculaire à la surface de feuille  $Np$ , en effet si le rayonnement solaire est parallèle avec la normale alors nous aurons une quantité d'illumination diffuse maximale, en revanche l'illumination diffuse est nulle si le rayonnement solaire est perpendiculaire à la normale.

Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'arbre, nous supposons que le feuillage de l'arbre est un volume participatif, le rayonnement subira une atténuation d'écrite par la loi de Beer-Lambert Law :

$$Att = e^{-K(x1,x2)} \quad (4-8)$$

Où

$K$  : est le coefficient d'extinction de feuillage

$x1$  : le point d'intersection du rayon incident direct dans la direction  $w_i$ ,

$x2$  : le point de sortie du rayon incident direct dans la direction  $w_i$ .

S'inspirant de travail de [BBP08], la luminance directe due au soleil atteignant le point de vue à partir du point  $p$  dans la direction  $W_0$  :

$$L_{sun}(p, w_0) = \rho(p, W_0, W_i) \cdot Att \cdot V(p, w_i) \cdot E_{sun} \cos(Np, w_i) \quad (4-9)$$

$\rho(p, w, w_i)$  : La BRDF de la feuille dont le centre est  $p$ .

$Att$  : Le facteur d'atténuation.

$V(w, w_i)$  : Le facteur de visibilité égale à 1 si la feuille est visible, si non égale 0.

$E_{sun}$  : L'éclairement de soleil.



## 4.5 L'illumination due au ciel

La deuxième contribution représente la quantité d'illumination qui est diffusée sur tout l'hémisphère supérieur de ciel, en effet le ciel est une source hémisphérique de lumière, sa présence est essentielle au réalisme des scènes naturelles, cette composante est calculée par une carte d'environnement, la luminance due au ciel et sa réflexion sur les arbres et le sol est calculer par l'expression suivante :

$$L_{sky}(P) = \int_{\Omega} \rho(W_0, W_i) L_{sky}(W_0, W_i) V(W_0, W_i) dw \quad (4-10)$$

$$L_{sky}(P) = \frac{\rho_d}{\pi} \int_{\Omega} L_{sky}(W_0, W_i) V(W_0, W_i) dw \quad (4-11)$$

$$L_{sky}(P) \approx \sum_{i=1}^n \rho(W_0, W_i) L_{sky}(W_0, W_i) V(W_0, W_i) \quad (4-12)$$

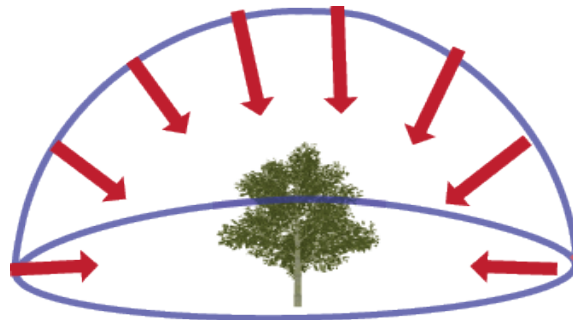


Figure 4-2 Réflexion de l'environnement map sur l'arbre

## 4.6 L'illumination indirecte

L'illumination indirecte joue un rôle important dans l'amélioration de la qualité visuelle d'une scène naturelle, cependant il est impossible de prendre en compte tous les chemins d'incidences et toutes les multiples réflexions, cela diminue les performances. Le problème majeur du calcul de l'illumination indirecte réside dans l'évaluation des requêtes de visibilité, des travaux récents montrent qu'un calcul précis de visibilité pour l'illumination indirecte n'est pas nécessaire, sur ce principe nous construisons notre

algorithme en utilisant une nouvelle approche basée sur un noyau gaussien, afin d'afficher des scènes complexes de forêts.

Dans un premier temps, nous présentons les concepts fondamentaux des méthodes noyaux afin de comprendre la méthode proposée, puis nous expliquons comment la méthode noyau radial Gaussien permet d'approximer la composante indirecte dans un feuillage.

#### 4.6.1 Bases théoriques des méthodes Noyaux

Les fonctions noyaux ont été utilisées principalement pour résoudre des problèmes de classifications linéaires ou non linéaires ainsi les problèmes de régression en analyse de données et apprentissage automatique, cependant le problème de classification non linéaire des données survient dans de nombreux domaines.

Un noyau appelé aussi une fonction de covariance, fonction noyau ou noyau de covariance, est une fonction positive de deux entrées  $x, x'$ , cependant un noyau peut être défini sur une image, un graphe et des données discrètes ou catégoriques [DK14].

Le principe des méthodes noyaux consiste à identifier une régularité linéaire dans un échantillon des données, qui correspond à des régularités non linéaires dans l'espace d'origine des données.

Une fonction noyau est une fonction  $k : x, x' \in X^2 \rightarrow \mathbb{R}$  satisfaisant :

$$\mathbf{k}(x, x') = \phi(x) \cdot \phi(x') = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \phi_i(x') \quad (4-13)$$

Où

$\phi$  : une fonction de  $X$  vers un espace.

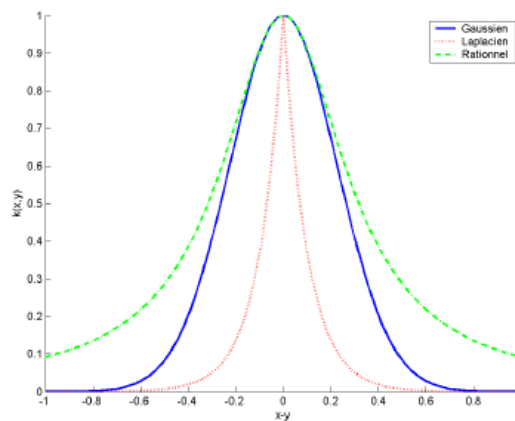
Tout noyau peut être considéré comme un produit scalaire, la notion du noyau permet alors de substituer ces produits scalaires par une fonction  $k(x, x')$  rapidement calculable, le résultat de  $k(x, x')$  doit être équivalent au produit scalaire entre  $\phi(x)$  et  $\phi(x')$  dans un certain espace de caractéristiques  $F$ .

Plusieurs types de noyaux existent mais les plus utilisés sont les noyaux gaussiens et affines, le tableau qui suit montre les différents types de noyaux.

Type	$K(x,x')$
Gaussien	$e^{-\frac{\ x'-x\ ^2}{\sigma}}$
Laplacien	$e^{-\frac{ x-x' }{\sigma}}$
Rationnel	$1 - \frac{\ x' - x\ ^2}{\sigma + \ x' - x\ ^2}$
X <sup>2</sup>	$exp\left(-\frac{1}{\sigma} \sum_i \frac{(x_i - x'_i)^2}{x_i - x'_i}\right)$
Polynomial	$(x^T x')^p$
Affine	$(x^T x' + \sigma)^p$

**Tableau 4-1** les différents types de noyaux.

Le paramètre  $\sigma$  signifie le rayon de prédiction du noyau, ce dernier à une grande influence sur le résultat final, en effet la qualité de modèle est dépend directement de ce paramètre.



**Figure 4-3** Exemples de valeurs de noyau radial obtenus pour sigma = 0.1.

#### 4.6.2 Caractéristiques des fonctions noyaux

Dans cette section nous présentons les propriétés qu'une fonction noyau doit vérifier.

- Une fonction noyau est symétrique si :

$$\mathbf{k}(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = \mathbf{k}(\mathbf{u}', \mathbf{u}) \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{u}' \in \mathcal{U} \quad (4-14)$$

- Un noyau est dit positif s'il satisfait pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in X^2$  et  $(a_1, a_2, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n$ , la somme suivante non négative :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_i a_j K(x_i, x_j)) \quad (4-15)$$

Soient  $K_1, K_2$  deux noyaux reproduisant de  $\mathcal{U} \times \mathcal{U}$  dans  $\mathcal{R}$ . La fonction  $K : \mathcal{U} \times \mathcal{U} \rightarrow \mathcal{R}$  est un noyau reproduisant s'il est défini par l'une des expressions ci-dessous pour tout  $u, u' \in \mathcal{U}$ .

- $k(u, u') = \alpha_1 K_1(u, u') + \alpha_2 K_2(u, u') \quad \forall \alpha_1, \alpha_2 \in \mathcal{R}_+$

- $k(u, u') = K_1(u, u') + c \quad \forall c \in \mathcal{R}_+$

- $k(u, u') = K_1(u, u') K_2(u, u')$

- $k(u, u') = K_1(u, u')^p \quad \forall p \in \mathcal{N}_+$

- $k(u, u') = \exp(K_1(u, u')/2\sigma^2) \quad \forall \sigma \in \mathcal{R}$

- $k(u, u') = \frac{K_1(u, u')}{\sqrt{K_1(u, u)K_1(u', u')}}}$

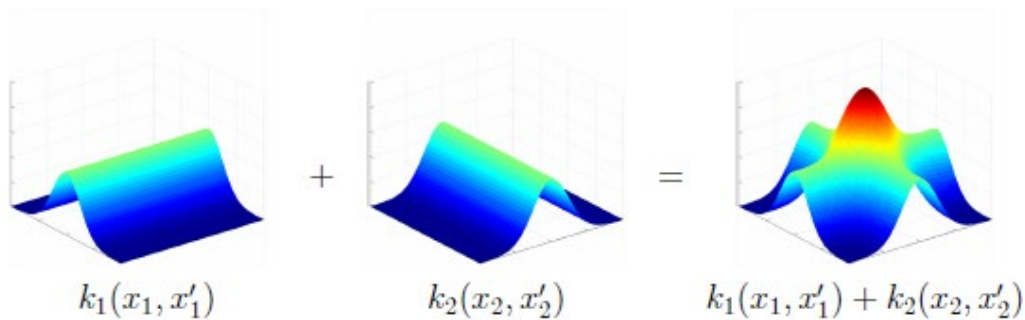


Figure 4-4 illustre la somme de deux noyaux orthogonaux de dimension 1.

### 4.6.3 Noyau radial Gaussien

#### 4.6.3.1 Définition

Un noyau radial gaussien dite RBF (gaussian Radial Basis Function Kernel), dite aussi la fonction gaussienne à base radiale est une fonction  $\phi$  scalaire et symétrique autour d'un centre  $\mu_j$  :  $\phi_j = \phi(\|x - \mu_j\|)$  [BUH 03].

Ce sont des noyaux de la forme :

$$\phi(\mathbf{r}) = e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (4-16)$$

En général, les RBF sont paramétrées par  $\sigma$  qui correspond à la « largeur » de la fonction radiale [EM06].

#### 4.6.3.2 Principe de noyau RBF

La méthode noyau radial gaussien est basée sur des mesures de distances, en effet la méthode RBF a pour but d'identifier les points qui ont une similarité de proximité avec le noyau, la fonction gaussienne à base radiale est définie par :

$$\mathbf{k}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_N) = e^{-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_N\|^2}{2\sigma^2}} \quad (4-17)$$

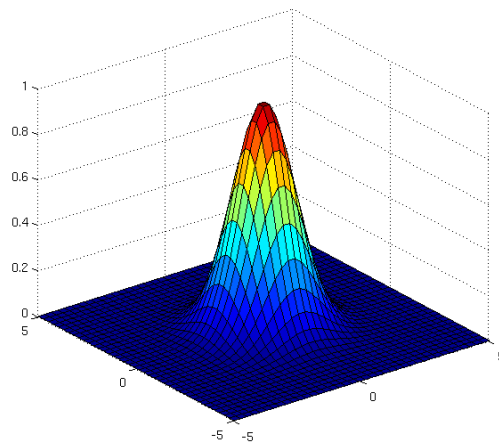
Où

$x_i$  : un point appartient au nuage de point P.

$x_N$  : le point noyau (lendmark).

$\sigma$  : la frontière de prédiction.

La figure (5-6) représente la représentation de la fonction RBF.

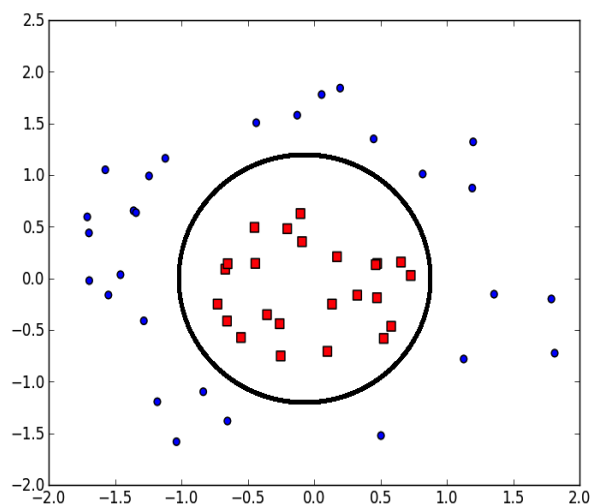


**Figure 4-5** Illustration de la fonction noyau à base gaussienne [DK14].

Prenant un point aléatoire  $x_N$  qui représente le point noyau, la distance entre un point  $x_i \in P$  le nuage de points et le point noyau est :

$$D(x_i, x_N) = \|x_i - x_N\|^2 \quad (4-18)$$

On voit que si la position de point  $x_i$  est éloignée du noyau alors la norme entre ces deux points sera élevée par conséquent l'exponentiel sera plus petit et cette quantité sera proche de zéro, en revanche plus  $x_i$  sera plus proche de  $x_N$ , la distance sera proche de zéro et la valeur de  $k(x_i, x_N)$  sera proche de 1, cette classification est illustrée dans la figure (5-7).



**Figure 4-6** Les points voisins sont en rouge et les points non-voisins sont en bleu.

Pour tous les points  $X_i$  qui se trouvent à l'intérieur du cercle qui compose la frontière de prédiction, la fonction  $k(X_i, X_N)$  est proche de 1, en revanche les points bleus sont ceux qui ont une grande distance par rapport au noyau, la fonction noyau associée à ces points est proche de 0, ils sont alors à l'extérieur de frontière de prédiction.

La classification produite par la fonction à base radiale ne dépend que d'un seul paramètre qui est  $\sigma$  qui définit la frontière de prédiction, en effet ce paramètre détermine le nombre de point appartenant à la frontière de prédiction, donc la valeur de  $\sigma$  à une influence majeure sur le résultat produit par cette fonction, une valeur petite renferme moins de points voisins dans la zone de frontière de prédiction, cependant une valeur grande renferme plus de points voisins.

#### 4.6.4 Solution proposée pour le calcul d'illumination indirecte

L'illumination indirecte est due aux multiples réflexions et transmissions produites par les feuilles de l'arbre, la contribution des autres organes (écorce, tige, fruit, branche ) est minime par apport au feuillage. Lorsque le rayonnement incident interagit avec une feuille, une partie de l'énergie de la lumière est réfléchié, transmet et absorbé (le phénomène de l'absorption n'est pas pris en considération par notre approche). Le phénomène de réflexion / transmission produit deux vecteurs représentant la réflectance et la transmittance qui à leur tour deviennent un rayonnement incident pour d'autres feuilles.

Dans cette section nous allons montrer comment adapter la partie de luminance réfléchié de l'équation de rendu, afin d'approximer la quantité de l'illumination indirecte, en effet l'équation qui calcul l'illumination indirecte dans la direction de vue  $w_0$  entre une feuille dont le centre est  $p$  et la normale  $N_p$  et les feuilles voisines est la suivante :

$$L_{\text{indirect}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0 \rightarrow \mathbf{w}') L_{\text{sun}}(\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{w}') d\mathbf{w}' \quad (4-19)$$

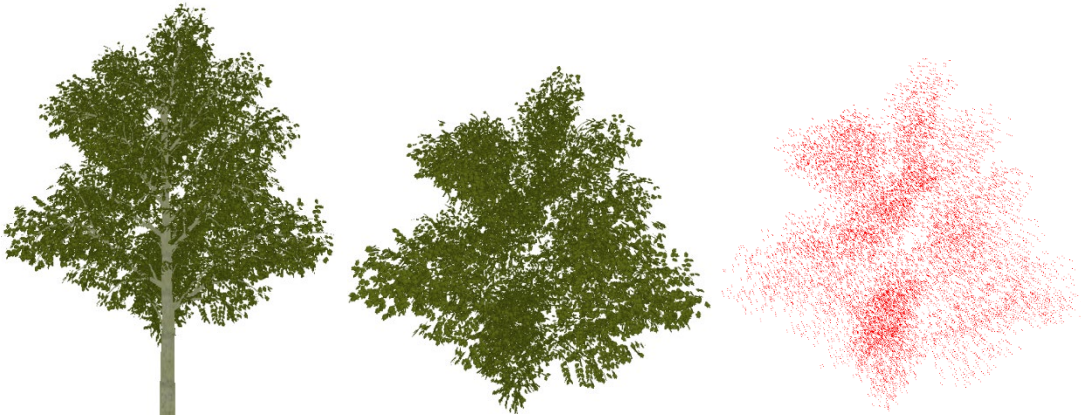
Pour discrétiser l'équation de l'illumination indirecte, on transforme d'abord l'intégrale sur les directions en une intégrale sur les surfaces. La première simplification

consiste à considérer que toutes les feuilles ayant la même surface plane et orientée, cela nous conduit à réduire la complexité de l'équation en intégrant sur la surface.

Alors l'équation devienne :

$$L_{\text{indirect}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}_0) = \frac{\rho_d}{\pi} \int_A L_{\text{sun0}}(\mathbf{p}, \mathbf{p}' \rightarrow \mathbf{P}) \mathbf{G}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') \mathbf{V}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') \mathbf{dA} \quad (4-20)$$

Nous allons générer un nuage de points des feuilles composant l'arbre, la participation du tronc et des branches est minime dans le calcul de la quantité de l'illumination indirecte, pour cela nous allons générer seulement un nuage de points qui représente le feuillage de l'arbre.



**Figure 4-7** Illustre la transition depuis le modèle géométrique vers le nuage de points.

Pour réduire la complexité due aux calculs de visibilité, nous utiliserons une méthode à base noyau radial gaussien pour classifier les feuilles.

Pour justifier nos apports vis à vis le choix et les avantages d'utilisation de cette méthode :

- Avoir un modèle indépendant de la géométrie de l'arbre.
- Le calcul des inter-réflexions lumineuses échangées entre une feuille et les feuilles voisines est indépendant du point de vue.
- Les gains de performances en remplaçant le temps de calcul consommé par les requêtes de visibilité par une formule simple basée sur des calculs de distances.
- Réduire la complexité imposée par l'équation de réflexion multiple à un modèle simple à mettre en œuvre.



La méthode consiste à centrer une feuille qui est la feuille noyau et en fonction de  $\sigma$  qui est le rayon d'une sphère qui représente le volume de prédiction associé à cette feuille, nous allons établir un modèle de classification qui regroupe les feuilles en fonction de leur distance au centre représenté par la feuille noyau. La luminance sortante due aux inter-réflexions à la feuille dont le centre est le point  $p$  est proportionnelle à la somme des contributions de tous les  $p_i$  représentant les centres des feuilles voisines dont la distance est inférieure au rayon de la sphère de prédiction. En d'autres termes pour calculer la quantité de la luminance réfléchie sortante depuis le centre d'une feuille noyau  $p_l$  dans la direction  $w_0$  due à la contribution des feuilles voisines situant dans la sphère de prédiction il suffit de remplacer le terme de visibilité  $V(P, P')$  par  $k(p_i, p_l)$  on obtient :

$$L_{indirect}(p_l, w_0) = A \frac{\rho_d}{\pi} \sum_{i=1}^n L_{sun0}(p_l, p_i \rightarrow p_l) k(p_i, p_l) G(p_i, p_l) \quad (4-21)$$

En substituant l'équation (4-17) dans l'équation (4-21), l'équation devient :

$$L_{indirect}(p_l, w_0) = A \frac{\rho_d}{\pi} \sum_{i=1}^n L_{sun0}(p_l, p_i \rightarrow p_l) e^{-\frac{\|p_i - p_l\|^2}{2\sigma^2}} \frac{\cos(N_{p_l, p_i \rightarrow p_l}) \cos(N_{p_l, p_l \rightarrow p_i})}{\|p_i - p_l\|^2} \quad (4-22)$$

Où

$n$  : le nombre de feuilles voisines situant dans la sphère.

$A$  : l'aire de feuille,  $A$  est constant pour toutes les feuilles de l'arbre.

$\sigma$  : le rayon de la sphère de prédiction.

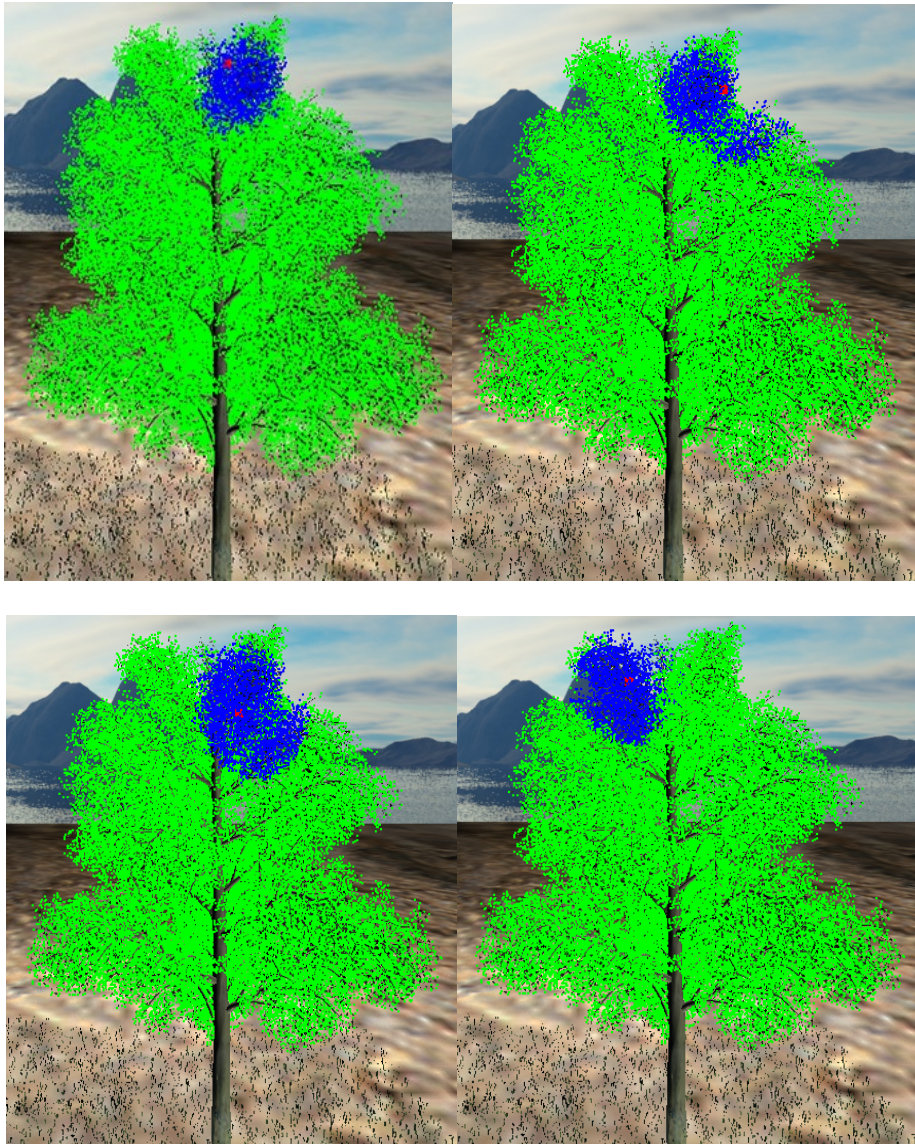
$p_l$  : la feuille noyau.

$p_i$  : la position d'une feuille dont la distance est inférieure au rayon de prédiction.

Les calculs de visibilité de l'ensemble des feuilles visibles depuis  $p_l$  devient un processus simple. Nous considérons que toutes les feuilles situées dans la sphère de prédiction sont visibles depuis la feuille noyau, cependant le paramètre  $\sigma$  à une grande influence sur le résultat final. En effet un grand rayon renferme plus de feuilles dans la sphère de prédiction tandis qu'un petit rayon renferme moins de feuilles, sachant que cela aura des conséquences directs sur la quantité de luminance réfléchie sortante depuis la feuille noyau, ainsi sur les performances de notre modèle.

Pour chaque feuille noyau un processus itératif est déclenché pour identifier les feuilles les plus proches voisines situées dans la sphère, ce traitement est effectué par le CPU, puis nous envoyons vers le GPU le tableau qui contient les positions des feuilles pour le calcul de la composante indirecte, les calculs de visibilité de l'ensemble des feuilles visibles depuis  $P_l$  devient un processus simple, nous considérons que toute les feuilles situant dans la sphère sont visible depuis la feuille noyau.

La Figure (4-9) présente un exemple de résultat pour une feuille noyau choisie aléatoirement comme un point de repère, après le passage au nuage de points correspondant à notre modèle, nous appliquons l'équation (4-23) pour identifier les feuilles voisines en fonction de rayon de prédiction  $\sigma$ .

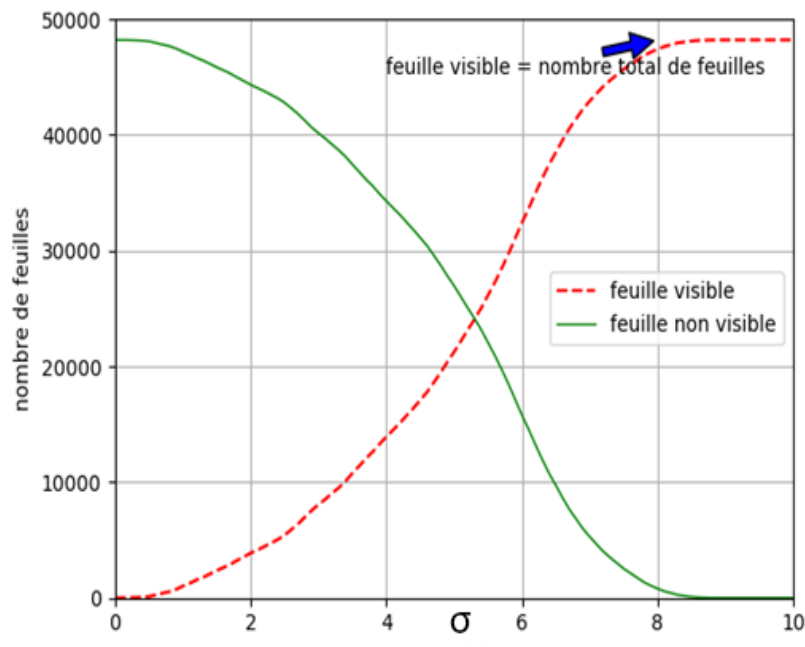


**Figure 4-9** Classification de nuage de points en utilisant un noyau RBF  $\sigma = 1$ , en bleu

Les points visibles, en vert les points non visible.

L'influence du paramètre  $\sigma$  est majeur sur les points visibles identifiés, en effet accroître la valeur de  $\sigma$  augmente le nombre des feuilles visibles depuis la feuille noyau, tandis que diminuer la valeur de  $\sigma$  permet d'avoir moins de points visibles alors moins de feuilles dans la zone de frontière de prédiction.

La figure (4-10) illustre l'effet de l'influence de  $\sigma$  sur le processus de calcul de visibilité.



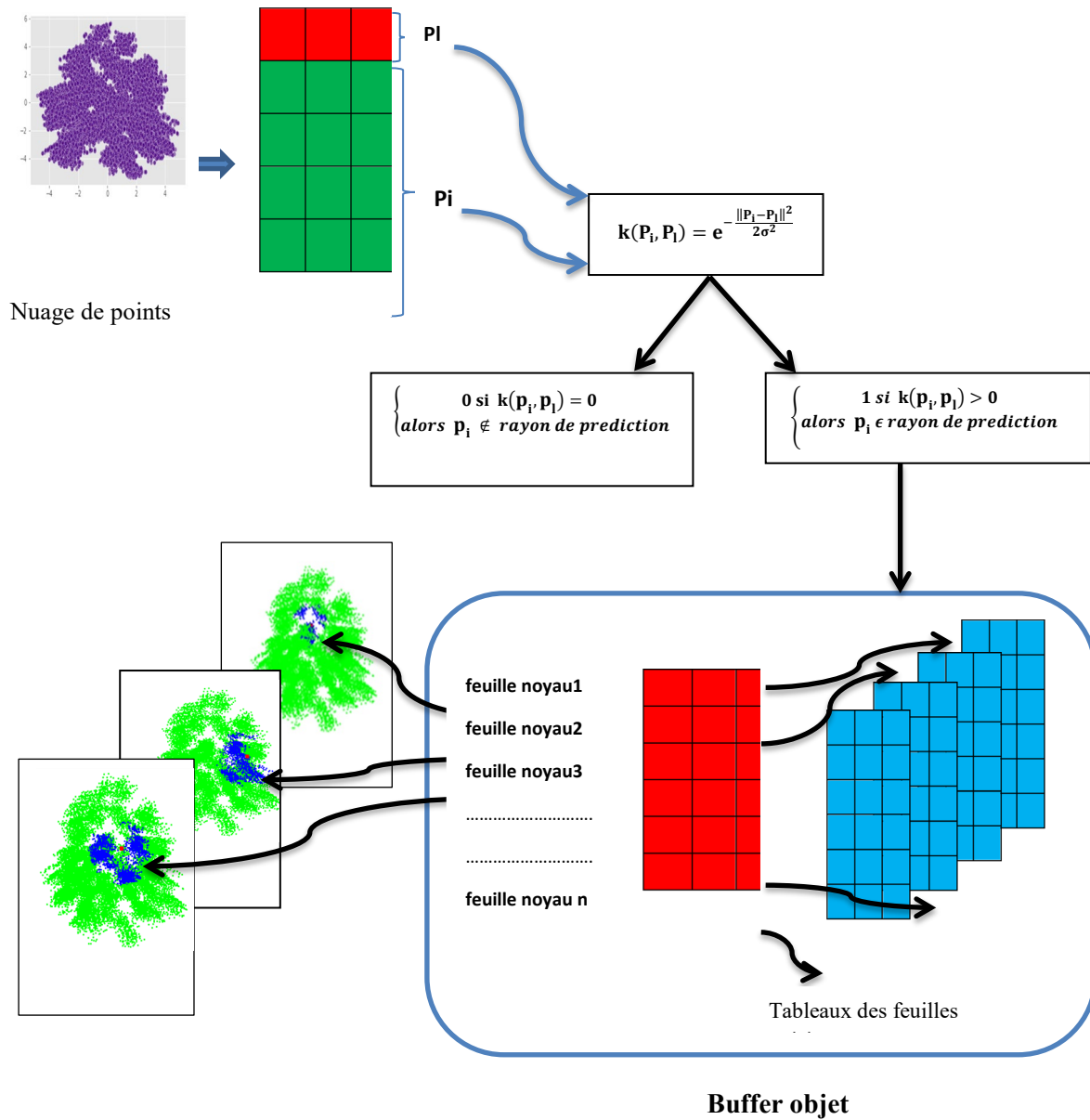
**Figure 4-10** Représente le nombre de feuille visible pour différente valeur de  $\sigma$ .

Lorsque  $\sigma=0$ , le nombre de feuilles visibles est nulle, dans ce cas c'est la position de la feuille noyau, cependant le nombre de feuille non visible est le nombre total de feuilles composant notre modèle, nous observons que le nombre de feuilles visible depuis la centre de noyau augmente avec le rayon de prédiction  $\sigma$ . Nous constatons que le nombre de feuilles visible depuis la feuille noyau converge vers une valeur constante (maximal) dès que  $\sigma = 8.4$ , tandis que le nombre de feuilles non visibles converge vers zéro.

## 4.7 Description du pipeline

Nous avons montré comment gérer la complexité photométrique afin de rendre des scènes larges de forêt. Notre approche exploite la puissance de calcul des processeurs graphique GPU, en effet les trois composantes de l'équation (4-6) sont implémentées dans le fragment shader. Afin d'améliorer les performances d'une manière significative, une meilleure solution consiste à charger la scène dans des buffer Object, le principal avantage est qu'ils résident dans la mémoire GPU cela permet d'avoir un affichage rapide.

Pour des raisons d'optimisation nous utilisons des images avec canal alpha pour gérer la transparence des textures des feuilles, cette opération est évaluée dans le fragment shader, ainsi l'évaluation de l'illumination directe due aux ciel et soleil qui est traduit par l'évaluation des deux équations (4-9),(4-12), le vertex shader doit recevoir la position de la source lumineuse et la caméra en tant que variables uniformes, ainsi les coordonnées des textures et la carte d'environnement. Cependant pour le calcul de l'illumination indirecte, l'équation (4-17) est évaluée sur CPU afin de classifier les feuilles après l'identification des feuilles voisines, le choix de la valeur de  $\sigma$  dépend de l'utilisateur, cela pourrait avoir des conséquences positives ou négatives sur les performances de notre algorithme, ainsi la valeur de  $\sigma$  est constante pour toutes les arbres composants la forêt. Le fragment shader reçoit en paramètre le buffer objet contenant les positions des feuilles voisines.



**Figure 4-8** Le GPU récupère les données pour le calcul de la composante indirecte.

Maintenant que les données sont sur le GPU, nous pouvons calculer la composante indirecte et cela en évaluant l'équation (4-22) dans le fragment shader. La figure ci-dessous présente les différentes étapes de notre approche pour le calcul de la composante directe et indirecte.

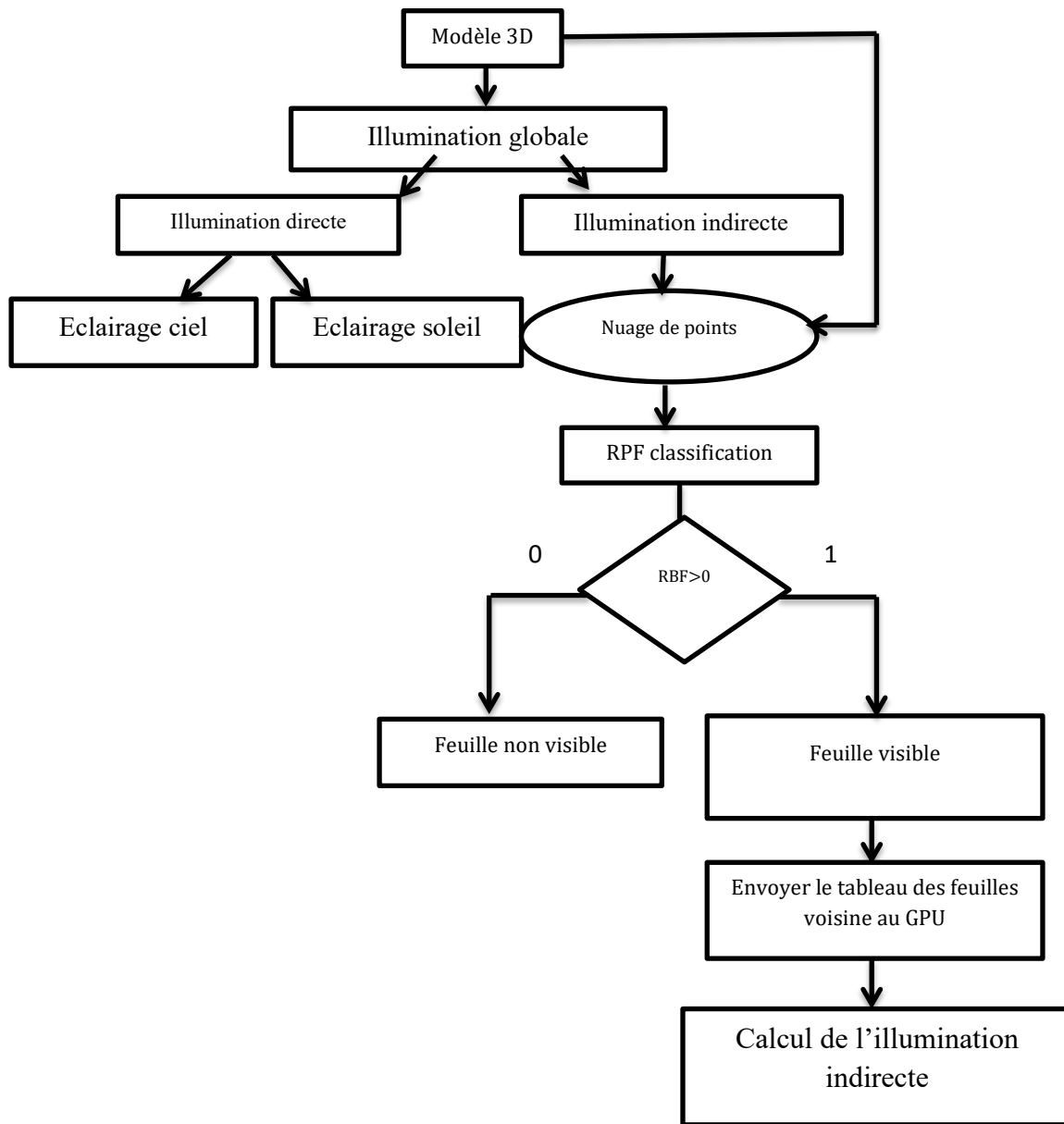


Figure 4-12 Illustration des étapes de notre approche.

Les algorithmes 1,2,3 illustrent le calcul des trois composantes  $L_{ciel}$ ,  $L_{sun}$ ,  $L_{indirecte}$ .

---

### Algorithme 01 illumination directe due au ciel

---

**Entrées :**  $albedo$ ,  $pos\_cam$  : position de la caméra,  $Skybox$  : texture;

**Sorties :**  $L_{sky}$  : illumination directe due au soleil ;

Récupération des données à partir des VBO (les positions et les normales des feuilles) ;

$I \leftarrow \text{normaliser}(pos\_cam - pos\_feuille)$  ;

$R \leftarrow \text{Reflect}(-\text{Normaliser}(I), \text{Normaliser}(N))$  ;

$reflect\_intensity \leftarrow \text{texture}(\text{texture\_reflection}, \text{TexCoords}).r$  ;

$NdotL \leftarrow$  le cos de l'angle entre la normal à la surface et la direction de la source lumineuse ;

Si ( $reflect\_intensity > 0.1$ )

|  $reflect\_color \leftarrow \text{texture}(\text{skybox}, R) * reflect\_intensity$ ;

| fin si

$L_{sky} \leftarrow BRDF * reflect\_color * NdotL$  ;

fin

---



---

### Algorithme 02 illumination directe due au soleil

---

**Entrées :**  $albedo$ ,  $Att$  : atténuation,  $L$  : couleur de la source ;  $pos\_sol$  : position de soleil,  $pos\_cam$  : position de la caméra ;

**Sorties :**  $L_{sun}$  : illumination directe due au soleil ;

Récupération des données à partir des VBO (positions et les normales des feuilles) ;

$N \leftarrow \text{Normaliser}(\text{Normal})$  ;

// Direction de la caméra

$Dir\_cam \leftarrow \text{normalisé}(pos\_cam - pos\_feuille)$  ;

//Direction de la lumière

$Dir\_sol \leftarrow \text{normalisé}(pos\_sol - pos\_feuille)$  ;

// le cos de l'angle entre la normal à la surface et direction de la source lumineuse ;

$NdotL \leftarrow \max(\text{dot}(N, Dir\_sol), 0.0)$ ;

$L_{sun} \leftarrow BRDF * L * Att * NdotL$  ;

Fin

---

**Algorithme 03 illumination indirecte**

**Entrées :**  $\sigma$  : rayon de prediction ,  $feuille[n]$  : tableau des feuilles voisines ,  $albedo$ ,

$feuille_N$  : position de la feuille noyau,  $feuille_N$  : la normal de la feuille noyau,  $L$  : la couleur de la source;

**Sorties :**  $L_{indirect}$  : illumination indirecte ;

Récupération des données à partir des VBO (positions et les normales des feuilles) ;

$BRDF \leftarrow \frac{albedo}{\pi}$  ;

Pour  $i \leftarrow 1$  jusqu'au nombre de feuilles voisines faire

$$illumination_{indirecte} = illumination_{indirecte} + BRDF * L * \frac{|N_{feuille[i]} \cdot feuille_i \cdot feuille_N| |N_{feuille_N} \cdot feuille_N \cdot feuille[i]|}{\|feuille[i] - feuille_N\|^2}$$
 ;

Fin pour

Fin

**4.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs algorithmes pour simuler l'éclairage global dans une forêt. Nous avons présenté deux algorithmes pour le calcul de l'illumination due au ciel et au soleil, afin de réduire la complexité et le temps de calcul consommé par le calcul de l'éclairage indirecte au sein d'un feuillage. Nous avons défini une approche basée sur l'utilisation de la fonction gaussienne à base radiale afin de réduire la complexité imposée par le calcul des requêtes de visibilité, notre solution permet de remplacer la récursivité imposée par le terme de visibilité à une simple formule de calcul de distances, la solution proposée a été implémentée complètement dans un fragement shader, tous cela afin d'exploiter la puissance de calcul des GPUs.

Dans le chapitre qui suit nous présentons les résultats produits par notre approche.



## 5 Chapitre 5

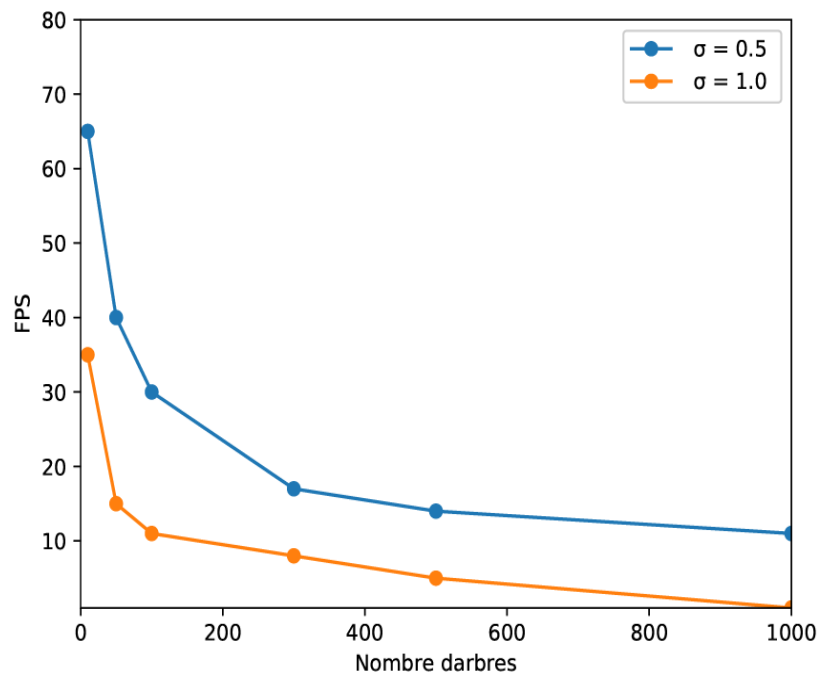
### Résultats et validation

#### 5.1 Introduction

Pour démontrer l'efficacité de notre modèle, nous avons testé notre algorithme avec une machine Intel Core i5 et une carte graphique Intel iris 5100 avec une mémoire de 2G, tous les effets lumineux sont implémentés sur GPU, les bibliothèques utilisées sont :

- La bibliothèque graphique OpenGL 4.0.
- Glfw pour la création des fenêtres.
- GLM (OpenGL Mathematics).

La figure (5-1) nous montre les performances de notre algorithme en rendant différentes scènes de forêts, en variant le nombre d'arbres ainsi la valeur de  $\sigma$ , nous avons choisi un modèle d'arbre dont le nombre de polygone est représenté par 48000 triangles (height poly), cela permet d'effectuer le rendu sur un modèle arbre complexe afin de démontrer l'efficacité de notre approche.



**Figure 5-1** Les performance de notre modèle en fonction du nombre d'arbres et  $\sigma$ .

Comme nous le constatons pour les deux valeurs correspondantes au rayon de prédiction  $\sigma$ , le nombre FPS diminue au fur et à mesure que le nombre d'arbre augmente, cela traduit par la complexité géométrique et photométrique qui caractérise les objets naturels. Lorsque la valeur  $\sigma$  diminue ( $\sigma = 0.5$ ) le nombre de FPS augmente cela s'explique par le fait que le paramètre  $\sigma$  a un grand influence sur les performances, en effet un grand rayon renferme plus de feuilles dans le rayon de prédiction ce qui augmente le temps de calcul consommé pour le calcul de la composante indirecte, tandis que un petit rayon renferme moins de feuilles, sachant que cela aura des conséquences directe sur la quantité de luminance réfléchie sortante depuis la feuille noyau ainsi le temps de calcul.

Notre algorithme permet facilement d'afficher plusieurs arbres avec différentes textures pour l'écorce et les feuilles ainsi de différentes hauteurs, en effet notre approche permet de rendre d'autre éléments naturels comme les rochers et l'herbe.



**Figure 5-2** Arbres avec texture de feuilles différentes.

## 5.2 Validation

Pour démontrer l'efficacité de notre approche, nous comparons les images obtenues par notre algorithme, avec celles dites de références (ground truth) obtenues par la méthode de suivi de chemin (path tracing).

Nous avons utilisé deux métriques la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE [WM+05], dans cette métrique nous calculons l'erreur comme étant la racine carrée des sommes de différences entre les pixels de l'image de référence et ceux de notre image, le RMSE est calculer par la formule suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m.n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I'(i, j) - I(i, j)]^2} \quad (6-1)$$

Où

$I'$  : l'image de référence.

$I$  : l'image générée.

$n, m$  : les dimensions de l'image.

La deuxième métrique est l'index de similarité structurelle SSIM [WSS+04] utilisée pour le calcul de similarité de structure entre deux images, cette mesure est fondée sur l'hypothèse que l'œil humain est plus sensible aux changements dans la structure de l'image, plutôt qu'à une différence pixel à pixel [PD14], le calcul de SSIM est illustré dans l'équation suivante :

$$SSIM = \frac{2(\mu_x \mu_y + C_1)(\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_2)} \quad (5-2)$$

Où

$x, y$  : sont des patches (fenêtre) de l'image.

$\mu_x, \mu_y$  : la moyenne du patch  $x$  et  $y$  respectivement.

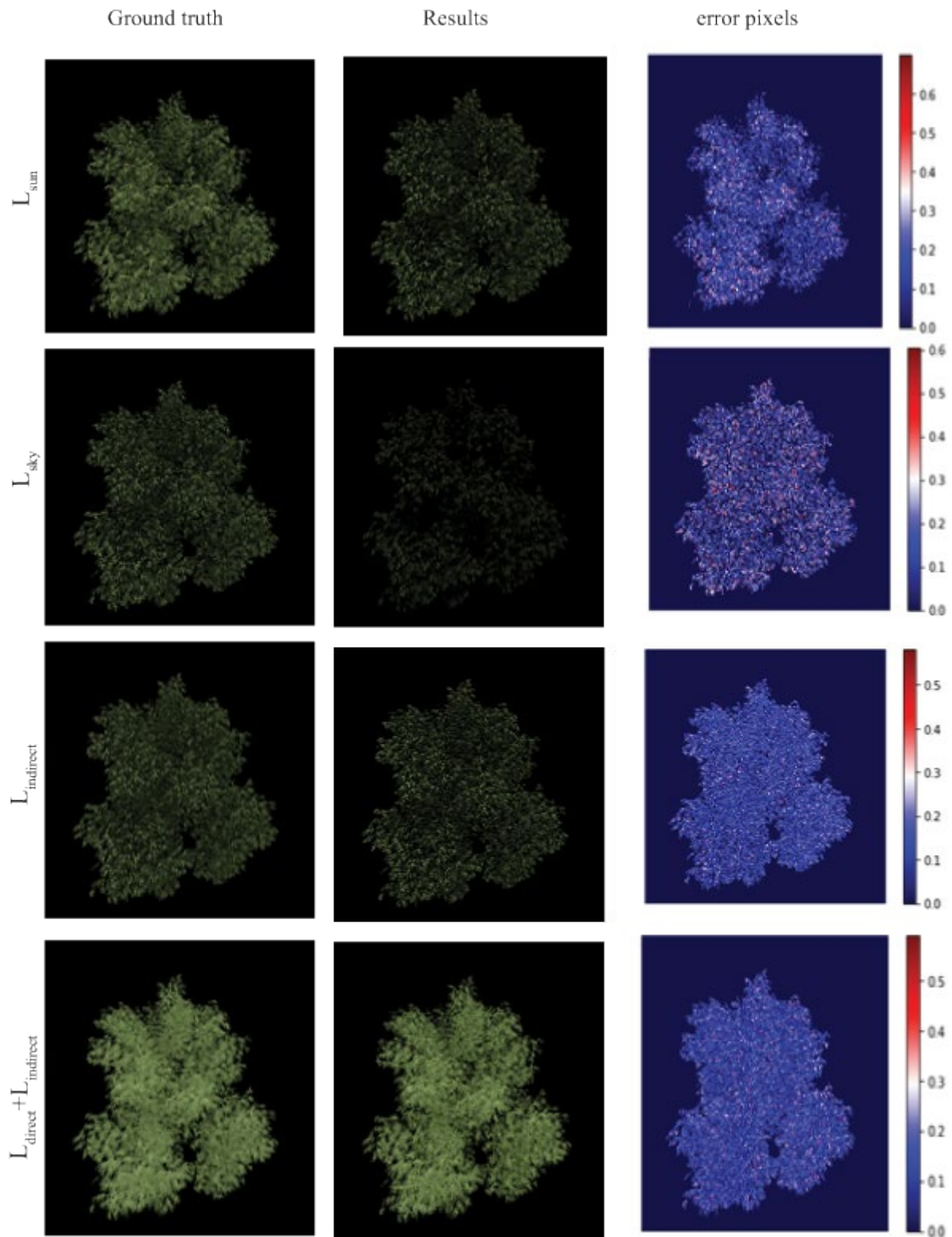
$\mu_x^2, \mu_y^2$  : la variance du patch  $x$  et  $y$  respectivement.

$\sigma_{xy}$  : la covariance de  $x$  et  $y$ .

$C_1, C_2$  : Sont des constantes pour stabiliser la division quand la somme au carré des variances des patches  $x$  et  $y$  converge vers le zéro.

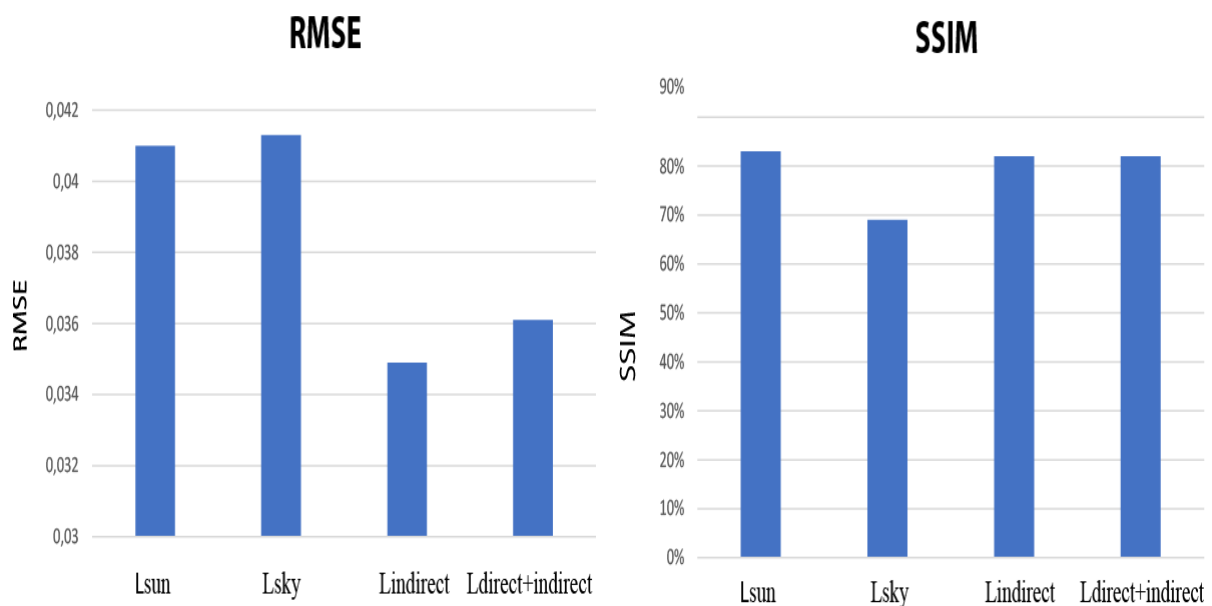
Le principe de SSIM consiste à mesurer la similarité en se basant sur trois paramètres principaux les variations de la luminance en calculant la moyenne de l'intensité de pixels, le contraste en calculant l'écart entre l'image de référence et celle correspond à notre modèle et le troisième paramètre consiste à évaluer la structure entre les deux images cela en évaluant la corrélation entre les deux images.

La scène est composée de feuillage de notre modèle d'arbre, dans la figure 6-2. Nous comparons la luminance due au ciel, soleil, indirecte et la luminance directe et indirecte avec celles obtenues par la méthode de suivi de chemin. La première colonne contient les images de références ground Truth, la deuxième colonne contient les images obtenues par notre approche et la troisième colonne contient les cartes de chaleur permettant de calculer la valeur maximal de l'erreur pour chaque pixel correspond à l'image de différence entre l'image générée par notre approche et celle de référence.



**Figure 5-2** Comparaison qualitative pour les différentes composantes d'illumination entre notre approche et la méthode de path tracing.

Notre approche à pour objectif de rendre une scène naturelle complexe avec illumination directe et indirecte, tout en produisant des images de qualité, tout cela en réduisant le temps consommé par le traitement des requêtes de visibilité notamment pour le calcul de la composante indirecte. On peut constater que notre approche permet de calculer la luminance réfléchie d'un feuillage avec un rayon de prédiction  $\sigma=1$  offre de bons résultats qualitatifs. L'approximation de l'illumination indirecte est calculée comme expliquer dans l'équation 4-22.

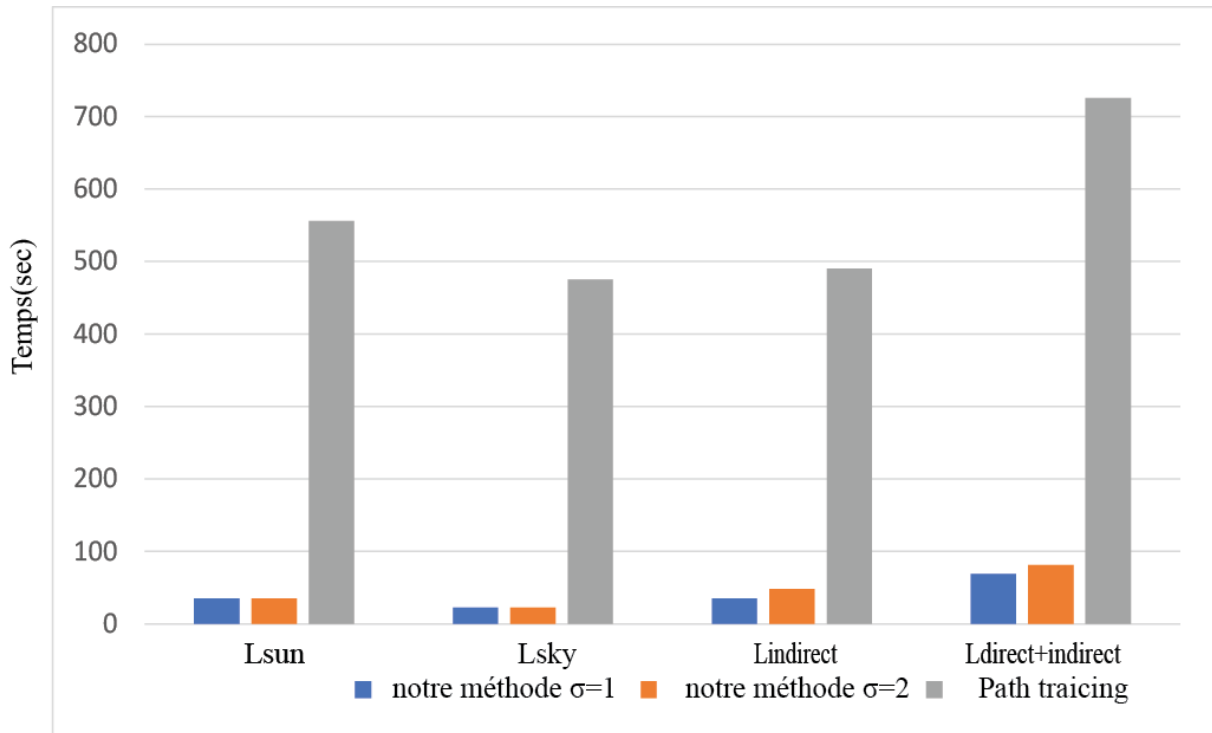


**Figure 5-3** Le RMSE et SSIM des différentes composantes de l'illumination calculée entre les images résultats obtenus par notre approche et les images de référence.

Nous remarquons que la racine de l'erreur moyenne quadratique et l'index de similarité structurelle pour le calcul de la composante indirecte sont respectivement 0.036 et 82%, cela dit que notre approche calcule avec une précision et similarité satisfaisante par rapport à l'image de référence.

La figure ci-dessous montre une comparaison de temps d'exécution entre notre approche et la méthode de référence path tracing, nous constatons que le temps de calcul de la composante indirecte augmente en fonction de la valeur de  $\sigma$ , cela est traduit par le nombre de

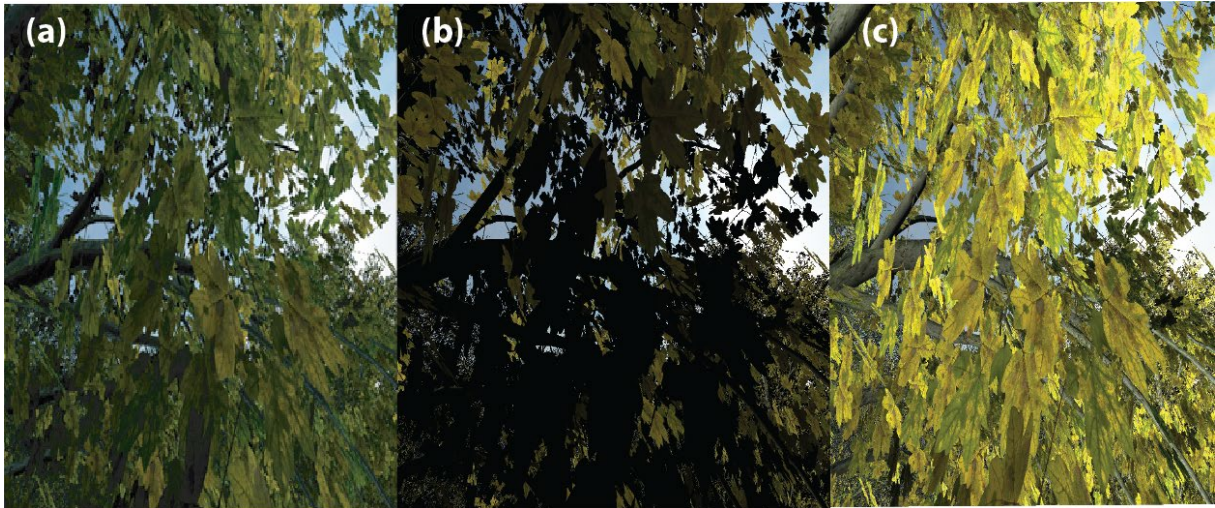
feuilles à l'intérieur de rayon de prédiction de la fonction radiale, participant au calcul de la composante indirecte.



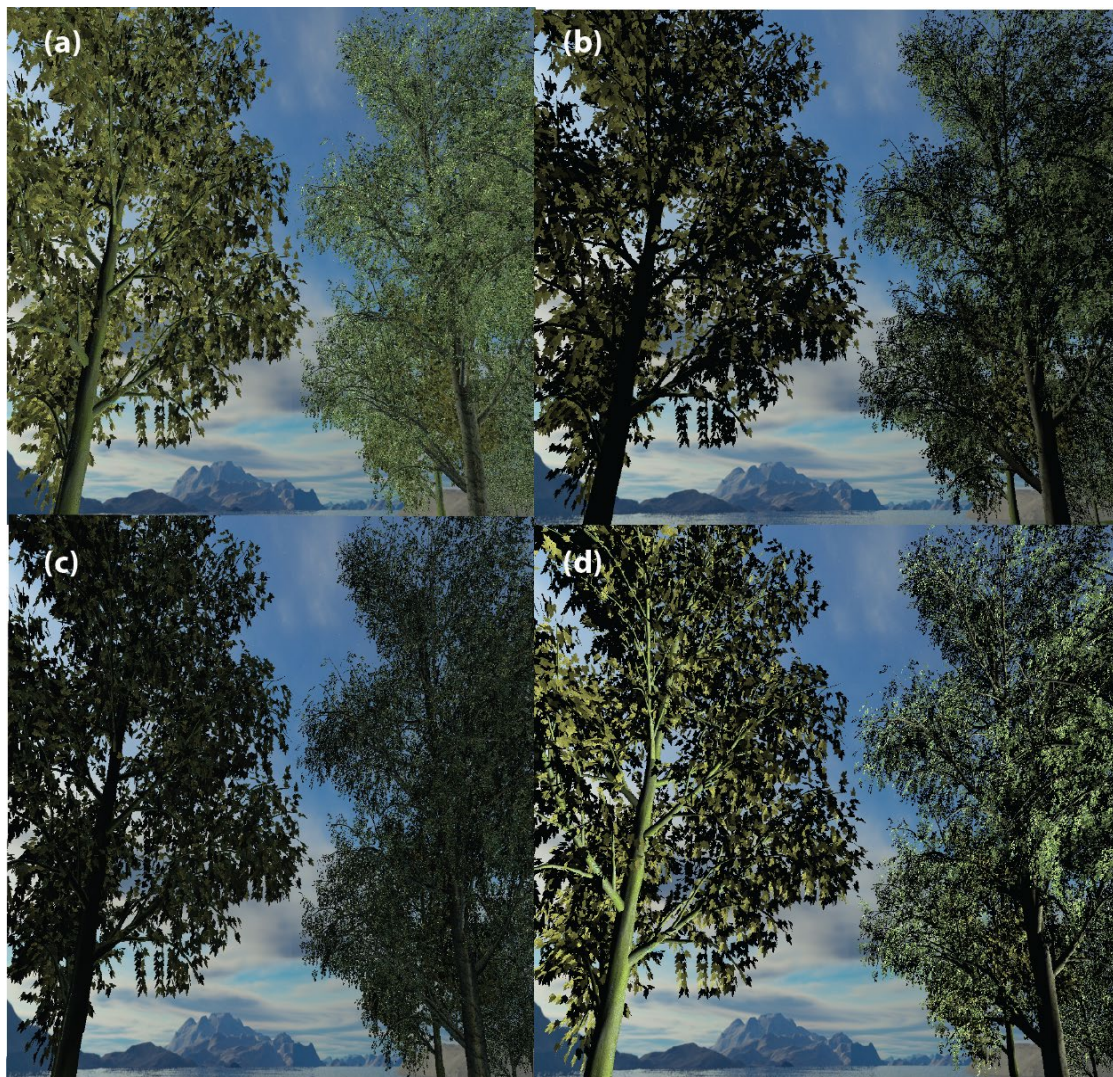
**Figure 5-4** Comparaison entre notre approche et la méthode de suivi de chemin.

Pour chaque composante de l'éclairage notre approche offre de meilleurs résultats en terme de temps de calcul, nous pouvons constater que notre approche produit des images de qualité satisfaisante à celles produite par une méthode de référence. Cela est due aux approximations que nous avons adopté, pour calculer la composante indirecte et relever le défi de complexité des scènes de forêts. En revanche, nous montrons que notre approche produit des images avec un taux de similarité satisfaisant et des performances assez réduites, cela prouve son efficacité pour traiter les scènes naturelles.

Les figures ci-dessous présentent quelques résultats de rendu des forêts générés par notre approche.



**Figure 5-5** Illumination due au soleil, (c) illumination due au ciel, (c) illumination directe + indirecte.



**Figure 5-6** (a) La somme des trois composantes, (b) l'éclairage direct dû au soleil, (c) l'éclairage dû au ciel, (c) l'éclairage indirect.

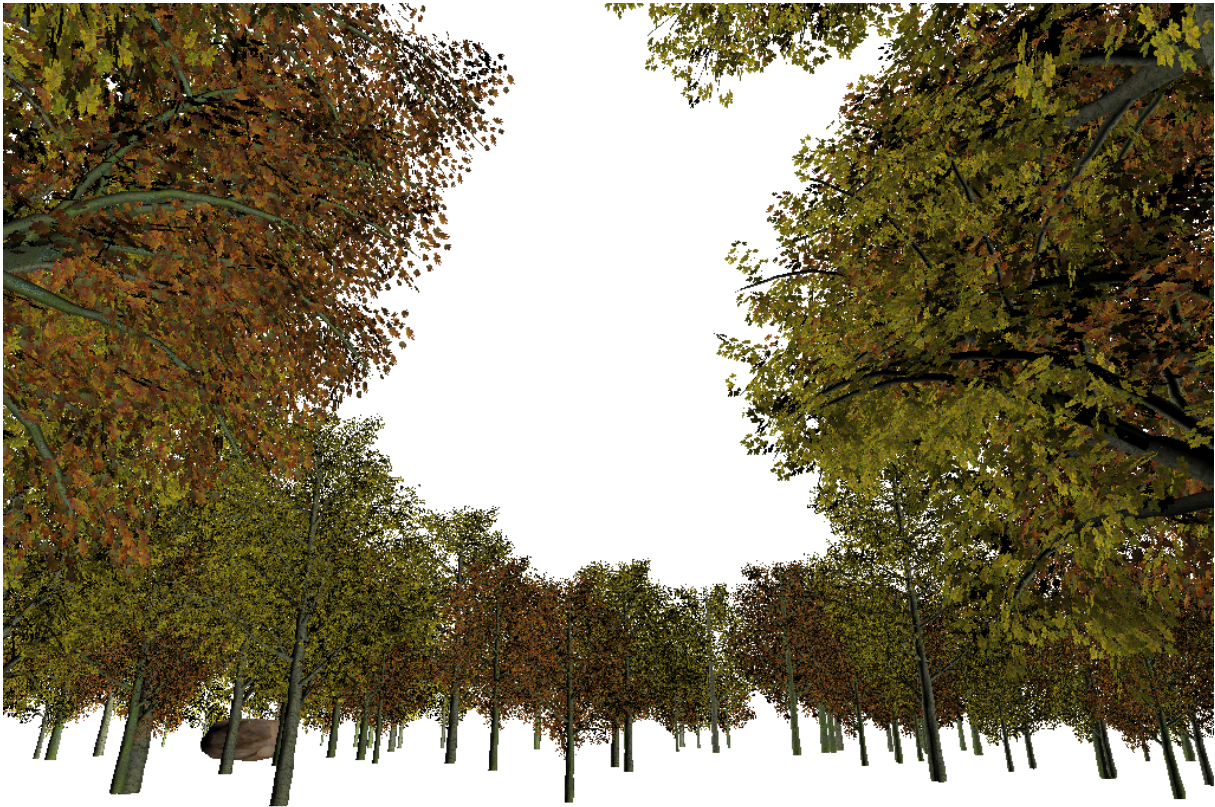




**Figure 5-7** Plusieurs arbres avec texture de feuilles différentes.



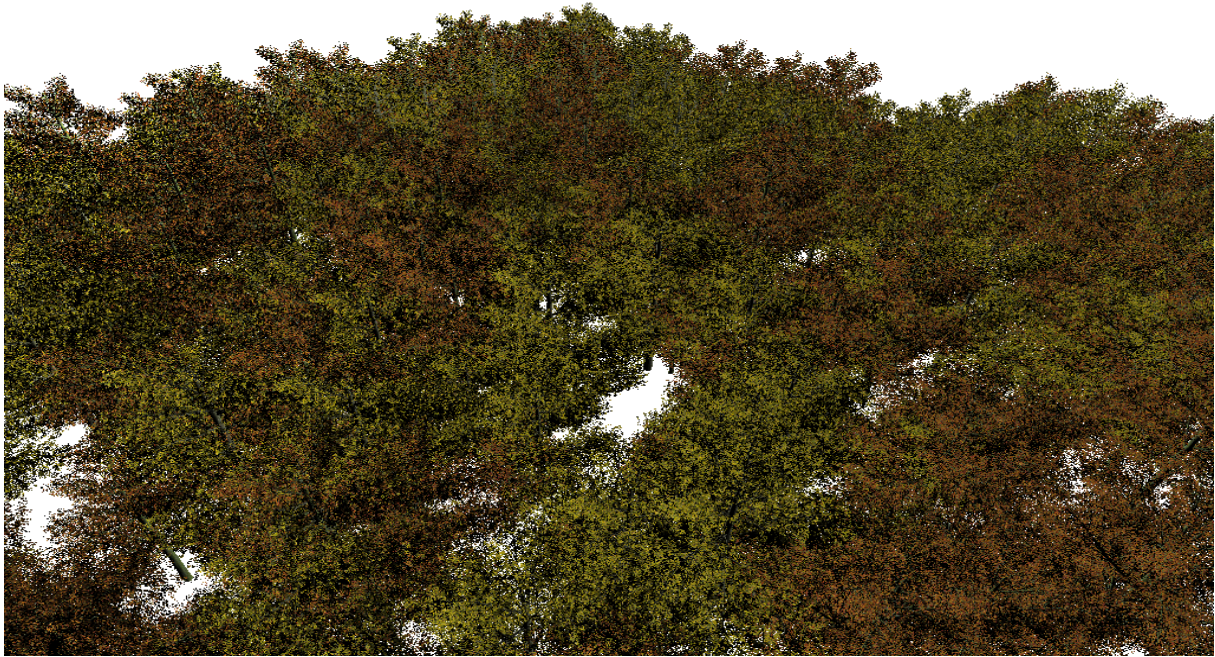
**Figure 5-8** Feuillage avec différentes textures rendu avec notre approche.



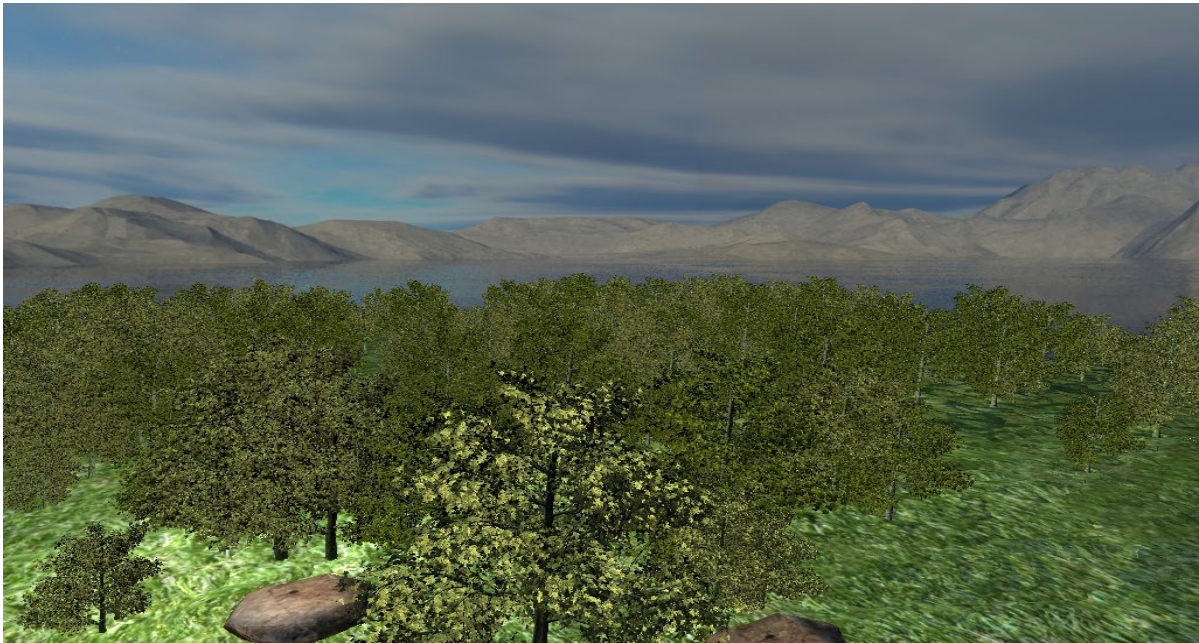
**Figure 5-9** Forêt avec illumination directe et indirecte rendu avec notre approche.



**Figure 5-10** Feuillage avec ombre porté.



**Figure 5-11** Rendu de dense forêt avec notre technique.



**Figure 5-12** Rendu d'une forêt avec rochers et herbes.

### 5.3 Discussion

Nous avons présenté une nouvelle approche pour surmonter la complexité de calcul d'illumination globale des scènes naturelles en particulier une forêt. Le calcul de la composante indirecte, l'approche proposée est basée sur l'utilisation de la fonction noyau radiale gaussienne afin d'extraire les feuilles qui seront utilisées pour calculer la quantité de l'illumination indirecte échangée entre les feuilles voisines, ainsi elle permet de réduire la complexité imposée par l'équation de réflexion multiple à un modèle simple à mettre en œuvre en remplaçant le temps de calcul consommé par les requêtes de visibilité par une simple formule basée sur des calculs de distances. Notre approche permet de traiter efficacement les échanges lumineux au sein d'une forêt, elle permet un calcul rapide et produit des images de bonne qualité visuelle. Cependant comme nous venons de constater même si les résultats sont encourageants, en revanche notre approche souffre de quelques limitations.

Tout d'abord, le problème majeur est le choix de la valeur optimal du rayon de prédiction pour laquelle nous aurons des images de bonne qualité visuelle dans un temps de calcul acceptable, pour notre modèle le choix du rayon de prédiction dépend de l'utilisateur en faisant varier la valeur de  $\sigma$  afin d'identifier la valeur la plus appropriée. Vue la diversité d'une forêt en termes d'espèces et d'échelle un seul rayon de prédiction pour approximer la visibilité n'est pas adapté pour tous les arbres composant une forêt.

## 6 Chapitre 6

### Conclusion et Perspectives

#### 6.1 Conclusion

L'illumination globale des scènes naturelles en temps réel est un problème crucial dans le domaine de l'informatique graphique, car les scènes naturelles sont caractérisées par une complexité à toutes les échelles. Cependant avec l'évolution sans cesse des GPU, nous avons tendance à relever le défi causé par la complexité photométrique pour une forêt, en proposant une nouvelle approche pour le calcul de l'illumination globale d'une forêt en exploitant la puissance des cartes graphique actuelle. Nous avons atteint ce but, en proposant un algorithme qui permet de calculer la luminance atteignant l'observateur dans une direction donnée, comme une somme de trois composantes directe due aux sources lumineuses directes (ciel et soleil) et indirectes, ceci permet d'avoir un traitement spécifique pour chaque composante et réduit énormément la complexité de l'équation de rendu.

Afin de surmonter la complexité posée par la composante indirecte nous avons proposé une approche basée sur l'approximation de visibilité, en utilisant la fonction noyau radiale gaussienne afin d'extraire les feuilles qui ont contribué pour calculer la quantité de l'illumination indirecte échangée entre les feuilles voisines. Nous constatons que cette méthode améliore fortement les performances et la qualité visuelle pour les scènes 3D de forêts.

## 6.2 Perspectives

De nombreuses pistes de recherche peuvent être envisagées à partir de ces résultats. Il serait ainsi intéressant d'améliorer notre approche, en utilisant un rayon de prédiction adaptatif pour les différentes formes d'arbres constituant une forêt, nous envisageons l'utilisation des fonctions noyaux combinées [DK14], cela permet d'avoir plusieurs fonctions noyaux avec des rayons de prédictions différents, nous pourrions classifier plusieurs feuilles noyaux simultanément, afin d'approximer les requêtes de visibilité correspond à ces feuilles noyaux, tous cela permet d'accélérer l'étape de classification correspond à notre approche afin de déterminer les feuilles visibles contribuant au calcul de l'illumination indirecte, il est donc possible d'envoyer au GPU plusieurs tableaux à la fois contenant les feuilles visibles pour chaque feuille noyau, également les fonctions noyaux combinées devraient nous permettre d'exploiter au mieux la puissance de calcul de GPU.

## Bibliographie

[Apo,12] Apostu, O., Mora, F., Ghazanfarpour, D., Aveneau, L. (2012). Analytic ambient occlusion using exact from-polygon visibility. *Computers Graphics*, 36(6), 727-739.

[BA06] Boudet, A. (Soutenance le 20/01/2006). Lancer de photons multi-passes et écrasement de photons pour le rendu optronique, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier.

[BBP08] Boulanger, K., Bouatouch, K., Pattanaik, S. (2008). Rendering trees with indirect lighting in real time. In *Computer Graphics Forum Vol. 27, No. 4*, pp. 1189-1198. Blackwell Publishing Ltd.

[BCF+05] Behrendt, S., Colditz, C., Franzke, O., Kopf, J., Deussen, O. (2005, September). Realistic real-time rendering of landscapes using billboard clouds. In *Computer Graphics Forum Vol. 24, No. 3*, pp. 507-516. Blackwell Publishing, Inc.

[BGB+17] Babahenini, D., Gruson, A., Babahenini, M. C., Bouatouch, K. (2017). Efficient inverse transform methods for VPL selection in global illumination. *Multimedia Tools and Applications*, Vol.77,11,pp 1-25, Springer.

[BT,11] Bashford-Rogers, T., Debattista, K., Harvey, C., Chalmers, A. (2011). Approximate visibility grids for interactive indirect illumination. In *Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES)*, Third International Conference on pp. 55-62.

[CBL+11] Cabral, M., Bonneel, N., Lefebvre, S., Drettakis, G. (2011). Relighting photographs of tree canopies. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol 17,10, 1459-1474.

[CCW+88] Cohen, M. F., Chen, S. E., Wallace, J. R., & Greenberg, D. P. (1988). A progressive refinement approach to fast radiosity image generation. *ACM SIGGRAPH computer graphics*, 22(4), 75-84.

- [CON99] Brian Cabral, Marc Olano, and Philip Nemecek(1999). Reflection space image based rendering. In SIGGRAPH '99 : Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 165–170, USA,ACM .
- [DK14] Duvenaud, D. (2014). Automatic model construction with Gaussian processes, Doctoral thesis, University of Cambridge.
- [DS05] Dachsbacher, C, & Stamminger, M. (2005, April). Reflective shadow maps. In Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games,pp. 203-231. ACM.
- [EM06] Emmanuel Viennet. (2006). Réseaux à fonctions de base radiales (chapitre d'ouvrage), Apprentissage connexionniste, Lavoisier, pp.105, I2C Herm\_es. <hal-00085092>.
- [EF12] Bruneton, E., Neyret, F. (2012, May). Real-time Realistic Rendering and Lighting of Forests. In Computer Graphics Forum. Vol. 31, No. 2pt1, pp. 373-382. Blackwell Publishing Ltd.
- [F]17]Favorskaya, M. N., Jain, L. C. (2017). Lighting and Shadows Rendering in Natural Scenes. In Handbook on Advances in Remote Sensing and Geographic Information Systems pp. 367-396. Springer,Cham.
- [GH06] Ghosh, A., & Heidrich, W. (2006). Correlated visibility sampling for direct illumination. The Visual Computer, Vol 22,9-11,pp. 693-701, Springer.
- [GS08] Geist, R., Steele, J. (2008, August). A lighting model for fast rendering of forest ecosystems. Interactive Ray Tracing, 2008. IEEE Symposium pp. 99-106. IEEE.
- [GSH+92] Gene Greger, Peter Shirley, Philip M. Hubbard, and Donald P. Greenberg.(April 1992). Irradiance volume. Vol. 18, No. 2, pp. 32-43, IEEE Computer Graphics and Applications.
- [GTG+84] Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P., & Battaile, B. (1984, January). Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In ACM SIGGRAPH computer graphics ,Vol. 18, No. 3, pp. 213-222. ACM.



- [HSA91] Hanrahan, P., Salzman, D., & Aupperle, L. (1991, July). A rapid hierarchical radiosity algorithm. In ACM SIGGRAPH Computer Graphics Vol. 25, No. 4, pp. 197-206. ACM.
- [Jen01] Jensen, H. W. (2001). Realistic image synthesis using photon mapping. AK Peters/CRC Press.
- [JMB07] Teng, J., Jaeger, M., Hu, B. G. (2007). A fast ambient occlusion method for real-time plant rendering. Journal of computer science and technology, Vol 22, No. 6, 859-866.
- [LS92] Li, X., Strahler, A. H. (1992). Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 30, No. 2, 276-292.
- [LWK03] Li, W., Wei, X., & Kaufman, A. (2003). Implementing lattice Boltzmann computation on graphics hardware. The Visual Computer, Vol19, No 8, 444-456.
- [Kaj86] Kajiya, J. T. (1986, August). The rendering equation. In ACM Siggraph Computer Graphics Vol. 20, No. 4, pp. 143-150. ACM.
- [Kel97] Keller, A. (1997, August). Instant radiosity. In Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. pp. 49-56. ACM.
- [KSMG 06] Hegeman, K., Premořze, S., Ashikhmin, M., Drettakis, G. (2006, March). Approximate ambient occlusion for trees. In Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games. pp. 87-92. ACM.
- [KSS02] Sloan, P. P., Kautz, J., Snyder, J. (2002, July). Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. In ACM Transactions on Graphics. Vol. 21, No. 3, pp. 527-536. ACM.
- [McG10] McGuire, M. (2010, June). Ambient occlusion volumes. In Proceedings of the Conference on High Performance Graphics. pp. 47-56. Eurographics Association.
- [MM07] Mousa, M. (soutenue le 10 Septembre 2007). Calcul efficace et direct des représentations de maillage 3D utilisant les harmoniques sphériques, thèse de doctorat université Claude Bernard LYON 1.

[SOP06] Slomp, M. P. B., Oliveira Neto, M. M. D., & Patrício, D. I. (2006). A gentle introduction to precomputed radiance transfer. *Revista de informática teórica e aplicada*. Porto Alegre. Vol. 13, No. 2, p. 131-160.

[MO95] Max, N., Ohsaki, K. (1995). Rendering trees from precomputed Z-buffer views. In *Rendering Techniques' 95*. pp. 74-81. Springer, Vienna

[NBM+14] Nowrouzezahrai, D., Baran, I., Mitchell, K., & Jarosz, W. (2014, February). Visibility Silhouettes for Semi-Analytic Spherical Integration. In *Computer Graphics Forum*. Vol. 33, No. 1, pp. 105-117.

[NRH03] Ng, R., Ramamoorthi, R., & Hanrahan, P. (2003, July). All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation. In *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 22, No. 3, pp. 376-381. ACM.

[NRH04], Ng, R., Ramamoorthi, R., Hanrahan, P. (2004). Triple product wavelet integrals for all-frequency relighting. *ACM Transactions on Graphics*. Vol 23, No. 3, pp 477-487.

[PD14] Pujades, S., Devernay, F. (2014). Interpolation de points de vue approches directe et variationnelle. In *Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA)*. France.

[PR09] Pacanowski, R. (2009). Modes de représentation pour l'éclairage en synthèse d'images, thèse de doctorat Université de Montréal.

[QNTN03] Qin, X., Nakamae, E., Tadamura, K., Nagai, Y. (2003, September). Fast Photo-Realistic Rendering of Trees in Daylight. In *Computer Graphics Forum*. Vol. 22, No. 3, pp. 243-252. Blackwell Publishing, Inc.

[RB85] Reeves, W. T., Blau, R. (1985, July). Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. In *ACM Siggraph Computer Graphics*. Vol. 19, No. 3, pp. 313-322. ACM.

[REK+11] Ritschel, T., Eisemann, E., Ha, I., Kim, J. D., & Seidel, H. P. (2011, December). Making Imperfect Shadow Maps View-Adaptive: High-Quality Global Illumination in Large Dynamic Scenes. In *Computer Graphics Forum*. Vol. 30, No. 8, pp. 2258-2269. Blackwell Publishing Ltd.

[RGK+08] Ritschel, T., Grosch, T., Kim, M. H., Seidel, H. P., Dachsbacher, C., & Kautz, J. (2008, December). Imperfect shadow maps for efficient computation of indirect illumination. In *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 27, No. 5, p. 129. ACM.

[RM10] Ribardière, M. (2010). *Simulateur pour l'étude de la visibilité dans les environnements enfumés*, thèse de doctorat, Université Rennes 1. FRANCE

[SDS95] Sillion, F., Drettakis, G., & Soler, C. (1995). A clustering algorithm for radiance calculation in general environments. In *Rendering Techniques' 95*. pp. 196-205. Springer, Vienna.

[SFW+04] Stokes, W. A., Ferwerda, J. A., Walter, B., & Greenberg, D. P. (2004, August). Perceptual illumination components: a new approach to efficient, high quality global illumination rendering. In *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 23, No. 3, pp. 742-749. ACM.

[SG08] Spanier, J., & Gelbard, E. M. (2008). *Monte Carlo principles and neutron transport problems*. Courier Corporation.

[SJ90] Strahler, A. H., Jupp, D. L. (1990). Modeling bidirectional reflectance of forests and woodlands using Boolean models and geometric optics. *Remote Sensing of Environment*, Vol.34, No 3, pp. 153-166.

[SKS02] Sloan, P. P., Kautz, J., & Snyder, J. (2002, July). Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. In *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 21, No. 3, pp. 527-536. ACM.

[Slo08] Sloan, P. P. (2008, February). Stupid spherical harmonics tricks. In *Game developers conference*. Vol. 9.

[SLS94] Schaaf, C. B., Li, X., Strahler, A. H. (1994). Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectances calculated with a geometric-optical canopy model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 6, pp.1186-1193.

[Tim12] Timonen, V. (2012, December). Low-Complexity Intervisibility in Height Fields. In *Computer Graphics Forum*. Vol. 31, No. 8, pp. 2348-2362. Blackwell Publishing Ltd.

[VG97] Veach, E., & Guibas, L. J. (1997, August). Metropolis light transport. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. pp. 65-76. ACM.

[WKB+02] Wald, I., Kollig, T., Benthin, C., Keller, A., & Slusallek, P. (2002). Interactive global illumination. In Proc. of Eurographics Symposium on Rendering, pp. 9-20.

[WM+05] Willmott, C. J., Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, Vol. 30, No. 1, pp.79-82.

[WSS+04] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, Vol. 13, No. 4, pp. 600-612.

[WLM+04] Wei, X., Li, W., Mueller, K., & Kaufman, A. E. (2004). The Lattice-Boltzmann method for simulating gaseous phenomena. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 10, No. 2, pp.164-176.

[WRC88] Ward, G. J., Rubinstein, F. M., & Clear, R. D. (1988). A ray tracing solution for diffuse interreflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 22, No4, pp. 85-92.

[Yu09] Yu, I., Cox, A., Kim, M. H., Ritschel, T., Grosch, T., Dachsbacher, C., Kautz, J. (2009). Perceptual influence of approximate visibility in indirect illumination. *ACM Transactions on Applied Perception*. Vol.6, No. 4, p24.

[Zh98] Zhukov, S., Iones, A., Kronin, G. (1998). An ambient light illumination model. In *Rendering Techniques' 98*. pp. 45-55. Springer, Vienna.