

UN MODELE POUR L'ILLUMINATION ANALYTIQUE ET HIERARCHIQUE DES CONIFERES

Hattab Dalila

Département d'Informatique, Université Mohamed Khider de Biskra
dalila_hattab@yahoo.fr

Babahenini Mohamed Chaouki

Département d'Informatique, Université Mohamed Khider de Biskra
babahenini@wissal.dz

Djedi Noureddine

Département d'Informatique, Université Mohamed Khider de Biskra
djedi_nour@yahoo.fr

Résumé

L'étude des paysages pose la problématique de la complexité des scènes naturelles. Les outils de modélisation existant permettent de modéliser de manière réaliste des espèces et des formes variées d'arbres et de reliefs, mais cela se fait au prix de milliers, voire de millions de polygones. Le rendu de paysages nécessite souvent des milliers d'arbres ce qui rend le traitement de ces données très difficile : coût de traitement et aliassage sont les deux principaux problèmes qui en découlent.

Dans cet article, nous allons présenter les différents modèles traitant la complexité en synthèse d'images, puis nous prenons comme scène complexe un paysage de conifères où nous essayons d'exploiter les connaissances disponibles à priori sur la dispersion de l'information et de la hiérarchie naturelle des arbres, pour présenter un modèle d'illumination analytique et hiérarchique pour le rendu de cette scène. Le modèle de rendu utilisé est un rendu multi-échelle puisque c'est en fonction de la distance entre l'arbre et l'observateur qu'on choisit le modèle approprié qui peut être le modèle aiguille ou le modèle cône d'aiguilles ou le modèle rameau. Dans ce modèle de rendu, nous séparons la forme du comportement vis à vis de la lumière (le modèle d'illumination).

Mots clés: Aspect hiérarchique, Complexité, Les conifères, Lancer de cône, L-Système, Modèles d'illumination, Niveau de détails, Rendu multi-échelle, Synthèse de paysage.

1. INTRODUCTION

La complexité d'une scène d'extérieur pose de nombreux problèmes de modélisation et de rendu. Plus exactement, le problème se pose pour les objets dont la surface n'est pas vraiment définie, comme les arbres, ce qui rend les parties internes de leur feuillage potentiellement visibles et éclairées. De plus le rendu de ce type de scène est extrêmement coûteux et très sujet au phénomène d'aliasage. Nous allons présenter un modèle d'illumination analytique et hiérarchique dédié au rendu d'une forêt de conifères. Ce modèle exploite les connaissances disponibles a priori sur la dispersion de l'information dans la scène, et s'inspire de la hiérarchie naturelle des arbres pour son intégration lors du processus de modélisation et de rendu le long de chaque arbre. Nous utilisons en plus une représentation multi-échelle afin de prendre en charge les objets dont la taille est inférieure à la taille du pixel d'un côté et de minimiser le temps de calcul d'un autre côté.

2. TRAVAUX ANTERIEURS DEDIES A LA COMPLEXITE EN SYNTHESE D'IMAGES

La complexité a été prise en charge par plusieurs techniques, la plus célèbre à base de polygones par la simplification de maillage mais cette méthode nécessite un temps de calcul important et un espace mémoire très grand pour préserver la grande quantité d'informations qui est utilisée lors du rendu. Récemment, de nouvelles méthodes sont apparues qui ne font pas référence aux polygones et qui ont pu donner des résultats très satisfaisants du point de vue réalisme et rapidité. Un autre paramètre entre en jeu ; c'est l'aspect : multi-échelle qui consiste à utiliser plusieurs représentations d'un objet de moins en moins complexes en nombre de primitives au fur et à mesure que l'objet s'éloigne ou perd de son importance dans la scène. Ce paramètre permet de mesurer le degré de la complexité de la scène. Ces modèles peuvent être classés en deux grandes classes, les modèles traitant la complexité microscopique et ceux traitant la complexité macroscopique.

2.1 Complexité microscopique

On essaye toujours d'enrichir l'apparence visuelle des surfaces, par exemple en représentant la rugosité pour une surface granuleuse représentée par des milliards de polygones. Cette tâche est pratiquement impossible, pour les volumes, si on veut représenter les milieux participatifs tel que les nuages ou les milieux denses en géométrie comme les poils d'une fourrure. Pour ceci, nous devons chercher d'autres méthodes qui seront utilisées dès que :

- La géométrie est trop complexe au point qu'il ne soit plus raisonnable de la représenter explicitement.
- Le phénomène n'a pas de surface définie.

Ces méthodes peuvent être regroupées en deux catégories [6], l'une est destinée aux surfaces et l'autre aux volumes. Dans la première catégorie, on trouve le modèle de Phong, qui est le modèle de base de l'illumination, le modèle analytique anisotrope de Poulin, la BRDF [14](la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle, BRTF [5,7,27](la fonction bidirectionnelle de transmittance) et un modèle à base de texture, qui simule les différents matériaux et les variations de rugosité d'une plaque de métal, tout en utilisant un unique polygone. Une autre approche à base de texture, a été introduite par Dana en 1999[6,20], qu'est la fonction bidirectionnelle de texture (BTF) son principe consiste à reconstruire la fonction de réflectance à partir d'une séquence d'images de surfaces réelles photographiées sous toutes les conditions associées à des techniques de traitement d'images.

Il n'est pas possible de simuler l'illumination de gaz (nuages, brouillard,.....), en représentant explicitement les millions de particules qui le composent, même si une discrétisation grossière peut être utilisée à grande échelle (grille volumique). Pour un volume, on intègre un modèle d'illumination simple au sens mathématique du terme sur toute la géométrie du volume, en tenant compte de la visibilité et de l'auto ombrage qui sont très importants. Parmi les modèles volumiques, le modèle de Blinn qui introduit un modèle d'illumination basé sur une distribution de particules [18]. Un autre modèle dédié à la fourrure a été présenté par Kajiya et Kay [17], il utilise un modèle d'illumination cylindrique.

2.2 Complexité macroscopique

Pour une surface simple, le modèle d'illumination peut être associé à un polygone mais pour représenter des phénomènes plus complexes (fourrure, arbre,....), il faut être capable d'en décrire l'apparence. Pour les objets volumiques (nuages) ou quasi-volumiques (fourrure, feuillage, herbe sur prairie) les polygones ne conviennent pas à leur représentation. Pour ceci, il existe une série de représentations plus ou moins spécialisées, que nous qualifierons d'alternatives [1] et qui traitent la complexité d'une manière différente sans recourir nécessairement aux polygones. L'idée est de construire des représentations géométriques minimales selon des critères purement visuels d'où la qualification d'approche impressionniste. Puisque, il n'est pas toujours facile de généraliser cette représentation, pour ceci, on essaye de se limiter dans une catégorie bien définie d'objets.

Afin d'exploiter les connaissances disponibles a priori sur ces objets et faire les simplifications possibles. La première représentation alternative, est le rendu à base de points [21,24,25] ce modèle est basé sur la notion de surfels "élément de surface", qui constituent une approche forte et très efficace pour représenter les objets complexes d'une manière interactive (figure 1).

Contrairement aux méthodes classiques à base de maillage, les surfels sont considérés comme des points sans une connectivité explicite. A cause de cette indépendance des éléments, ce modèle peut être pipeliné, plusieurs modèles ont été développés sous cette approche, tel que le modèle de Adamson et Alexa [25] et le modèle de Stamminger [13].

Dans l'esprit que certains phénomènes sont trop complexes pour être représentés explicitement en détails (avec beaucoup de polygones), on se réfère à des techniques de rendu à base d'images [Image Based Rendering : IBR], qui est dite représentation réelle [23] ou à la synthèse des différentes vues de l'objet et spécialement les champs de la lumière. Parmi ces modèles, on cite le Billboard [6,10] qui est un polygone recouvert par une texture, représentant par exemple un arbre, que le moteur de rendu oriente toujours vers l'observateur (figure 2). Cette représentation qui est très utilisée dans les applications temps réel, comme les simulateurs ou les jeux vidéos, où l'utilisateur exige beaucoup de réalisme dans un temps réduit. Pour pouvoir reconstruire l'image d'un objet depuis n'importe quel point de vue, Bishop en 1995 [6,22] a introduit les fonctions plénoptiques. Ces fonctions sont à l'origine de deux techniques très connues se basant sur la représentation du champ de lumière (Light Field ou LumiGraph) [26]. Cette méthode est déconseillée dans le cas du rendu de centaines d'objets tel que une forêt.



Figure 1: Quelques images générées par le modèle de rendu à base de points.

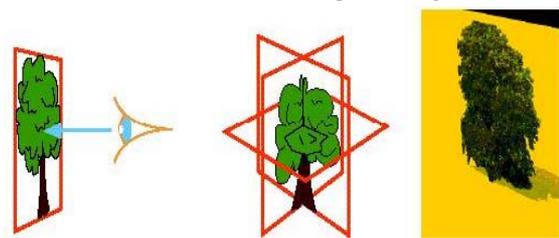


Figure 2: Technique des Billboards classiques.

En 1998, Shade introduit la méthode de Layer Depth Images (LDI) [6,11], qui utilise plusieurs images et leur tampon de profondeur associé. Cette méthode offre une meilleure parallaxe que les techniques vues précédemment et avec moins de données, mais elle ne correspond pas à une application temps réel d'une scène complexe et ne permet pas de changer l'éclairage une fois précisé. Pour prendre en charge les scènes complexes qui ont un aspect trop répétitif, tels que la fourrure d'un animal, une forêt sur une colline, Kajiya et Kay [1,17] ont développé une représentation à base de texture en 1989, c'est le modèle des textures volumiques. Son principe consiste à fabriquer un échantillon de texture volumique, en l'occurrence un échantillon de fourrure, lequel est stocké en un seul exemplaire dans un volume de référence dont les copies déformées appelées texels seront mappées sur une surface sous jacente, constituant ainsi une peau épaisse continue à la surface d'un objet. Le volume de référence est constitué de voxels où chaque voxel contient formellement trois informations : une densité qui représente la présence, un ensemble de trois vecteurs donnant l'orientation locale de la surface et une fonction indiquant comment la lumière se réfléchit. Ce modèle spécifique pour la fourrure a été généralisé par Fabrice Neyret en 1998 [1,2,19]. On peut dire que l'efficacité de ce modèle provient, d'une part du caractère minimal de la représentation et d'autre part, de la structuration qu'elle apporte aux données, les voxels étant ordonnés dans le volume et le mappage des volumes étant lui-même ordonné sur la surface.

La dernière classe de modèle traitant la complexité d'une scène, en utilisant le pont Réflectance-Forme. En 1997, Fabrice Neyret [1] a étudié deux types d'objets, qui sont les nuages (volume de gouttelettes) et les touffes d'aiguilles (volume de cylindres de distribution continue). Pour la première, il a dérivé une formule analytique simple simulant la réflexion de la lumière par une petite couche de volume sous la surface. Tandis que pour la seconde, il a développé un modèle qui détermine une forme simple ayant la même distribution de normales qu'une forme complexe axisymétrique.

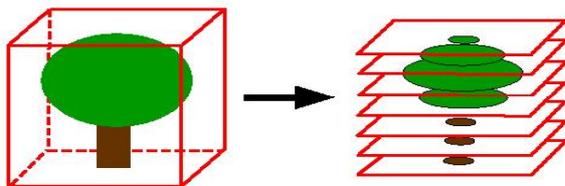


Figure 3 : Le volume de référence des textures volumiques temps réel (une suite de couches polygonales).



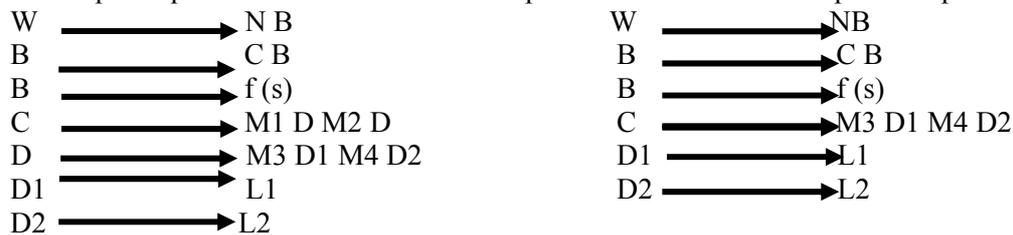
Figure 4 : Quelques étapes de la construction des textures bidirectionnelles.

3. MODELISATION DU RELIEF ET DES ARBRES

Après avoir présenter les différents modèles en synthèse d'images qui traitent la complexité posée au niveau d'une scène, nous passons à la construction de notre scène qui commence par la modélisation puis le rendu.

Plusieurs méthodes existent pour la modélisation d'un arbre, tel que la classe issue de la géométrie classique, la classe des modèles botaniques et la classe des modèles à base de réécriture. C'est dans cette dernière classe que se trouve le modèle choisi qui est le L-System [15,31], son aspect fort est au niveau de la grammaire.

Notre étude porte sur les conifères, nous devons modéliser des arbres de pins ce qui nous conduisons à créer deux grammaires spécifiques l'une offre un modèle simplifié et l'autre un modèle plus complexe (figure 5).



La désignation des symboles utilisés dans la grammaire.

Les symboles terminaux : $V_t = \{N, M1, M2, L1, L2, M3, M4, f(s)\}$

Les symboles non terminaux : $V_n = \{B, C, D, D1, D2\}$

N: tracer le tronc de l'arbre;

M1: tracer la branche secondaire d'ordre 1;

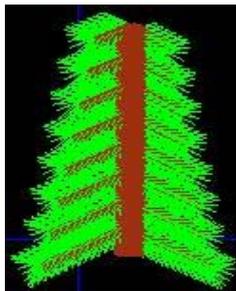
M2: tracer la branche secondaire d'ordre 1 qui est symétrique à la branche précédente (M1);

M3: tracer la branche secondaire d'ordre 2;

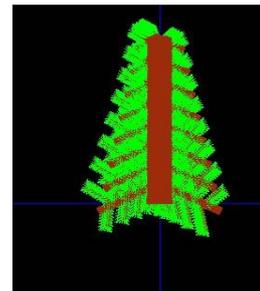
M4: tracer la branche secondaire d'ordre 2 qui est symétrique à la branche précédente (M3);

L1: tracer les cônes d'aiguilles le long de la branche spécifiée;

L2: tracer les cônes d'aiguilles le long de la branche symétrique à la branche support de (L1);



Modèle simple d'arbre.



Modèle complexe d'arbre.

Figure 5: Les deux modèles d'arbre proposés.

Pour le relief nous avons utilisé une méthode à base de fractal [15, 28, 33], qui se base sur un processus de subdivision récursive où à chaque itération nous appliquons une perturbation sur les nouveaux sommets générés.

Le processus de perturbation utilisé est: Float epsilon (int n)

```
{
    Float r;
    r = (double) (rand ()) / RAND_MAX;
    Return (r*spike*n)/count;
}
```

Où spike=0.05+0.1*rand ()/RAND_MAX;

count est le niveau de subdivision voulu.

4. MODELE D'ILLUMINATION ANALYTIQUE ET HIERARCHIQUE DEDIE AUX CONIFERES

4.1 Principes de base

4.1.1 Niveaux de détails: Au fur et à mesure que l'on s'éloigne d'un arbre, on ne discerne plus les différentes parties, on commence par ne plus distinguer les feuilles, les rameaux puis les branches se mélangent, et pour finir, seule la silhouette de l'arbre reste visible[4,6]. Ceci ne veut pas dire qu'il faut supprimer les détails fins pour résoudre le problème, même ces détails ont un rôle important dans le réalisme de la scène synthétisée. On a deux représentations possibles pour les niveaux de détails, la première est le maillage, qui ne convient pas dans ce cas et la deuxième s'inspire de la hiérarchie naturelle de l'arbre car les feuilles se répètent autour d'un tronc pour former une branche secondaire, plusieurs branches secondaires se répètent pour former une branche principale et plusieurs branches principales forment l'arbre complet. De plus deux branches d'une même famille d'arbres sont assez similaires. Il est même possible d'étendre cette notion de répétition aux paysages puisque deux arbres d'une même famille sont assez semblables (figure 6).

Ce principe de hiérarchie répétitive peut nous aider pour la construction de niveaux de détails, sur deux points:

1. La hiérarchie naturelle de l'arbre guidera la hiérarchie de nos niveaux de détails ;

2. Les structures répétées pourront être factorisées et instanciées, ce qui permet de diminuer le coût mémoire. Pour éviter les effets répétitifs, il suffit souvent de changer l'orientation et la taille des objets.

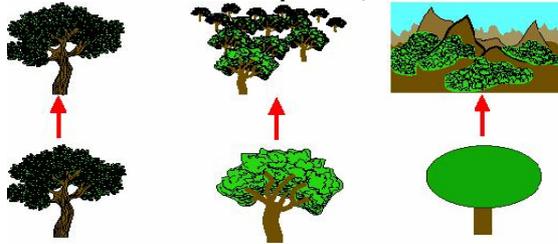


Figure 6: Les différents niveaux de détails de l'arbre.

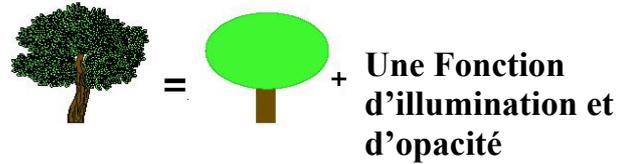


Figure 7: La relation forme et illumination.

4.1.2 Forme et l'illumination: Le détail d'un ensemble de primitives (une branche ou un arbre) n'est pas visible explicitement lorsque l'observateur est loin (lorsque l'ensemble des primitives ne recouvrent que quelques dizaines de pixels de l'image ou moins). Seule la forme et la couleur de l'ensemble sont alors distinguées. L'idée présentée est de représenter ce groupe de primitives par sa forme, associée à une formule analytique décrivant son comportement photométrique et son opacité globale, c'est-à-dire par un modèle d'illumination (shader). Ce shader est obtenu en intégrant un modèle d'illumination simple (celui de Phong) sur l'ensemble des primitives du groupe en tenant compte de la visibilité, et en calculant leur opacité moyenne (figure 7).

4.1.3 Hiérarchie: Le calcul de l'intégrale du modèle d'illumination sur les primitives n'est réalisable, que si une connaissance à priori forte existe sur l'agencement des primitives. Si nous essayons de calculer l'intégrale analytique de la fonction de Phong sur un arbre entier, il est probable que le calcul ne soit pas réalisable (la géométrie trop complexe d'un arbre ne pourra se traduire par une modélisation mathématique raisonnable pour les calculs). En revanche, nous pouvons procéder par étapes tous en construisant les niveaux de détails. Nous commençons par l'ensemble de ses primitives (en fixant une géométrie simple des feuilles) [6, 16, 23]. En utilisant ce résultat, nous calculons le shader I_{arbre} d'un arbre entier, en calculant l'intégrale de I_{branche} sur l'ensemble des branches (figure 8).

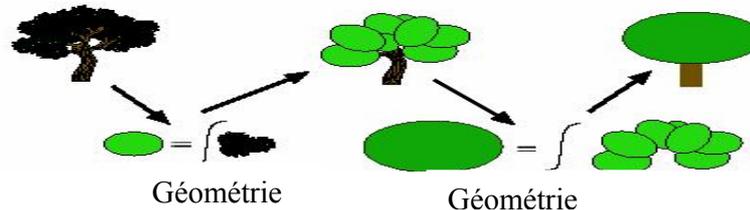


Figure 8: Le principe de l'intégration de l'illumination au niveau de l'arbre.

4.1.4 Considérations liées au rendu: On va essayer de simplifier le processus de rendu en profitant des niveaux de détails, pour ceci nous avons choisi un algorithme de rendu qui minimise énormément l'effet d'aliasage. C'est le lancer de faisceau conique (le cone tracing) [29, 30] qui offre les caractéristiques suivantes:

- Le calcul global de la couleur du pixel est: $C_{\text{pixel}} = a_A \cdot \alpha_A \cdot C_A + (1 - a_A \cdot \alpha_A) * a_B \cdot \alpha_B \cdot C_B + \dots$ avec a_A le pourcentage de recouvrement du pixel par l'objet A et α_A l'opacité de l'objet A ;
- Le calcul du pourcentage de recouvrement ne tient pas compte de la répartition géométrique des objets dans le pixel. Néanmoins cette approximation est valide si les objets sont distribués uniformément dans l'espace, du moins sans corrélation (ce qui est le cas des arbres).

Une autre tâche doit être bien choisie lors du rendu, c'est le choix du niveau de détail approprié, qui doit avoir une résolution légèrement inférieure à la taille d'un pixel une fois qu'il est projeté à l'écran. La résolution ne doit pas être trop fine, sinon elle perd l'avantage de l'utilisation du niveau de détails, et ne doit pas être trop grossière, ce qui donne un objet uniforme. Ce choix est en fonction de la taille de la primitive à l'écran, qui dépend de la distance entre l'objet et l'observateur. Le fonctionnement de cet algorithme peut être résumer comme suit:

Pour (chaque pixel de la fenêtre d'affichage) **Faire Début**

- Lancer le rayon conique primaire associé à ce pixel.
- Englober tous les arbres de la scène par une sphère, pour faciliter le calcul de l'intersection et minimiser le temps de recherche des objets intersectés.
- Chercher la liste des objets intersectés par le rayon conique primaire.

Si (la liste des objets intersectés est vide) **Alors** couleur du pixel ← couleur du fond.

Sinon début Pour (chaque objet de la liste) **Faire début**

Val ← calculer la distance séparant l'observateur (l'origine du rayon conique) et l'objet intersecté.

Si (val < lim1) **Alors** calculer la couleur de cette portion de surface retenue par le rayon conique en utilisant le modèle 1 (modèle feuille).

Si (lim1 < val < lim2) **Alors** calculer la couleur de cette portion de surface retenue par le rayon conique en utilisant le modèle 2 (modèle cône d'aiguilles).

Si (val > lim2) **Alors** calculer la couleur de cette portion de surface retenue par le rayon conique en utilisant le modèle 3 (modèle rameau)

//Les valeurs lim1 et lim2 précisent le niveau de détails approprié à chaque arbre en fonction de sa position par rapport à l'observateur.

Fin.

Fin.

Fin.

4.2 Calcul du modèle d'illumination analytique et hiérarchique pour les conifères

Une fois l'arbre modélisé, nous pouvons déduire les conclusions suivantes, comme la montre la figure (9):

1. Les branches sont représentées par des cylindres ;
2. Les aiguilles sont des cylindres de longueur (l) et de rayon (r) et de densité (distribution) ρ et qui font un angle ϕ avec la branche. Puisque ces paramètres changent peu le long de la branche, alors on peut les considérés comme constants ;
3. La projection d'une aiguille sur le plan perpendiculaire à la branche est de $R = l \cdot \sin(\phi)$;
4. Etant donné que les aiguilles sont distribuées en cône, avec N aiguilles par cône. La distance entre deux cônes le long de la branche est de dh . L'espacement entre deux aiguilles est de $\frac{2\pi R}{N}$;
5. Comme l'espace entre deux cônes est dh , il est raisonnable de choisir $dh = \frac{2\pi R}{N} = \sqrt{\rho}$ alors $\frac{dh * 2\pi R}{N} = \rho$;
6. L'opacité d'un cône d'aiguilles est donnée par la formule suivante: $A = \frac{2Nr}{\pi R}$.

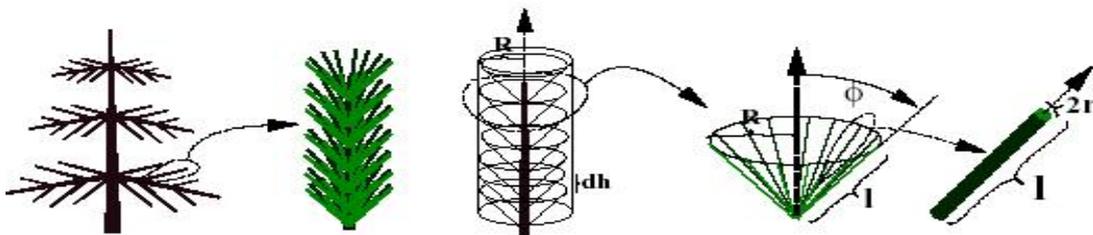


Figure 9: La description hiérarchique de l'arbre.

La présentation de chaque modèle de la hiérarchie est faite en deux phases, l'une expose le principe du modèle et l'autre permet de suivre le processus de calcul utilisé.

3.2.1 Shader analytique d'une aiguille

a) Principe: L'aiguille est la plus simple primitive utilisée, elle est représentée par un cylindre. Pour calculer l'illumination d'une aiguille, nous devons intégrer la lumière diffuse I_d et spéculaire I_s reflétées par le cylindre. Nous ne calculons jamais explicitement l'intersection entre une aiguille et le rayon conique, mais on calcul l'intersection du rayon avec le cône d'aiguilles. Nous considérons que les aiguilles visibles sont sur la partie avant du cône, puis nous sommes les illuminations.

b) Processus de calcul: L'aiguille est un cylindre où on va appliquer le modèle de Phong, on doit alors intégrer les composantes diffuse et spéculaire d'un cylindre dans l'espace écran (nous devons sommer cette contribution dans le pixel en tenant compte de l'opacité). Pour calculer l'illumination de cette aiguille, nous devons calculer la réflectance diffuse, spéculaire et l'opacité.

La réflectance diffuse: La réflectance diffuse d'une aiguille depuis la position de l'observateur est donnée par l'équation suivante:

$$R_d^{cyl} = \frac{\int_{pixel} (N.L) I_{(N.L>0)} dS_{pix}}{\int_{pixel} dS_{pix}} = \frac{\int_{cylindre} (N.L) I_{(N.L>0)} \cdot (N.V) I_{(N.V>0)} dS}{\int_{cylindre} (N.V) I_{(N.V>0)} dS} \quad \text{Equation (1)}$$

Nous définissons les paramètres suivants:

- c_l et c_v les projections de \vec{L} et \vec{V} sur l'axe du cylindre (a), où $c_l = (\vec{a}.L)$ et $c_v = (\vec{a}.V)$;
- V_p et L_p les projections de \vec{V} et \vec{L} sur le plan perpendiculaire au cylindre et s_v et s_l leur norme. α_v et α_l sont les angles entre V_p et L_p dans le plan ;
- α_0 et α_1 sont les bornes de la visibilité qui sont définies comme suit : $\alpha_0 = \alpha_v - \frac{\pi}{2}$ et $\alpha_1 = \alpha_l + \frac{\pi}{2}$ Si la direction du produit vectoriel des deux vecteurs \vec{L} et \vec{V} a la même direction que \vec{a} (l'axe de l'aiguille). Sinon $\alpha_0 = \alpha_l - \frac{\pi}{2}$ et $\alpha_1 = \alpha_v + \frac{\pi}{2}$;
- En posant $\Delta\alpha = |\alpha_v - \alpha_l|$;

En développant cet intégrale dans les bornes de visibilité, la réflectance de l'aiguille sera donnée comme suit :

$$R_d^{cyl} = \frac{S_l}{4} (\sin(\Delta\alpha) + (\pi - \Delta\alpha) \cos(\Delta\alpha)) \quad \text{Equation (2)}$$

La réflectance spéculaire: La réflectance spéculaire de l'aiguille depuis le point de vue est donnée par l'équation suivante:

$$R_s^{cyl} = \frac{\int_{pixel} (N.H)^n I_{(N.H>0)} ds_{pix}}{\int_{pixel} 1 ds_{pix}} = \frac{\int_{cylindre} (N.H)^n I_{(N.H>0)} \cdot (N.V) I_{(N.V>0)} ds}{\int_{cylindre} (N.V) I_{(N.V>0)} ds} \quad \text{Equation (3)}$$

Où :

- $H = \frac{V+L}{|V+L|}$ et n est l'exposant de spécularité. H_p la projection perpendiculaire de \vec{H} sur le plan perpendiculaire à l'aiguille. c_H et la projection de \vec{H} sur l'axe du cylindre et s_H sa norme, α_H est l'angle entre V_p et H_p dans le plan ;
- α_0 et α_1 sont les bornes de la visibilité qui sont définies comme suit : $\alpha_0 = \alpha_v - \frac{\pi}{2}$ et $\alpha_1 = \alpha_H + \frac{\pi}{2}$ Si la direction du produit vectoriel des deux vecteurs \vec{H} et \vec{V} a la même direction que a (l'axe de l'aiguille). Sinon $\alpha_0 = \alpha_H - \frac{\pi}{2}$ et $\alpha_1 = \alpha_v + \frac{\pi}{2}$.

En développant l'intégrale dans les bornes de la visibilité définis et en utilisant les deux approximations suivantes :

1. $\cos^n(x) = \frac{-n}{2} x^2$ pour n très grand ce qui est le cas ici puisque les aiguilles n'ont pas une forte caractéristique spéculaire.
2. $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\sigma})^2} = \sqrt{2\pi}\sigma$.

La réflectance spéculaire de l'aiguille est donnée comme suit: $R_s^{cyl} \approx \frac{1}{2} s_h^n \cos(\alpha_H - \alpha_v) \sqrt{\frac{2\pi}{n}}$ Equation (4)

L'opacité: L'opacité est la proportion du rectangle de l'aiguille apparent qui se projette dans le pixel. Si l'aiguille est totalement couverte par le pixel l'opacité est donnée par la relation suivante:

$$alpha^{cyl} = \frac{2r \cdot s_v l}{S_{pix}} \quad \text{Equation (5)}$$

Où S_{pix} est la surface de la section du rayon conique à la distance de la primitive.

L'illumination diffuse et spéculaire de l'aiguille vaut donc: $I_d = alpha R_d$ et $I_s = alpha R_s$,

4.2.2 Shader analytique d'un cône d'aiguilles

a) Principe: Pour calculer l'illumination d'un cône d'aiguilles, on va se servir de la loi des grands nombres, pour dire que cette illumination est équivalente à l'illumination d'un cône semi-opaque continu où chaque point reflète la lumière comme une aiguille entière le ferait. L'opacité d'un cône d'aiguilles est la moyenne de la surface du cône

couverte par les aiguilles (A). L'illumination totale réfléchie est "A" multipliée par l'intégrale dans l'espace des pixels de l'illumination d'un cylindre sur la partie visible du cône.

Les parties avant et arrière du cône sont considérées séparément et seule une portion de cette partie peut être visible dans un pixel. Cette approximation n'est pas facile et nécessite quelques approximations.

b) Processus de calcul: Puisqu'on considère qu'un cône d'aiguilles est une surface continue semi-opaque d'opacité 'A' où chaque point de la surface a une réflexion identique à celle d'un cylindre (aiguille, nous devons donc intégrer l'illumination d'un cylindre sur un cône d'ouverture (ϕ) pour tous les axes (a_0) d'aiguilles valides (visibles). Pour cela, on va redéfinir les deux vecteurs L et V dans un repère associé au cône qui est mesuré dans le système de coordonnées polaires associé au cône, où $L = (\theta_L, \phi_L)$ et $V = (\theta_V, \phi_V)$ avec ϕ_L l'angle compris entre le vecteur \vec{L} et l'axe du cône (\vec{a}_c) et ϕ_V l'angle compris entre \vec{V} et l'axe du cône (\vec{a}_c).

B.1) L'illumination diffuse: Etant donné qu'on va intégrer uniquement les aiguilles visibles qui peuvent être sur l'une des deux parties, avant ou arrière, l'illumination diffuse du cône d'aiguilles peut être donnée par la formule

$$\text{suivante: } I_d^{cone} = A \int_{\theta=\theta_V-\frac{\pi}{2}}^{\theta_V+\frac{\pi}{2}} l_{sV} R_d^{cyl}(\alpha_\theta) d\theta \quad \text{Equation (6)}$$

En effectuons quelques simplifications d'une part, et de l'autre part, nous utilisons MAPLE[6, 9] pour tracer la fonction de transformer de Fourier pour délimiter l'intégrale. L'illumination diffuse d'un cône d'aiguilles est

$$\text{donnée par l'équation suivante : } I_d^{cone} = \frac{l.A}{4} (\pi(L.V - \lambda_0) - 2\lambda_1 \cos(\theta_V - \theta_\Sigma)) \quad \text{Equation (7)}$$

Où :

- $A_L = \max(\phi_L, \phi)$ $B_L = \min(\phi_L, \phi)$ et $A_V = \max(\phi_V, \phi)$ $B_V = \min(\phi_V, \phi)$;
- soit \widehat{AL} l'angle entre les deux vecteurs (\vec{a}) (l'axe de l'aiguille) et \vec{L} , et \widehat{AV} l'angle compris entre les deux vecteurs (\vec{a}) et \vec{V} ;
- $A_\Sigma = A_L + A_V$ et $B_\Sigma = B_L + B_V$ et $\widehat{AL} + \widehat{AV} = A_\Sigma + B_\Sigma \cos(\theta - \theta_\Sigma)$.
- $M = \cos(A_\Sigma - B_\Sigma)$ et $m = \cos(A_\Sigma + B_\Sigma)$ où $\theta_m = \theta_\Sigma$
- Si $((A_\Sigma + B_\Sigma) \& \& (A_\Sigma - B_\Sigma) \in [0, \pi])$ Alors $\lambda_2 = 0$
- Si $(A_\Sigma - B_\Sigma) < \pi < (A_\Sigma + B_\Sigma)$ (il y'a un croisement avec π) Alors $\lambda_2 = \frac{\lambda_1 B_\Sigma}{4(2\pi - A_\Sigma)}$
- $\lambda_1 = \frac{m - M}{2}$ et $\lambda_0 = \frac{m + M}{2} - \lambda_2$
- $\cos(\theta_V - \theta_\Sigma) = \frac{B_L \cos(\Delta\theta) + B_V}{\sqrt{B_L^2 + B_V^2 + 2B_L B_V \cos(\Delta\alpha)}}$ et $\Delta\theta = \theta_L - \theta_V$

B.2 L'illumination spéculaire: L'illumination spéculaire d'un cône d'aiguilles est donnée par l'équation suivante:

$$I_s^{cone} = A \int_{\theta=\theta_V-\frac{\pi}{2}}^{\theta_V+\frac{\pi}{2}} l_{sV} R_s^{cyl}(\alpha_\theta) d\theta = \frac{l.A}{2} \sqrt{\frac{2\pi}{n}} \int_{\theta=\theta_V-\frac{\pi}{2}}^{\theta_V+\frac{\pi}{2}} s_l s_h^n \cos(\alpha_H - \alpha_V) d\theta \quad \text{Equation (8)}$$

En développant cet intégrale dans les limites de visibilité du cône, l'illumination spéculaire est donnée par

$$\text{l'équation (9): } I_s^{cone} \approx \frac{l.A}{2} \frac{2\pi}{n} (V.H)\varepsilon \quad \text{Equation (9)}$$

Où:

- Si $(\phi_H \in [\frac{\pi}{2} - \phi, \frac{\pi}{2} + \phi])$ Alors $\varepsilon = 1$ Sinon $\varepsilon = 0$;
- Si $(\phi$ est très petite de tel sorte que les deux bornes de l'intervalle de visibilité $\frac{\pi}{2} - \phi$ et $\frac{\pi}{2} + \phi$ apparaissent sur la même face (avant ou arrière)) Alors $\varepsilon = 2$.

B.3 L'opacité: L'opacité d'un cône d'aiguilles est donnée par l'équation suivante:

$$\alpha^{cone} = A \int_{\theta = \theta_v - \frac{\pi}{2}}^{\theta_v + \frac{\pi}{2}} l \cdot s_v d\theta \quad \text{Equation (10)}$$

Comme $s_v = \sin(A\hat{V})$, nous pouvons alors approcher la valeur $A\hat{V} = A_v + B_v \cos(\theta - \theta_v)$. Alors la formule de l'opacité est simplifiée à la forme suivante:

$$\alpha^{cone} = l \cdot A(\pi \cos(\phi) \cos(\phi_v) - 2 \sin(\phi) \sin(\phi_v)) \quad \text{Equation (11)}$$

4.2.3 Shader analytique d'un rameau d'aiguilles

a) Principe: Nous considérons que le shader d'un rameau d'aiguilles est équivalent à un cylindre volumique, anisotrope et semi opaque, fait d'une imbrication de cônes. L'illumination et l'opacité de la partie avant et arrière du cône correspondent à celles du deuxième niveau que nous avons vu précédemment. En appliquant la loi des grands nombres, le volume est considéré comme continu et anisotrope: l'opacité doit reproduire le même effet que celui produit par tous les cônes traversés par un rayon si le rendu se faisait avec le niveau (2), ce qui dépend fortement de l'angle du rayon (figure 10). La partie difficile est l'intégration volumique analytique, en tenant compte de la visibilité et l'ombrage. En supposant que l'on puisse utiliser une approximation linéaire de la loi de composition des opacités, c.à.d: $(1 - A)^n \approx (1 - nA)$ qui est valide pour les opacités faibles, nous transformeront cette intégrale en une forme géométrique.

b) Processus de calcul: Nous considérons qu'un rameau d'aiguilles est un volume ayant une forme de cylindre et une opacité anisotrope. Pour calculer le shader analytique d'un tel objet, nous devons calculer analytiquement un rendu volumique du cylindre, qui est donné par l'équation suivante :

$$I = \frac{1}{S_{pix}} \int_{(x,y) \in pixel} \int_{z=proche}^{loin} A I^{cyl} e^{-\int_0^{l_z} \sigma} e^{-\int_0^{l_{ombrage}} \sigma} \quad \text{Equation (12)}$$

Où:

- $e^{-\sigma} = T = (1 - A)$ la transparence anisotrope ;
- (l_z) la longueur du rayon dans le volume ;
- $l_{ombrage}$ la longueur du rayon d'ombrage dans le volume.

L'opacité 'A' n'est pas constante le long du branche parce que elle dépend de l'orientation du rayon lors de l'intersection avec la branche. Ceci influe directement sur le nombre d'intersection moyen du rayon avec le volume. Le même principe est fait pour le rayon d'ombrage.

Pour calculer l'intégral de l'équation (12), nous procédons par simplification en commençant par le cas 2D puis nous passons au 3D.

b.1) Traversée d'un rameau d'aiguilles en 2D: Afin de calculer l'illumination d'un rameau, on prend une branche infinie avec un empilement d'aiguilles ayant une direction (ϕ) relativement à l'axe de la branche. Soit R le rayon de la branche est dh la distance verticale entre deux cônes d'aiguilles.

Soit un rayon traversant la branche, faisant un angle (ϕ_r) avec l'axe de celle-ci, alors on peut déduire que:

- La longueur du rayon à l'intérieur de la branche est : $\frac{R}{\sin(\phi_r)}$;
- Les distances entre les intersections sont : $\delta = \frac{dh \sin(\phi)}{\sin(|\phi_r - \phi|)}$;
- Le nombre moyen d'intersections est : $\frac{R \sin(|\phi_r - \phi|)}{dh \sin(\phi) \sin(\phi_r)}$;
- Posons $K(\phi_r, \phi) = \frac{\sin(|\phi_r - \phi|)}{\sin(\phi) \sin(\phi_r)} = \left| \frac{1}{\tan(\phi)} - \frac{1}{\tan(\phi_r)} \right|$ alors $K_r = K(\phi_r, \phi)$ et $\bar{K}_r = K(\phi_r, \pi - \phi)$ qui correspond à la traversée d'une branche ayant une symétrie axiale ;
- L'opacité de la branche le long du rayon est : $1 - T^{\frac{R}{dh} K(\phi_r, \phi)}$.

Puisqu'un rameau d'aiguilles 2D est composé de deux champs d'aiguilles différents, celui de droite ayant pour orientation d'aiguilles (ϕ) et celui de gauche ($\pi - \phi$), (figure 10). En utilisant les notations énoncées précédemment, on peut déduire que le nombre total d'intersections le long du rayon est donné comme suit:

$$\frac{R}{dh} (K_r + \bar{K}_r) = \frac{R}{dh} \frac{\sin(\phi_r - \phi) + \sin(|\phi_r + \phi|)}{\sin(\phi) \sin(\phi_r)} = \frac{R}{dh} \times \frac{2}{\tan(\min(\phi, \phi_r))} \quad \text{Equation (13)}$$

Ce qui signifie que pour un rayon restant dans l'ouverture du cône d'aiguilles, l'opacité totale reste constante et ce quelle que soit la partie du cône qui est devant et qui est derrière. Cette déduction reste valable pour le rayon d'ombre. Si le rayon passe par l'ouverture du cône (par en haut ou par en bas) l'opacité passe à 100% quand $\phi_r = 0$ ou $\phi_r = \pi$.

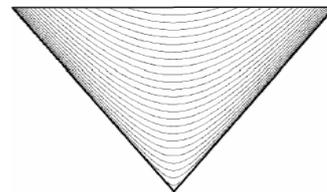
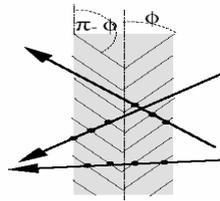
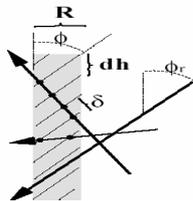


Figure (10): A gauche: champ 2D d'aiguilles parallèles. A droite : rameau d'aiguilles 2D. On note la variation de l'opacité en fonction de la direction du rayon.

Figure (11): Intersection d'un plan Px avec un cône.

b.2) *Extension en 3D*: En 3D, si un rayon traverse l'axe de la branche la situation est équivalente au cas 2D vu précédemment, mais généralement, un rayon ne traverse pas exactement l'axe. Plaçons nous dans le plan parallèle à l'axe du cône contenant le rayon, si P_x est ce plan et x la distance entre ce plan et l'axe de la branche, alors l'intersection d'un rameau d'aiguilles (constitué d'un ensemble de cônes) avec le plan P_x donne un ensemble d'hyperboles. Nous approchons ces hyperboles par leurs asymptotes (figure 11), où le plan contient les aiguilles ayant l'orientation (ϕ) et le même décalage (dh) qu'en 3D, dans une branche d'épaisseur $2R_x$ avec $R_x = \sqrt{R^2 - x^2}$. C'est à ce niveau qu'on peut utiliser la formule du cas 2D, pour calculer le nombre d'intersection total (équation (13)). Ce principe peut être appliqué pour les rayons d'ombrage (figure 12).

b.3) *Traversée d'un rameau d'aiguilles 3D*: L'opacité associée à un élément de longueur dl' sur le plan P_x , support de la branche, est donnée comme suit : $T^{\frac{dl'}{\sin(\phi)\delta}} = T^{dl' \frac{k()}{dh}}$ où $k()$ désigne une région constante, qui sera définie par la suite.

b.4) *Division de l'intégrale en régions*: Nous tirons comme information du cas 2D, que l'opacité le long du rayon est constante pour la partie avant ou pour la partie arrière (ces deux parties correspondent aux deux orientations des aiguilles dans le plan P_x), alors l'équation (13) prend la forme suivante:

$$I = \frac{1}{2R} \int_{x=-R}^R \left(\int_{z=-R_x}^0 A \frac{K_v}{dh} I^{cyl} T^{\frac{K_v}{dh}(R_x+z)} T^{\int_0^{\text{lombrage}} \frac{k()}{dh}} + \int_{z=0}^{R_x} A \frac{\bar{K}_v}{dh} I^{cyl} T^{\left(\frac{k_v}{dh} R_x + \frac{k_v}{dh} z\right)} T^{\int_0^{\text{lombrage}} \frac{k()}{dh}} \right) \quad \text{Equation (14)}$$

Comme le montre la figure (13), si nous divisons le disque (de la section du rameau d'aiguilles) en deux régions F_v et R_v (avant et arrière) relativement à V , comme dans le cas d'un cône d'aiguilles, où nous avons divisé les cônes en une face avant et une face arrière, afin d'évaluer l'illumination. Sur chaque région $k()$ est constante. Supposons que I^{cyl} soit constante pour chacune des deux régions du volume, et approchons la par la valeur I_{avant}^{cyl} et $I_{arrière}^{cyl}$, l'équation (14) devient:

$$I = \frac{A}{2Rdh} \int_{x=-R}^R \left(K_v I_{avant}^{cyl} \int_{z=-R_x}^0 T^{\frac{K_v}{dh}(R_x+z)} T^{\int_0^{\text{lombrage}} \frac{k()}{dh}} + \bar{K}_v I_{arrière}^{cyl} \int_{z=0}^{R_x} T^{\left(\frac{k_v}{dh} R_x + \frac{\bar{k}_v}{dh} z\right)} T^{\int_0^{\text{lombrage}} \frac{k()}{dh}} \right) \quad \text{Equation (15)}$$

Dans le but de simplifier le calcul de cet intégral qui est complexe jusqu'à ce niveau, nous allons diviser à nouveau le disque dans le but de séparer la partie avant et arrière F_L et R_L relativement à L . La longueur du rayon d'ombre dépend de z d'une manière complexe, ce qui rend l'exponentiel difficile à intégrer analytiquement. Pour rendre cet intégrale réalisable analytiquement, nous utilisons une approximation linéaire de composition des opacités: $(1 - A)^n = (1 - nA)$ qui est valable Si $nA \ll 1$ (si le rameau d'aiguilles n'est pas trop dense).

Alors $(1 - A)^{n_1} (1 - A)^{n_2} \approx 1 - n_1 A - n_2 A$, ce qui assure la séparation des facteurs. L'intégrale de l'équation (15) se définit donc par l'équation suivante: $I = I_{Fv} + I_{Rv} = \frac{A}{2Rdh} (I_{avant}^{cyl} K_v I_{Fv} + I_{arrière}^{cyl} \bar{K}_v I_{Rv})$ Equation (16)

Où:

- $I_{Fv} = \int_{Fv} 1 - A \int_{Fv} \frac{K_v}{dh} (R_x + z) - A \int_{Fv \times R_L} z_{ombrage} \frac{\bar{K}_l}{dh} - A \int_{Fv \times F_L} z_{ombrage} \frac{K_l}{dh}$;
- $I_{Rv} = \int_{Rv} 1 - A \int_{Rv} \left(\frac{K_v}{dh} R_x + \frac{\bar{K}_v}{dh} z \right) - A \int_{Rv \times R_L} z_{ombrage} \frac{\bar{k}_l}{dh} - A \int_{Rv \times F_L} z_{ombrage} \frac{K_l}{dh}$;
- $Fv \times R_L$ la région de R_L couverte par les rayons d'ombres dont l'origine est dans Fv . Le même principe est appliqué pour le reste des régions. Comme schématisé dans la figure (13);
- Les surfaces des quatre régions, $S_1 = Fv \times R_L$, $S_2 = Fv \times F_L$, $S_3 = Rv \times R_L$ et $S_4 = Rv \times F_L$ sont proportionnelles à l'intégrale de la longueur du rayon d'ombre, avec l'origine placée sur le rayon. Nous devons intégrer cette surface pour tous les x.

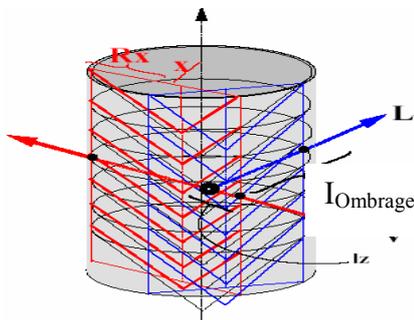


Figure 12: Le volume intersecté par le plan vertical contenant le rayon ressemble au cas 2D.

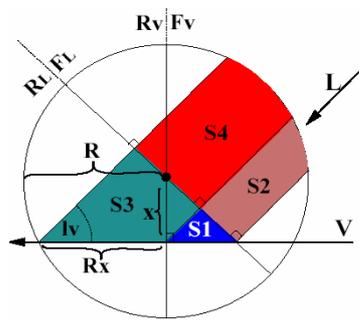


Figure 13: Le volume de la branche d'aiguilles vu par une section orthogonale.

b.5 Intégration géométrique: En effectuant quelques arrangements sur la forme des intégrales, on aboutit à la forme suivante: $I_{Fv} = \pi \frac{R^3}{2} - A \frac{K_v}{dh} \frac{2}{3} R^3 - A \frac{\bar{K}_l}{dh} \int_{Fv \times R_L} z_{ombrage} - A \frac{K_l}{dh} \int_{Fv \times F_L} z_{ombrage}$ Equation (17)

$$I_{Rv} = \pi \frac{R^2}{2} - A \frac{K_v}{dh} \frac{4}{3} R^3 - A \frac{\bar{K}_l}{dh} \int_{Rv \times R_L} z_{ombrage} - A \frac{K_l}{dh} \int_{Rv \times F_L} z_{ombrage}$$
 Equation (18)

Pour calculer l'intégrale le long du rayon, nous devons mesurer l'aire de chaque région balayée S_1, S_2, S_3, S_4 en utilisant des relations géométriques et trigonométriques. Par la suite, le résultat doit être intégré pour chaque rayon. La valeur de chaque intégrale est donnée par les équations suivantes:

- $\int_{S_1} = (1 + \cos(l_v)) \frac{R^3}{3} \sin(l_v)$ et $\int_{S_2} = (1 - \cos(l_v)) \frac{R^3}{3} \sin(l_v)$;
- $\int_{S_3} = (1 + \cos(l_v)/3) R^3 \sin(l_v)$ et $\int_{S_4} = (1 - \cos(l_v)/3) R^3 \sin(l_v)$.

B.6) Calcul de l'opacité et la forme finale de l'illumination d'un rameau d'aiguilles: L'opacité peut être déduite

facilement par l'équation suivante: $1 - \alpha_{Fv} = \frac{1}{2R} \int_{x=-R}^R A R_x \frac{k_v}{dh} \approx 1 - \frac{AR}{dh} \frac{\pi}{4} K_v$ Equation (19)

Avec: $\alpha_{Fv} = aK_v$ et $\alpha_{Rv} = a\bar{K}_v$ et $\alpha_{Fl} = aK_l$ et $\alpha_{Rl} = a\bar{K}_l$

Puisque l'intensité finale du rameau d'aiguilles est la somme des deux intensités avant et arrière, elle peut être exprimée comme suit: $I = I_{Fv} + I_{Rv}$ avec:

$$I_{Fv} = I_{avant}^{cyl} \alpha_{Fv} \left(1 - \frac{8}{3\pi^2} (2\alpha_{Fv} + (1 - \cos(l_v))\alpha_{Rl} + (3 - \cos(l_v))\alpha_{Fl}) \right)$$
 Equation (20)

$$I_{Rv} = I_{arrière}^{cyl} \alpha_{Rv} \left(1 - \frac{8}{3\pi^2} (4\alpha_{Fv} + 2\alpha_{Rv} + (1 + \cos(l_v))\alpha_{Rl} + (3 + \cos(l_v))\alpha_{Fl}) \right)$$
 Equation (21)

5. IMPLEMENTATION DU MODELE DES CONIFERES

Le modèle d’illumination analytique et hiérarchique dédié aux conifères est intégré dans un système de rendu à base de lancer de faisceaux, dans cette section nous allons présenter quelques résultats obtenus avec quelques paramètres définissant la scène.

5.1 Paramètres mesurant la complexité au niveau d’un paysage

Au niveau d’un paysage, nous trouvons deux complexités l’une au niveau de terrain et l’autre au niveau de l’arbre, nous allons présenter la manière avec laquelle nous pouvons calculer la complexité posée.

Au niveau relief : La complexité au niveau du relief est mesurée en fonction du nombre de triangles composant le relief. Le nombre total de triangles représentant le relief est calculé comme suit :

$$Nb_triang_total = Nb_montagne * (Nb_triang / montagne) ;$$

Où :

- Nb_montagne : est le nombre de montagne composant le relief ;
- Nb_triang / montagne : le nombre de triangles représentant le montagne, qui est calculé en fonction du niveau de subdivision *n* utilisé. La relation est comme suit : $nb_triang / montagne = 2^{n+1}$.

Par exemple : Pour un relief composé d’un seul montagne

- avec un niveau de $n=4$, nous aurons 64 triangles nécessaires, figure (a).
- avec un niveau de $n=6$, nous aurons 256 triangles nécessaires, figure (b).
- avec un niveau de $n=9$, nous aurons 1024 triangles nécessaires, figure (c).



Figure (a)



Figure (b)

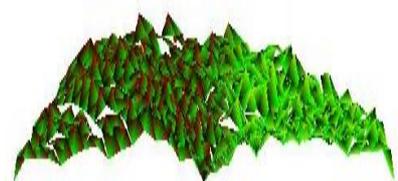


Figure (c)

Au niveau de l’arbre : La complexité, posée au niveau de l’arbre se définit par ces paramètres, tel que :

- Le nombre de branches composant l’arbre ;
- Le rayon et la hauteur de chaque branche ;
- Le nombre de feuilles par cônes ;
- Le nombre de cônes par branche.

Le nombre d’aiguilles contenu dans le paysage est donné comme suit :

- Le nombre de branches total = (le nombre de branches secondaires) * 2;
- Le nombre de cônes total = (le nombre de cônes par branche)*(le nombre de branches total);
- Le nombre de feuilles total = (le nombre de feuilles par cône)* (le nombre de cônes total);
- Le nombre de feuilles par paysage = (le nombre de feuilles total) * (le nombre d’arbres composant le paysage).

Dans ce qui suit, nous présentons quelques résultats démontrant la variation du temps de calcul en fonction des paramètres définissant l’arbre.

Cas (1) : un arbre.



Cas (a)



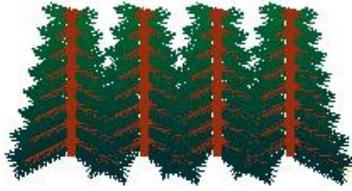
Cas (b)



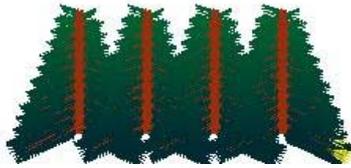
Cas (c)

Nombre arbres	Nb_branches	Nb_cones/branche	Nb_feuilles/cône	Temps consommé	Nb_feuillestotal.
(a) 01	16	8	16	03s	2048
(b) 01	16	8	20	04s	2560
(c) 01	24	8	16	21s	3840

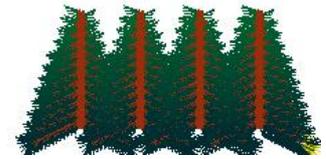
Cas (2) : quatre arbres.



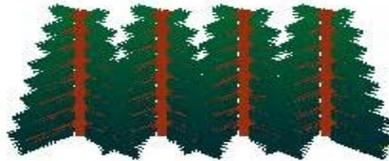
Cas (a)



Cas (b)



Cas (c)

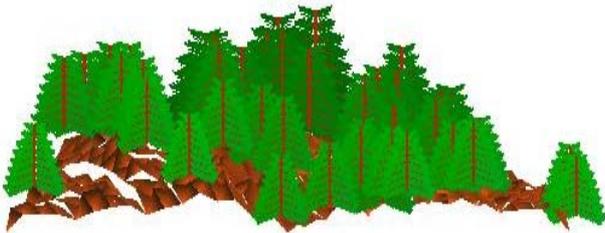


Cas (d)

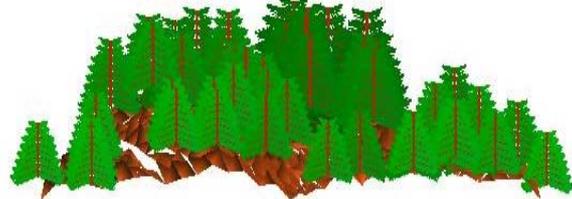
Nombre arbres	Nb_branches	Nb_cones/branche	Nb_feuilles/cone	Temps consommé	Nb_feuillestotal.
(a) 04	16	8	20	61s	10240
(b) 04	16	8	16	26s	8192
(c) 04	24	8	16	66s	12288
(d) 04	24	8	20	159s	15360

5.2 Quelques résultats obtenus

Nous présentons une suite de résultats obtenus par notre système où dans chaque cas, nous changeons le nombre d'arbre insérés, ce qui influe directement sur le temps de calcul consommé.



40 arbres, 1024 triangles, en 120 secondes



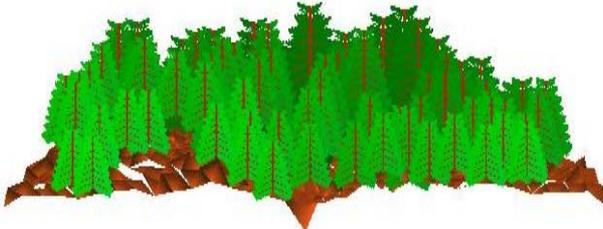
51 arbres, 1024 triangles, en 240 secondes



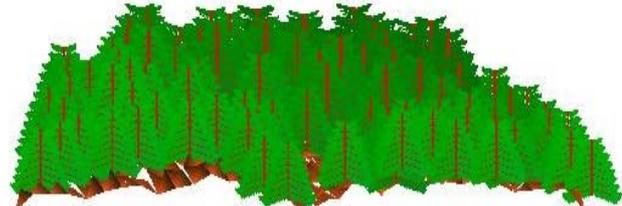
68 arbres, 1024 triangles, en 380 secondes



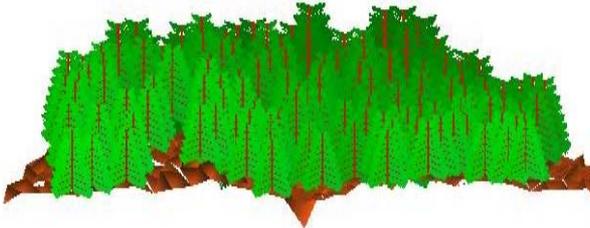
85 arbres, 1024 triangles, en 440 secondes



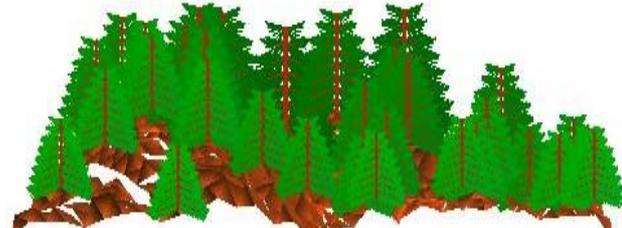
102 arbres, 1024 triangles, en 550 secondes



113 arbres, 1024 triangles, en 620 secondes



204 arbres, 1024 triangles, en 1000 secondes



36 arbres, 1024 triangles, en 85 secondes

5.3 Discussion

Après avoir présenter ces échantillons de résultats, nous pouvons dire que le temps d'exécution nécessaire est influé par plusieurs paramètres, où si l'on change l'un d'eux son effet apparaît rapidement. Les paramètres entrant en jeu sont :

- Les paramètres définissant les arbres, le rayon et la hauteur de chaque branche, de même principe pour le cône et l'aiguille;
- Le nombre de branche composant l'arbre et sans oublier le nombre d'arbre composant le paysage;
- Le modèle d'arbre choisi, simplifié ou complexe;
- Le nombre de cônes par branche;
- Le nombre de feuilles par cône;
- Les deux limites définissant le choix du niveau de détail;
- La position de l'observateur dans la scène (la visibilité);
- Le nombre de sources lumineuses contenues dans la scène.

La relation entre le temps et ces paramètres est une relation exponentielle qui progresse rapidement avec une variation fine.

En plus, nous constatons qu'il y'a un artefact au niveau du relief, qui revient au choix de l'algorithme de rendu le lancer de faisceaux conique. Cet algorithme s'adapte bien avec le rendu des arbres en utilisant le modèle d'illumination analytique et hiérarchique, mais il ne s'adapte pas bien avec le rendu de relief. Cette limite est due au fait que :

- L'algorithme ne tient pas en compte la superposition de plusieurs objets (triangles) dans un seul rayon conique.
- Les rayons réfléchis et réfractés ne sont pas calculés puisque nous supposons que :
 - L'aiguille n'a pas d'effet miroir;
 - Le rayon réfracté du à la transparence ne contribue pas suffisamment à l'aspect;
 - Nous utilisons un lancer de cônes du premier niveau.

Ces constatations, nous permettent de critiquer cette approche comme suit :

- Une scène de paysage comporte deux types d'objets (relief, arbre) qui sont représentés de deux manières différentes totalement;
- Le stockage de l'information doit être compressé en utilisant par exemple un octree;
- Un lancer de rayons classique va consommer un temps de calcul important.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté les différents modèles qui ont traité la complexité posée au niveau de la synthèse d'images alors nous pouvons dire que chaque scène précise et justifie la méthode utilisée. Dans la majorité des cas, la complexité a été prise en charge au niveau du rendu par un modèle d'illumination. Un autre paramètre relève de l'évolution technologique du matériel graphique qui influe sur la méthode choisie. Un paysage de conifères est une scène très complexe car elle contient plusieurs informations (feuilles) de taille inférieure à la taille du pixel, ce qui la rend très difficile à modéliser. Pour traiter la complexité posée dans cette scène, nous avons exposé un modèle d'illumination analytique et hiérarchique qui s'inspire de la hiérarchie naturelle des arbres, un modèle feuille, un modèle cône et un modèle branche, et de l'autre côté de la relation qui existe entre la forme et l'illumination. Après l'intégration de ce modèle au sein d'un système de rendu, nous constatons qu'il a pu minimiser énormément le temps de calcul pour un paysage composé de plusieurs dizaines d'arbres.

En perspectives, nous proposons la recherche d'une méthode de rendu hybride pour prendre en charge les arbres et le relief support en même temps. En plus, nous proposons de généraliser ce modèle pour prendre en charge d'autres types d'arbres. Une fois nous avons l'image de la scène, nous pouvons ajouter d'autre effet tel que paysage environnant (le ciel, la neige et les rochers).

BIBLIOGRAPHIE:

- [1] F. Neyret : "Complexité naturelle et synthèse d'images", mémoire d'habilitation à Diriger les recherches du IMAGIS – GRAVIR/ IMAG- INRIA, soutenue le 22 octobre 2001.
- [2] F. Neyret : "Textures volumiques pour la synthèse d'images", thèse de doctorat de L'université de Paris XI, soutenue le 17 juin 1996.
- [3] K. Ratib: "Texture volumiques multi-échelle pour l'affichage de scènes complexes", université de Montréal, soutenue décembre 1997.
- [4] A. Preux: "L'antialiasage en synthèse d'images", soutenue le 31 août 1995.
- [5] D. Thalman: "Infographie", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, mars 1998.
- [6] A. Meyer: "Représentations d'arbres réalistes et efficaces pour la synthèse d'images de paysages", thèse de doctorat de l'Université de Grenoble I – Joseph Fourier, soutenue le 10 décembre 2001.
- [7] Pascal Deville: "Modélisation et simulation des propriétés radiatives des sources lumineuses", Doctorat de l'université Henri Poincaré – Nancy I, soutenue le 15 janvier 1996.
- [8] F. Neyret, P. Poulin et A. Meyer: "Interactive rendering of trees with shading and shadows", In Eurographics Workshop on Rendering, Juillet 2001.
- [9] Philippe Dumas et Xavier Gourdon : « Une introduction à Maple », un rapport de recherche de INRIA n° 173, juin 1995.
- [10] Xavier Décoret, Frédo Durand et François Sillion : "Billboards Clouds", un diaporama d'IMAGIS,
- [11] Chun Fa-Chang, Gary Bishop et Anselmo Lastra : "LDITree: A hierarchical representation for image-based rendering", Université of North Carolina at Chapel Hill.
- [12] Darwyn R. Peachy : "Solid texturing of complex surfaces", volume 19, numéro 3, 1985.
- [13] Marc Stamminger et George Drettakis: "Interactive sampling and rendering for complex and procedural geometry", IMAGIS/ GRAVIR. <http://www.sop.inria.fr/rees/publications/data/2001/SD01/stamminger-mpdf>.
- [14] N. Noé et B. Péroche: "Représentation de mesures de BRDF à l'aide de fonctions à support local", Ecole de Mines de Saint-Etienne, 5^{ème} journée AFIG 97-34 Rennes.
- [15] C. Chaudy: "Modélisation et rendu d'images réalistes de paysages naturels", PHD Thesis Université Joseph Fourier, 1997.
- [16] Nelson Max et Keiichi Ohsaki: "Rendering trees from precomputed Z-Buffer views", University of California, Davis, CA, 95616.USA, Hokkaido Industriel Research Institute, Sapporo, Japan.
- [17] Kajiya (James T.) et Kay (Timothy L.): "Rendering fur with three dimensional textures", in Computer Graphics (SIGGRAPH'89 Proceeding), édition. Par Lane (Jeffrey), pp. 271-280.
- [18] Williams T. Reeves : "Particle systems: a technique for modeling a class of fuzzy objects", Computer Graphics, volume 17, numéro 3, page 359-377.
- [19] F. Neyret et A. Meyer: "Interactive volumetric textures", in George Drettakis and Nelson Max, editors, Eurographics Rendering Workshop pages 157-168, New York City, Ny, July 1998.
- [20] F. Neyret et A. Meyer: "Multiscale shaders for the efficient realistic rendering of pine-trees", In Graphics Interface, pages 137-144. Canadian Information Processing Society, Canadian Human-Computer Communication Society, May 2000.
- [21] H. Pfister, M. Zwicker, J. VanBaar et M. Gross: "surfels: surface rendering elements as rendering primitives", SIGGRAPH 2000, computer graphics proceeding, pages 335_342, 2000.
- [22] L. Mc Millan et G. Bishop: "Plenoptic modeling an image based rendering system", Los angles, California, august 6_11, 1995, proceeding of SIGGRAPH 95, university of North Carolina at Chapel Hill.
- [23] N. Max: "Hierarchical image based rendering using texture mapping hardware", 10th Eurographics Workshop on Rendering, Granada, Spain, Juin, 1999.
- [24] M. Alexa, J. Behr, D. Cohen_Or, S. Fleishman, D. Levin et C. T. Silva: "Point Set Surfaces" university of Tel Aviv 2001.
- [25] A. Adamson et M. Alexa: "Ray tracing point set surfaces ", TUDarmstadt, GRIS, Fraunhoferstr,5, 64283 Darmstadt.
- [26] E. Paquette, P. Poulin et G. Drettakis: "A light hierarchy for fast rendering of scenes with many lights", Eurographics '98/N. Ferreira et M. Gobel, volume 17, numéro 3, 1998.
- [27] Bernard Péroche et al: "informatique graphique, méthodes et modèles", édition Hermes, Paris 1991, 1998.
- [28] F. Kenton Musgrave: "Texturing & Modeling" Computer Graphics édition AP Professionnel, page 275 - 340, 1998.
- [29] Jean Mark HASENFRATZ: "lancer de faisceaux en synthèse d'images", université de Limoges, le 05/01/1998.
- [30] John AMANATIDES: "Ray tracing with cones", University of Toronto, 1984.

- [31] Prusinkiewicz et al: "L_sysstems from the theory to visual models of plants"proceding of the second CSIRO 1996.
- [32] N. Max: "hierarchical rendering of trees from precomputed multi-layer Z-Buffers", in Eurographics Workshop on Rendering 1996, pages 165-174.
- [33] Site de Brandon MCP hail d'adresse: commando@reed.edu.