

Représentations d'arbres
réalistes et efficaces
pour la synthèse d'images de paysages

Alexandre MEYER

Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Joseph Fourier
Spécialité Informatique

Arrêté ministériel du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992

Préparée au sein du laboratoire iMAGIS-GRAVIR/IMAG-INRIA. UMR CNRS C5527.

Soutenue le 10 décembre 2001

Composition du jury :

Jean-Michel	DISCHLER	Rapporteur
James	STEWART	Rapporteur
Pierre	DINOARD	Examineur
Bernard	PEROCHE	Examineur
Fabrice	NEYRET	Encadrant
Pierre	POULIN	Encadrant
Claude	PUECH	Encadrant

Je dédie cette thèse à mes parents.

Je voudrais remercier en premier lieu Fabrice pour la qualité de son encadrement, toujours présent quand je le demandais, tout en me laissant une liberté que j'ai apprécié. Merci Claude de m'avoir permis de réaliser cette thèse au sein d'iMAGIS. Merci Pierre de m'avoir accueilli aussi chaleureusement au sein de son équipe à Montréal et de m'avoir guider dans mes travaux.

Merci à tous les membres (anciens et actuels) d'iMAGIS et du LIGUM pour ce qui rend le quotidien plus agréable : les discussions, les coups de pouces, la bonne ambiance, les pauses, les pots, les fêtes, les 5 à 7 finissants à pas d'heure, etc.

Merci à mes co-bureaux qui m'ont supportés : Cyrille, Xavier et Franky dont deux d'entres eux on quand même finit par se couper (s'arracher ?) les cheveux... sûrement en signe de détresse.

Merci Sonia pour les parties de raquettes de plages effrénées.

Merci Patricia pour la qualité de ses renseignements et tous les services rendus.

Merci à ceux qui ont partagé mes nuits au labo lors des deadlines : Fabrice, Celine (lors de GI), les siggrappeurs 2001,...

Merci Manu pour cette grap'aventure, pour tous les repas post-bugs (et merci Julie) et pour le mailling blague :-).

Un grand merci à tous mes amis pour toutes les fêtes, week-ends, vacances, sorties plongées, skis, ... sans quoi la vie de thésard serait bien plus rude.

Merci Yann, Philou, Cedar, Lio, Nico(s), Martine, Flo, Karim, Stephane(s), Sylvie(s), Annick, Julie(s), Manu, Phil, Guillaume, Zak, Eve, Laurent(s), Lili(s), Marie(s), Dave, Mimie, Renaud, Delph, Eric(s), Pierre(s), Anne, Ninie, Celine(s), Fred(s), Caro, Fanf, Berange, Arnaud, Fabienne, Dan, Cathy, Laurence, Gaëlle(s),... et toutes celles et ceux que j'oublie...

Je garde le meilleur pour la fin en remerciant Mélie dont les contributions à la réalisation de cette thèse seraient trop longues à citer ici, et Paul pour ses superbes fusées en LEGO et autres divertissements.

Merci à tous...

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	15
Etude de cas	19
1 Peindre un arbre	19
2 Du contenu à l'apparence d'un arbre	21
2.1 Vocabulaire	21
2.2 Etude de cas	22
3 Synthèse d'images d'arbres	27
3.1 Complexité en nombre de primitives	27
3.2 Idée intuitive de l'aliassage	27
4 Conclusion	29
I Représenter et rendre les paysages en synthèse d'images : travaux antérieurs et éléments utiles	31
1 Traiter les scènes naturelles	33
1 Modélisation de paysages	34
1.1 Modélisations et représentations de terrains	34
1.2 Modélisations et représentations d'arbres	35
1.3 Niveaux de détails	38
2 Rendu	41
2.1 Techniques de rendu	41
2.2 Visibilité	45
3 Bilan	48
2 Traiter la complexité	49
1 Complexité microscopique	49
1.1 Modèles d'illumination d'une surface	50

1.2	Modèles d'illumination volumique	54
1.3	Bilan des modèles d'illumination	57
2	Représentations alternatives	57
2.1	Système de particules	58
2.2	Rendu à base de points	59
2.3	Modèles à base d'images	59
2.4	Textures volumiques	63
2.5	Couches d'images	66
2.6	Rendu de macro-géométrie avec une fonction bi-directionnelle de texture	70
3	Bilan	70
II Modèles d'illumination hiérarchiques et analytiques [MN00]		73
3	Modèles d'illumination analytiques et hiérarchiques	75
1	Niveaux de détails pour les arbres	76
2	Modèles d'illumination analytiques et hiérarchiques	77
2.1	Forme et illumination	77
2.2	Hiérarchie	78
3	Considérations liées au rendu	79
3.1	Lancer de cônes	79
3.2	Choix du niveau de détails	80
4	Modèle d'illumination pour les conifères	81
1	Shader dédiés aux conifères	81
1.1	Notre modèle d'arbres (<i>cf.</i> figure 4.1)	81
1.2	Rendu multi-échelle	82
1.3	Qu'avons-nous à calculer ?	82
2	Shader analytique d'une aiguille	84
2.1	Illumination diffuse	84
2.2	Illumination spéculaire	85
2.3	Opacité	85
3	Shader analytique d'un cône d'aiguilles	86
3.1	Illumination diffuse	86
3.2	Illumination spéculaire	88
3.3	Opacité	89
4	Modèle d'illumination analytique d'un rameau d'aiguilles	89
4.1	Traversée d'un rameau d'aiguilles en 2D	90
4.2	Extension à la 3D	91
4.3	Traversée d'un rameau d'aiguilles 3D	91
4.4	Division de l'intégrale en régions	91
4.5	Intégration géométrique	93
4.6	Résultat de l'illumination d'un rameau d'aiguilles	94
5	Résultats	94
5.1	Parallélisation de l'algorithme	96
6	Conclusion et perspectives	97

III	Modèle hiérarchique à base d'images pour le rendu interactif de forêts avec illumination et ombrages [MNP01]	99
5	Modèle à base d'images avec illumination et ombrage	101
1	Billboard et fonction bidirectionnelle de texture	102
1.1	Construction d'une BTF	102
1.2	Rendu	104
2	Cube de visibilité (VCM)	107
2.1	Principe et construction	108
2.2	Cube de visibilité et rendu de billboard	110
3	Ombres au sol	110
4	Résultats et conclusions	111
6	Hiérarchie de BTF	115
1	Hiérarchie	116
1.1	Hiérarchie de BTF	116
1.2	Hiérarchie de VCM	117
1.3	Niveaux de détails	118
2	Constructions des données	118
3	Rendu	120
3.1	Choix du niveau de détails	120
3.2	Calcul de l'ombrage dans la hiérarchie	120
3.3	Algorithme de rendu	121
4	Résultats	124
5	Conclusion et perspectives	126
	Conclusions et perspectives	127
A	Moyenne pondérée d'images avec le matériel graphique	131
1	Moyenne pondérée d'images	131
2	Composition des transparences	132
3	Utilisation d'un tampon annexe	132
4	Rendu direct	133
5	Considération de coût et conclusions	134
B	Lancer de cônes parallèle	135
1	Lancer de cônes parallèle	136
2	Grappe de PC et SciFS	137
2.1	La technologie SCI	137
2.2	Une mémoire partagée distribuée logicielle basée sur un réseau SCI	137
3	Développement d'une application sur grappe SciFS	139
3.1	Répartition des données	139
3.2	Implémentation	139
4	Performances et conclusions	139
	Bibliographie	141

TABLE DES FIGURES

1	Deux œuvres du peintre autrichien Ferdinand Georg Waldmüller (1793-1865) s’inscrivant dans le courant stylistique “réaliste”, exposées au musée d’art de Viennes.	20
2	Deux œuvres de style “impressionniste”. À <i>gauche</i> : “Dame au jardin” de Claude Monet (1840-1926). À <i>droite</i> : “Chemin de village” de Camille Pissarro (1830-1903).	20
3	Le vocabulaire de base lié à la structure d’un arbre.	21
4	La texture générale d’un conifère dépend des caractéristiques de couleur des aiguilles. À <i>gauche</i> : Mélèze de l’Ouest. Les aiguilles sont mates, courtes et regroupées en faisceaux de 15 à 30 aiguilles. À <i>droite</i> : Pin Blanc. Les aiguilles sont regroupées en faisceaux de cinq et de couleur vert bleuté. Leur longueur varie entre 15 et 20 cm.	22
5	Les aiguilles sont réparties en forme de cône ou dans le plan. À <i>gauche</i> : Sapin Baumier. Les aiguilles sont isolées, courtes (1 à 2.5 cm), disposées dans un plan et plates. À <i>droite</i> : Épicéa. Les aiguilles sont courtes (1 à 2.5 cm) et disposées en spirale autour du rameau.	22
6	Les formes des feuilles sont très variées, cependant celles-ci influent peu l’aspect général de l’arbre. À <i>gauche</i> : Erable à Grandes Feuilles. Les feuilles sont très grandes et possèdent des sinus profonds. À <i>droite</i> : Chêne à gros fruit. Les feuilles possèdent des lobes arrondis.	23
7	La texture générale d’un arbre dépend en grande partie de la couleur de ses feuilles. À <i>gauche</i> : Micocoulier Occidental. Les feuilles sont mates et offrent un aspect différent de chaque côté. Elles sont très pointues au sommet et asymétriques à leur base. À <i>droite</i> : Frêne. Les feuilles sont d’un vert vif et très spéculaire. Elles sont composées de cinq à neuf folioles ovales.	23
8	Les rameaux secondaires au bout des branches peuvent avoir une direction pleureuse, donnant un aspect caractéristique à l’espèce. À <i>gauche</i> : un Épicéa aux rameaux pleurants. <i>Au milieu</i> : le rameau du Saule Pleureur est dense et pleurant. À <i>droite</i> : les rameaux dispersés et peu nombreux d’un Saule Pleureur lui donne un aspect aéré.	24
9	Les feuilles peuvent être parallèles et quasi-horizontales, offrant ainsi une surface maximum au soleil. Les rameaux sont alors moins discernables que pour un arbre à rameaux pleurant. À <i>gauche</i> : le rameau d’un Erable de Norvège. À <i>droite</i> : trois Erable de Norvège.	24

10	Le nombre de branches principales détermine l'allure générale de l'arbre. À gauche : un Philodendron formé de nombreuses branches principales. Au milieu : un Erable à feuilles composées formé de trois ou quatre branches principales. À droite : un Copalme d'Amérique, avec une flèche prédominante donnant une forme allongée et une dominance latérale pour ses rameaux, donnant des branches horizontales, presque tombantes.	25
11	La dominante apicale ou latérale détermine la forme générale de l'arbre, allant d'allongée à étalée. À gauche : un Châtaignier. La dominance est apicale pour les branches principales et pour les rameaux, donnant une forme ovoïde. À droite : un Chêne. La dominance est latérale pour les branches principales et pour les rameaux, donnant une forme étalée. Le nombre élevé de rameaux lui donne un aspect compact.	25
12	La transparence d'un arbre influence la répartition de ses rameaux et de ses feuilles. À gauche : un Tilleul d'Amérique et un <i>Cladrastis kentukea</i> , dont l'opacité est forte ont leurs feuilles plutôt réparties sur la périphérie. À droite : un Peuplier Baumier et un Cyprès, dont l'opacité est faible, ont leurs feuilles réparties uniformément dans le volume de l'arbre.	26
13	À gauche : un arbre dense aura un auto-ombrage proche de celui d'une sphère. À droite : lorsque la densité et la répartition des rameaux sont aérées, la lumière pénètre dans tout le volume de l'arbre, entraînant un jeu de lumière et d'ombre complexe.	26
14	Problème d'aliassage : l'image a été calculée en ne traitant qu'un unique objet par pixel choisi aléatoirement.	28
15	La couleur d'un pixel dépend de tous les objets se projetant sur sa surface. Par exemple ce sapin projette de nombreuses données (une partie d'une de ses branches) sur la surface du pixel de la photographie.	28
16	Amélioration de l'aliassage : l'image est calculée en traitant au maximum 64 objets par pixel.	29
1.1	Le modèle de génération de terrain de Musgrave [MKM89] est basé sur une génération multifractales associée à un mécanisme d'érosion. À gauche : un exemple d'érosion. À droite : un exemple de rendu.	35
1.2	Principe de réécriture dans les <i>L-systems</i> : (a) le motif du prédécesseur est remplacé par le successeur. (b) développement d'une structure ramifiée à partir de deux règles de réécriture. (c) l'évolution des fleurs n'affecte pas la structure sous-jacente. (figure issue de la thèse de Chaudy [Cha97].)	36
1.3	À gauche : un exemple de croissance soumis à l'élagage. À droite : un exemple de scène modélisée par un <i>L-system</i>	37
1.4	Exemples de plantes générées par un modèle à base de paramètres botaniques (logiciel <i>AMAP</i> issu du CIRAD [CIR], maintenant commercialisé par la société <i>Bionatics</i> [Bio]).	38
1.5	Exemple de niveaux de détails générés par le modèle géométrique de Weber et Pen [WP95].	39
1.6	La simplification de maillage donne de bons résultats avec des objets "pleins", pour preuve cet avion simplifié par la technique de Hoppe [Hop96].	40
1.7	De nombreuses primitives se projettent dans un pixel. À droite : en ne lançant qu'un rayon par pixel la couleur déterminée sera aléatoire (aliassage). Au milieu : la solution est d'échantillonner suffisamment le pixel en lançant de nombreux rayons. À droite : on lance un unique rayon conique pour considérer tous les objets qu'il contient.	44
1.8	À gauche : deux images de Lindstrom [LKR ⁺ 96] illustrant un maillage fin et un maillage grossier que l'on peut utiliser comme niveaux de détails. À droite : une image de Premoze [PTS99] illustrant la possibilité d'éclairer un terrain montagneux à différents moments de l'année.	45

1.9	Cartes d'horizon. À gauche : pour chaque point échantillonné de la surface, Max [Max88] calcule dans 8 directions la hauteur de l'horizon. À droite : Stewart [Ste98] augmente la précision des cartes d'horizon et les utilise pour calculer l'ombrage et accélérer le rendu en n'envoyant à la carte graphique que les parties visibles du terrain.	48
2.1	À gauche : les données pour le modèle d'illumination empirique de Phong [FvDFH90]. À droite : la micro-géométrie d'une surface.	51
2.2	Carte de perturbations de normales (<i>Bump-mapping</i>). À gauche : seules les normales à la surface sont perturbées pour donner l'illusion d'un relief authentique. Au milieu : le maillage nu. À droite : le maillage enrichi par la technique de <i>bump-mapping</i> , donnant l'illusion d'un relief fin.	52
2.3	Modèle d'illumination anisotrope de Poulin [PF90]. À gauche : le degré d'anisotropie est contrôlé par H et D. À droite : un exemple d'illumination anisotrope (fonds des casseroles).	53
2.4	Fonction bidirectionnelle de texture (<i>BTF</i>) [DvGNK99]. À gauche : la surface est prise en photo depuis plusieurs points de vue et avec plusieurs directions de lumière. À droite : un exemple de surfaces réelles que propose la base de donnée des Universités de Columbia et Utrecht [DvGNK].	54
2.5	À gauche : transition douce entre les trois modèles : <i>displacement mapping</i> en rouge (vue de près), <i>bump-mapping</i> en bleu, et <i>BRDF</i> en jaune (vue de loin) [BM93]. À droite : Heidrich [HDKS00] ajoute les ombres et l'illumination indirecte au <i>bump-mapping</i> en temps réel.	55
2.6	À gauche : Blinn [Bli82] modélise les nuages comme un espace rempli de particules aléatoirement distribuées puis en calcule analytiquement un modèle d'illumination. À droite : Stam [Sta01] construit un modèle analytique d'illumination de peau en mettant en correspondance les résultats discrets des équations de transferts radiatifs avec des courbes analytiques.	56
2.7	Illumination d'un cylindre [Mil88]. À gauche : Miller pré-calcule, dans une table, l'illumination d'un cylindre à la manière d'une <i>BRDF</i> , mis à part qu'il utilise la symétrie axiale d'un cylindre pour stoker un minimum de données. Plus tard Kajiya et Kay [KK89] puis Poulin [PF90] calculerons cette illumination analytiquement. À droite : "Borris l'araignée poilue" réalisé à l'aide du modèle de d'illumination d'un cylindre de Miller.	56
2.8	Système de particules [Ree83, RB85]. À gauche : l'illumination et l'auto-ombrage se calculent à partir des distances D_a et D_d . À droite : un exemple de paysage généré par cette technique.	58
2.9	À gauche : des arbres représentés par des points. Plus on s'éloigne de la caméra moins il y a de points affichés. À droite : un exemple de paysage rendu avec la technique des points [SD01].	59
2.10	À gauche : <i>billboard</i> classique. Au milieu : <i>billboard</i> croisé. À droite : l'aspect plat d'un <i>billboard</i> .	60
2.11	La technique des <i>Lightfield</i> [LH96] ou des <i>lumigraph</i> [GGSC96] permet à partir d'une série d'images (à gauche), de reconstruire les points de vue proches d'un objet (à droite).	62
2.12	À gauche : le principe des textures volumiques est de plaquer sur la surface un volume de référence pour former une peau épaisse sur l'objet. À droite : l'ours de Kajiya et Kay [KK89].	64
2.13	À gauche : un texel représentant un arbre à différents niveaux de détails. À droite : une forêt générée par la méthode de Neyret [Ney96], une extension des textures volumiques.	65
2.14	Le volume de référence des textures volumiques temps réel [MN98] est une superposition de polygones texturés.	66
2.15	À gauche : trois directions de tranches. À droite : exemple de complexité obtenue.	67
2.16	À gauche : un tore recouvert de texels par la méthode de [MN98], mappé sans distorsion apparente ni répétition avec la méthode de [NC99] basée sur des motifs triangulaires complémentaires. À droite : un lapin recouvert de texels par la méthode de [LPFH01].	68
2.17	À gauche : avec les nouvelles générations de cartes graphiques, on peut évaluer une fonction d'illumination en chaque pixel du polygone. À droite : exemple de rendu temps réel d'une forêt de texel avec l'illumination par pixel [SN01].	69

2.18	Les textures de paramètres de Dischler [Dis98]. À gauche : le volume de référence. À droite : deux sphères formées à partir du volume de référence.	70
3.1	Un exemple de la complexité visuelle d'une forêt. L'objectif est de la représenter autrement que par une forte complexité géométrique, très coûteuse en temps de rendu et génératrice d'aliassage. . .	76
3.2	Différents niveaux de détails.	77
3.3	Les arbres sont hiérarchiques : plusieurs branches secondaires forment une branche principale, et plusieurs branches principales forment l'arbre. Toutes les branches se ressemblent, il est donc possible de les instancier. De même, un arbre peut être instancié plusieurs fois dans une scène. Il suffit alors de modifier son orientation et sa taille pour éviter l'impression d'uniformité.	78
3.4	Un objet vu de loin peut être représenté par sa forme et son modèle d'illumination (<i>shader</i>). Le résultat de son rendu sera de meilleure qualité (<i>i.e.</i> avec peu d'aliassage), avec un temps de calcul plus petit que si on utilise la représentation où toute la géométrie est utilisée.	78
3.5	Principe d'une hiérarchie de <i>shaders</i> analytiques dans le cas d'un arbre. L'illumination analytique d'une branche est calculée en intégrant la fonction d'illumination de base (<i>e.g.</i> le modèle de Phong) sur l'ensemble des feuilles d'une branche (une connaissance a priori de la disposition des feuilles est nécessaire pour simplifier la modélisation mathématique). À partir de cette fonction d'illumination (et toujours de la connaissance a priori de la répartition de la matière) on calcule finalement l'illumination de l'arbre entier. De plus, un terme d'opacité moyenne doit être calculé pour chaque niveau de la hiérarchie.	79
3.6	Le bon niveau de détails est choisi en fonction de l'éloignement de l'objet à l'œil mais aussi de la taille de ses primitives. À gauche : de nombreuses feuilles se trouvent dans le pixel ; on retombe dans les problèmes liés au grand nombre de détails (visibilité complexe, aliassage, coût élevé). Au milieu : une poignée de branches se trouvent dans le pixel ; le traitement sera rapide et ne fera pas apparaître de zone uniforme. Ce niveau de détails est le bon choix pour ce pixel. À droite : l'ellipse représentant l'arbre entier recouvre plusieurs pixels, ce qui donnera un aspect uniforme non réaliste à l'arbre.	80
4.1	Notre description hiérarchique d'un arbre.	82
4.2	Les trois niveaux de modèles d'illumination ou <i>shaders</i> . À droite : la primitive est le cylindre représentant les aiguilles. Au milieu : la primitive est le cône représentant une révolution d'aiguilles. À droite : la primitive est le cylindre représentant un rameau d'aiguilles.	83
4.3	À gauche : le modèle de cône continu. À droite : le modèle de rameau continu.	83
4.4	Une aiguille.	84
4.5	Notre <i>shader</i> de cylindre permet de représenter une forêt de sapins dont les aiguilles sont considérées comme cylindriques sans avoir à les trianguler ou à les échantillonner.	86
4.6	À gauche un exemple de la courbe F, pour $L = (0, 1.2)$, $V = (1, 1.5)$ et $\phi = 0.5$. Cette courbe est plutôt lisse malgré l'aspect complexe de ses facteurs. À droite : la FFT de cette courbe. Notez que l'énergie est clairement concentrée dans les fréquences 0, 1 et 2, la motivation d'approcher F avec une combinaison linéaire de $1, \cos(\theta - \theta_A), \cos(2(\theta - \theta_B))$ est donc justifiée. NB : les valeurs à droite sont dues à la symétrie de la FFT.	87
4.7	Les deux types d'aspects de la courbe $\cos(A_\Sigma + B_\Sigma * \cos(\theta - \theta_\Sigma))$, dépendant de ce que $A_\Sigma + B_\Sigma * \cos(\theta - \theta_\Sigma)$ croise π (à droite) ou non (à gauche).	88
4.8	À gauche : champ 2D d'aiguilles parallèles. À droite : rameau d'aiguilles 2D. Notez la variation de l'opacité en fonction de la direction du rayon (surtout visible à gauche).	90

4.9	À gauche : nous modélisons un rameau d'aiguilles par un cylindre volumétrique semi-opaque. Cette opacité est anisotrope et reproduit la variation du nombre d'intersections entre le rayon et les cônes sous-jacents. À droite : intersection d'un plan P_x avec un cône. Nous approchons les hyperboles par leur asymptote.	91
4.10	Le volume intersecté par le plan vertical contenant le rayon ressemble au cas 2D.	92
4.11	Le volume de la branche d'aiguille vu par une section orthogonale. Les surfaces des quatre régions $S_1 = F_V \times R_L$, $S_2 = F_V \times F_L$, $S_3 = R_V \times R_L$, $S_4 = R_V \times F_L$ sont proportionnelles à l'intégrale de la longueur du rayon d'ombre, avec l'origine placée sur le rayon (seul le cas générique figure ici). Nous devons intégrer cette surface pour tous les x	93
4.12	Notre scène de test. À gauche : Les trois niveaux de détails (niveau un en rouge, niveau deux en vert et niveau trois en bleu). À droite : 80 sapins.	95
4.13	Une scène de 1000 arbres.	96
4.14	En haut : trois arbres, depuis un point de vue proche jusqu'à un point de vue lointain. À gauche : 100 arbres sur un carré. À droite : une scène de 1000 arbres.	97
5.1	Pour construire une fonction bidirectionnelle de texture (<i>BTF</i>), on considère n directions de vue, autour de l'objet. Pour chacune de ces directions de vue on considère m directions de lumière. On calcule ainsi $n \times m$ images contenant l'objet éclairé par une lumière directe (<i>i.e.</i> éclairage diffusé et spéculaire) et n images contenant l'objet éclairé par une lumière ambiante.	102
5.2	Un exemple de <i>BTF</i> : un pin avec 18 directions de vue et 6 directions de lumière. Les images sont de taille 64×64 ce qui donne une occupation mémoire de $(64 \times 64 \times 4) \times 18 \times 6 = 1.7\text{Mo}$, compatible avec la mémoire texture d'une station (32 Mo ou 64 Mo sur une <i>GeForce</i>).	103
5.3	La discrétisation de la sphère que nous utilisons pour choisir les directions de vue et de lumière lors de la construction d'une <i>BTF</i> . La sphère initiale comporte six points formant huit triangles équilatéraux. La subdivision consiste à former, à partir de chaque triangle, quatre nouveaux triangles équilatéraux en prenant le milieu de chaque segment, que nous reprojets sur la sphère.	104
5.4	A partir de la direction de vue et de la direction de lumière on extrait les images de la <i>BTF</i> . Ces images sont interpolées de manière pondérée afin d'obtenir une représentation proche du <i>billboard</i> avec <i>OpenGL</i>	105
5.5	Nous utilisons une table pré-calculée pour déterminer les trois directions les plus proches. Les deux axes correspondent aux coordonnées polaires de la direction et les trois composantes <i>RGB</i> aux trois numéros des directions les plus proches (le coefficient de pondération n'est pas visible sur ces images).	105
5.6	Pour nos <i>billboards</i> deux possibilités de rendu sont possibles. À gauche : les images sont perpendiculaires à la direction de vue encodée dans la <i>BTF</i> . À droite : les images sont toutes dans le plan perpendiculaire à la direction de l'œil.	106
5.7	Pour construire un cube de visibilité (<i>VCM</i>), nous effectuons le rendu de toute la scène sur ses six faces en ne considérant que l'information d'opacité (<i>alpha</i>). Ces six images contiennent alors la visibilité depuis ce point dans toutes les directions. Ce pré-calcul permettra de savoir instantanément si la lumière d'une source d'une direction donnée peut atteindre le point central.	108
5.8	On place n cubes de visibilité autour de l'objet. Dans notre implémentation, nous en plaçons en général huit aux sommets de la boîte englobante.	109
5.9	Soit une direction de lumière. Avec les huit valeurs de visibilité données par les cubes de visibilité qui se trouvent autour de l'objet, nous calculons par interpolation les quatre coefficients d'assombrissement aux sommets du <i>billboard</i> . Ces quatre coefficients sont utilisés par <i>OpenGL</i> comme couleurs aux sommets du polygone, le matériel graphique se chargeant de l'interpolation lors du remplissage du polygone. Cette couleur multipliera en chaque pixel le dessin du <i>billboard</i>	109

5.10	Les quatre cas de figure d'interaction entre les arbres et le terrain. <i>a, b</i> : Les cubes de visibilité de chaque arbre prennent en compte la présence de la montagne et des autres arbres (l'auto-ombrage étant inclus dans les <i>BTF</i> et par les <i>VCM</i> pour les niveaux inférieurs de la hiérarchie). <i>c</i> : L' <i>alpha shadow map</i> nous donne les ombres douces des arbres sur le sol. <i>d</i> : La <i>Z shadow map</i> (ou <i>depth map</i>) nous donne l'auto-ombrage de la montagne.	110
5.11	Un exemple d' <i>alpha shadow map</i> prise depuis la source de lumière où seule l'opacité des arbres est représentée. Le sol est tracé en blanc pour cacher les objets qui sont éventuellement derrière lui et pour ne pas générer d'ombre. Cette texture est ensuite utilisée comme texture d'ombre plaquée sur le terrain, et est recalculée à chaque changement de position de la lumière.	111
5.12	Une vue globale de la scène.	113
5.13	une scène de 1000 arbres rendue et ombrée en temps interactif grâce à nos extensions des <i>billboards</i> et des cubes de visibilité. À droite : notre extension des <i>billboards</i> mélange plusieurs vues d'objet ce qui donne un effet de flou quand l'objet est rapproché.	113
6.1	Nos trois niveaux de détails sont calqués sur la hiérarchie naturelle des arbres. Les objets entourés d'un cercle représentent une instance de <i>BTF</i> . Les cubes représentent la hiérarchie de <i>VCM</i> : en rouge le <i>VCM</i> de l'arbre, en jaune le <i>VCM</i> d'une branche principale et en bleu le <i>VCM</i> d'une branche secondaire.	116
6.2	Les trois niveaux de détails. À gauche : les <i>billboards</i> (en bleu) représentent les branches secondaires. Au milieu : les <i>billboards</i> (en jaune) représentent les branches principales. À droite : le <i>billboard</i> (en rouge) représente tout l'arbre.	117
6.3	Schéma global de construction de la hiérarchie.	119
6.4	L'ombrage dans la hiérarchie de visibilité est donné par la multiplication de : a l'auto-ombrage inclus dans les images de la <i>BTF</i> , b l'ombrage des branches secondaires entre elles, c l'ombrage des branches principales entre elles, d l'ombrage de l'arbre par rapport à la scène.	121
6.5	<i>De gauche à droite et de haut en bas</i> : un pin avec ombres, sans ombres, valeur de l'ombrage. Le pin avec seulement l'ambient, coefficient de visibilité ambiante (<i>i.e.</i> près du tronc moins de lumière arrive du ciel), les <i>billboards</i> utilisés au niveau de détail le plus fin.	123
6.6	<i>cf.</i> figure 6.7	123
6.7	Quatre vues d'une forêt (1000 arbres sur un terrain avec éclairage et ombres). Le rendu s'effectue entre 7 et 20 images par seconde sur notre machine de test (Oryx ² Infinite Reality). En utilisant les fonctionnalités des nouvelles cartes graphiques, le nombre d'images par seconde peut largement être amélioré. Remarquez les arbres détaillés au premier plan. Une animation est disponible à l'adresse : http://www-imagis.imag.fr/Alexandre.Meyer/research/MNPO1/index.html	125
6.8	"La forêt du Père Noël" (Paul, 3 ans)	125
A.1	Nous voulons effectuer une moyenne pondérée d'images en profitant de l'accélération qu'offre le matériel graphique.	132
B.1	Les deux schémas de parallélisation.	136
B.2	Notre lancer de cônes parallèle est implémenté sur une grappe de PC équipée d'un noyau <i>Linux</i> étendu par le module <i>SciFS</i>	138

Introduction

Du point de vue de la synthèse d'images, la principale caractéristique d'un paysage naturel est sa complexité, dans tous les sens du terme. Un paysage est un vaste terrain de jeux pour l'observateur scientifique où des milliers de phénomènes interagissent entre eux pour donner une richesse qualitative et quantitative de formes, de mouvements, de couleurs, etc. qui engendrent l'émerveillement.

Les débouchés de la synthèse d'images de scènes d'extérieur sont variés. Elles vont des applications cinématographiques, cherchant la qualité à tout prix pour représenter des mondes réels ou imaginaires trop difficiles à recréer et contrôler avec les techniques de trucage, aux jeux vidéo ou simulateurs astreints au temps réel mais cherchant une qualité visuelle de plus en plus riche, en passant par l'aménagement du territoire faisant appel aux outils de visualisation d'un environnement virtuel pour les études d'impacts.

Cette complexité adjointe à cette demande insatisfaite suffit à susciter l'intérêt et à stimuler ce domaine de recherche. L'objet des travaux de cette thèse est le traitement efficace et réaliste de scènes de forêt. Cette finalité nécessite de gérer la multitude de primitives que les arbres engendrent, aussi bien au niveau du temps de calcul que de la qualité des images, et ce, tant dans le cadre du réalisme que du temps réel.

Objet des travaux

La synthèse d'images de paysages nécessite une phase de modélisation¹ des éléments y prenant place, principalement les terrains et les arbres, mais aussi les roches, les ruisseaux, les nuages, l'herbe, etc. Dans cette thèse nous nous concentrerons exclusivement sur le traitement des arbres. Les outils de modélisation d'arbres sont depuis quelques temps passés du monde de la recherche au monde industriel [Bio, LD], ce qui témoigne de leur aboutissement. Il est possible de modéliser de manière réaliste des espèces et des formes variées d'arbres, mais cela se fait au prix de milliers, voire millions de polygones². Le rendu de paysages nécessite souvent des milliers d'arbres

¹Au sens du terme de modélisation scientifique (représentation), à ne pas confondre avec la "modélisation géométrique", synonyme de "modelage".

²Le polygone est la "primitive" de base la plus couramment utilisée en synthèse d'images.

ce qui rend le traitement de ces données très difficile : coût de traitement et aliassage sont les deux principaux problèmes qui en découlent. Les techniques existantes de simplification de maillage en vue de construire des niveaux de détails sont plutôt pensées pour des objets manufacturés, et ne donnent pas de solutions efficaces sur les arbres : les détails trop fins, nombreux et disparates ne peuvent être simplifiés par quelques polygones sans que l'effet des valeurs d'opacité et d'illumination soit altéré. Il faut alors trouver des techniques offrant une alternative à cette utilisation massive de polygones. Notre stratégie consiste à chercher des représentations mieux adaptées au problème. Durant cette thèse nous proposons une philosophie de rendu qui factorise les détails fins (*e.g.* les feuilles) en une représentation plus simple, séparant la forme du comportement vis à vis de la lumière (le modèle d'illumination). Dans ce but nous introduirons deux modèles distincts :

- un modèle d'illumination (*shader*) analytique et multi-échelles représentant le comportement de la lumière,
- un modèle hiérarchique à base d'images (stockant l'illumination) associé à une structure de visibilité pour le calcul de l'ombrage.

Organisation de l'ouvrage

Nous commencerons par une description des phénomènes entrant en jeu dans l'apparence d'un arbre, puis le corps de l'ouvrage se composera de trois parties constituées chacune de deux chapitres. Nous concluons en récapitulant nos deux représentations, et en envisageant les directions à développer.

Dans la première partie (chapitres 1 et 2), nous exposerons les diverses techniques de modélisation des éléments d'un paysage (terrains, arbres, etc.), ainsi que les techniques classiques de rendu et de visibilité. Nous nous attacherons à montrer la diversité et la complexité des données nécessaires à la modélisation et au rendu d'un paysage. En découlera une description des différentes techniques spécifiques à une classe d'objets (prairie, cheveux, nuages, etc.), mais qui ont pour point commun la gestion de la complexité. Nous montrerons comment les modèles d'illumination intègrent (souvent analytiquement) la complexité d'une micro-géométrie, et comment les modèles dédiés gèrent ces difficultés, en établissant de nouvelles représentations efficaces (*i.e.* n'ayant pas exclusivement recours aux polygones).

Dans la deuxième partie (chapitres 3 et 4), nous présenterons les notions de base qu'il est important d'assimiler pour le développement de modèles hiérarchiques analytiques d'illumination. Nous l'appliquerons ensuite à un exemple concret qui constitue notre première contribution : la réalisation d'une hiérarchie de trois modèles d'illumination analytiques dédiés à la représentation de branches de conifères. Ces modèles sont calculés en effectuant l'intégration analytique d'un modèle d'illumination simple (*e.g.* Phong) sur la distribution de géométrie.

Dans la troisième partie (chapitres 5 et 6), nous développerons une représentation temps réel d'arbres, basée sur l'interpolation d'images pour former des *billboards* et sur l'introduction d'une nouvelle structure de visibilité pour l'ombrage. L'adaptation au point de vue proche et intermédiaire est réalisée en ajoutant une hiérarchie à ce modèle.

L'ouvrage se termine par deux annexes :

- l'Annexe A propose une technique permettant de calculer la moyenne pondérée d'images en utilisant le matériel graphique (ne disposant pas des capacités à traiter plusieurs images simultanément) pour accélérer le calcul d'interpolation.
- l'Annexe B présente les détails de l'implémentation d'un lancer de cônes parallèle sur une grappe de PC expérimentale disposant d'une mémoire partagée distribuée.

Contributions

Nos contributions se situent dans le développement de deux nouvelles représentations :

- Un modèle d'illumination hiérarchique et analytique pour représenter des rameaux de conifères
 - Notre technique est constituée de trois niveaux de modèles d'illumination (*shader*) représentant de la géométrie (aiguilles) dont la taille est visuellement inférieure à celle du pixel.
 - Nos trois modèles d'illumination permettent de représenter à différents niveaux de précision les effets cumulés des petites échelles sans avoir à échantillonner, en tenant compte des ombres et de la visibilité.
 - Ces *shaders* sont conçus par intégration analytique d'un modèle d'illumination simple. Cet aspect analytique offre un rendu efficace en temps de calcul avec une bonne qualité d'images (en particulier avec peu d'aliassage).
 - La continuité de conception de ces trois modèles se traduit par des transitions sans saut lors du rendu.
- Un modèle hiérarchique à base d'images pour le rendu interactif de forêts avec illumination et ombrages
 - Notre représentation basée sur l'association d'une fonction bidirectionnelle de texture (*BTF*) à un *billboard* profite de la capacité des images à contenir l'illumination et l'auto-ombrage. Aucun calcul supplémentaire n'est nécessaire lors du rendu. Le traitement des images comme textures par le matériel graphique permet un temps d'affichage interactif.
 - L'introduction de cubes de visibilité pré-calculés gère l'ombrage sur les objets de la scène et autorise un déplacement interactif de la source de lumière.
 - Nous utilisons cette représentation sous forme hiérarchique (niveaux de détails), ce qui adapte le coût de rendu à la taille de l'objet à l'écran et réduit l'aliassage.
 - Les travaux précédents qui ont introduit le concept de *BTF* l'ont appliqué dans un contexte très restreint, nous avons étendu celui-ci en échantillonnant réellement toutes directions de vue et de lumière, et en séparant l'éclairage ambiant de l'éclairage direct (diffus et spéculaire).
 - Le calcul séparé de l'éclairage ambiant et de l'éclairage direct pour nos *BTF* autorise la prise en compte, au moment du rendu (*i.e.* en temps réel), de l'éclairage du ciel (par exemple pour une scène dont le soleil est caché par les nuages).

Étude de cas

Avant de chercher à reproduire un phénomène, il faut le connaître, et donc commencer par l’observer attentivement. Dans ce cadre, il est également intéressant de se documenter sur la manière avec laquelle d’autres disciplines traitent le même problème. En effet, si la reproduction réaliste du réel est une problématique centrale en synthèse d’images, elle se retrouve aussi en peinture au travers de certains courants artistiques. La connaissance des techniques utilisées par les peintres pourrait donc se révéler riche d’enseignement.

Par conséquent, nous effleurerons à la section 1 le domaine de la peinture en nous appuyant sur deux œuvres classées dans le courant “réalisme” et sur deux œuvres attachées au courant “impressionnisme”. En 2, après une brève description du vocabulaire en rapport avec la structure d’un arbre, nous approfondirons nos connaissances sur les arbres, en effectuant une étude de cas détaillée des caractéristiques déterminant leur apparence. En partant de l’expérience du peintre et de l’étude de cas, nous essaierons, à la section 3, de donner une idée intuitive des problèmes que l’on rencontre en synthèse d’images lorsqu’on s’attaque au traitement d’un grand nombre d’arbres.

1 Peindre un arbre

Les travaux de cette thèse visent la réalisation de techniques maîtrisant la complexité des arbres en terme de quantité de données, dans le but de créer des images réalistes. Avec l’intention d’établir un parallèle entre les problèmes que nous rencontreront et les techniques de peinture, nous présentons les œuvres de trois peintres : deux œuvres de Ferdinand G. Waldmüller s’inscrivant dans le courant stylistique du “réalisme”, et deux œuvres s’inscrivant dans le courant stylistique de l’“impressionnisme”, une de Claude Monet et une de Camille Pissarro. Nous nous intéresserons plus particulièrement à leur manière de peindre les arbres.

La question qui se pose en voyant ces peintures est : “comment fait un peintre pour donner une illusion aussi précise des détails des feuilles alors que son pinceau ne lui permet pas de descendre à des résolutions aussi fines ?” En observant les détails de l’image on s’aperçoit que chaque feuille n’est pas représentée individuellement avec précision, mais que ce sont plutôt des groupes de feuilles qui sont représentés par de petites ellipses, de petites taches colorées de pinceau. L’art du peintre passe par l’élaboration correcte de la couleur de l’ellipse pour donner l’illusion que toutes les feuilles sont présentes (*cf.* figure 1).



FIG. 1 – Deux œuvres du peintre autrichien Ferdinand Georg Waldmüller (1793-1865) s’inscrivant dans le courant stylistique “réaliste”, exposées au musée d’art de Vienne.



FIG. 2 – Deux œuvres de style “impressionniste”. À gauche : “Dame au jardin” de Claude Monet (1840-1926). À droite : “Chemin de village” de Camille Pissarro (1830-1903).

En poussant encore plus en avant ce raisonnement que le réalisme ne se trouve pas dans la précision du trait mais dans une utilisation habile de la couleur, le courant artistique “impressionniste” cherche à traduire l’impression ressentie plutôt qu’à représenter objectivement la réalité. Les artistes “impressionniste”, avec une analyse quasi scientifique des sensations colorées, substituent au dessin classique la notation des ombres et des reflets. Les objets se diluent dans un courant de lumière et de couleurs : leurs contours perdent toute leur précision. La surface du tableau est formée d’une multitude de petites touches soumises aux changements de la lumière et de la couleur (cf. figure 2).

L’idée générale que nous retiendrons des travaux de ces peintres est qu’il n’est pas nécessaire de représenter explicitement tous les détails pour obtenir une image réaliste. Pour un arbre, regrouper les feuilles par paquets peut s’avérer aussi réaliste et bien plus efficace à condition que

la couleur de celui-ci soit correctement élaborée (*i.e.* si elle synthétise le comportement photométrique de toutes les feuilles réunies). C'est l'intuition du peintre qui va le guider dans l'élaboration de cette couleur. Dans le cadre de la synthèse d'images nous ne pouvons pas demander à l'ordinateur d'avoir cette intuition, nous allons donc devoir expliciter les phénomènes impliqués dans l'apparence d'un arbre pour trouver des représentations aptes à intégrer la complexité. Avant de travailler sur l'aspect technique de la conception de ces représentations, il est utile d'effectuer une étude de cas de la structure des arbres, puisque leur apparence en découle directement.

2 Du contenu à l'apparence d'un arbre

Après une brève présentation en 2.1 du vocabulaire lié à la structure d'un arbre, nous ferons en 2.2 une étude de cas des arbres et des phénomènes entrant en jeu dans leur apparence³.

2.1 Vocabulaire

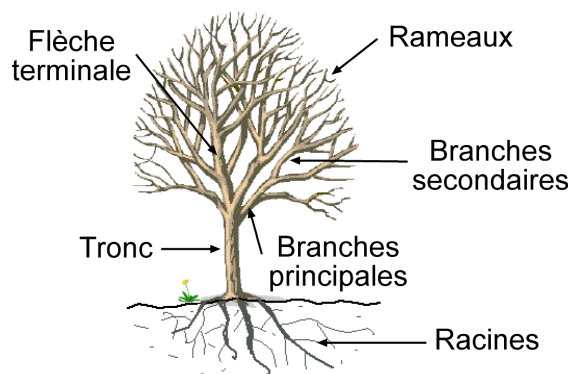


FIG. 3 – Le vocabulaire de base lié à la structure d'un arbre.

Racines : les racines ont trois rôles ; un rôle de stabilisation de la plante, un rôle de transport de la sève et un rôle de stockage de la matière nutritive. Les botanistes en distinguent trois types : la racine principale, les racines pivotantes et les radicelles.

Tronc : le tronc est l'axe principal qui s'est développé et a grossi en circonférence au fur et à mesure des années.

Branches principales ou charpentières : les branches principales partent du tronc, elles se sont formées à cette hauteur dès la première année de leur pousse.

Branches secondaire : les branches secondaires se situent entre les branches principales et les rameaux.

Rameaux et brindilles : la ramure est formée des pousses de l'année. L'ensemble des rameaux forme la couronne de l'arbre. C'est essentiellement cette partie de l'arbre qui est visible de loin.

Flèche terminale ou axe principal : la flèche terminale est un élément majeur du jeune arbre ; c'est la pousse qui détermine la structure du tronc et des branches principales de l'arbre adulte. Si la flèche est coupée, ce sont des pousses latérales qui prendront de la vigueur et la structure de l'arbre se dispersera en deux, trois ou quatre branches principales.

Consulter [Gad] pour plus d'informations.

³La plupart des photos d'arbres de cette section proviennent de [bot, Arb].

2.2 Etude de cas

L'objet de cette section est une étude de cas des éléments de la structure d'un arbre responsables de son allure. Notre approche sera celle d'un observateur s'éloignant de l'arbre : nous étudierons en 2.2.1 les feuilles, puis en 2.2.2 les rameaux et nous finirons en 2.2.3 avec les aspects qui font la silhouette générale d'un arbre.

2.2.1 Feuille



FIG. 4 – La texture générale d'un conifère dépend des caractéristiques de couleur des aiguilles. À gauche : Mélèze de l'Ouest. Les aiguilles sont mates, courtes et regroupées en faisceaux de 15 à 30 aiguilles. À droite : Pin Blanc. Les aiguilles sont regroupées en faisceaux de cinq et de couleur vert bleuté. Leur longueur varie entre 15 et 20 cm.



FIG. 5 – Les aiguilles sont réparties en forme de cône ou dans le plan. À gauche : Sapin Baumier. Les aiguilles sont isolées, courtes (1 à 2.5 cm), disposées dans un plan et plates. À droite : Épicéa. Les aiguilles sont courtes (1 à 2.5 cm) et disposées en spirale autour du rameau.

On peut distinguer deux sous-familles de feuilles, donnant des aspects complètement différents aux arbres : les aiguilles et les feuilles (au sens commun du terme). La feuille est souvent symétrique par rapport à son axe central, avec une partie gauche et une droite, une face supérieure ou ventrale et une face inférieure ou dorsale. Leur forme est variable : les aiguilles sont plus ou moins cylindriques ; les feuilles peuvent être ovoïdes, dentelées, à lobes arrondis ou pointus, trifoliées, palmées, etc. La dimension, allant de un à quelques dizaines de centimètres, est caractéristique de l'espèce considérée, avec des variations en fonction de la vigueur de pousse du rameau.

Malgré la diversité existante, la forme de la feuille (mise à part la différence feuilles/aiguilles) n'a qu'une influence limitée sur l'apparence globale de l'arbre. Par contre la texture, la couleur (différente pour les deux faces), la transparence, l'aspect mat ou brillant, sont des caractéristiques qui donnent à l'arbre sa texture générale (cf. figures 4, 5, 6 et 7). Les feuilles très spéculaires réfléchissent plus de lumière et donnent un aspect brillant à l'arbre (cf. figure 7 à droite), alors que des feuilles mates donnent une allure plus foncée (cf. figure 4 à gauche).

Contrairement à la majorité des aiguilles la plupart des feuilles ne sont pas persistantes, c'est-à-dire qu'elles tombent pendant les mois d'hiver. L'apparence d'un arbre subit donc des variations au cours de l'année : d'abord par le changement de couleur de ses feuilles, puis par leur chute. En revanche, l'aspect des arbres à feuillage persistant, essentiellement les épineux, n'évolue quasiment pas au cours du temps (cf. figures 4 et 5).



FIG. 6 – Les formes des feuilles sont très variées, cependant celles-ci influent peu l'aspect général de l'arbre. À gauche : Erable à Grandes Feuilles. Les feuilles sont très grandes et possèdent des sinus profonds. À droite : Chêne à gros fruit. Les feuilles possèdent des lobes arrondis.



FIG. 7 – La texture générale d'un arbre dépend en grande partie de la couleur de ses feuilles. À gauche : Micocoulier Occidental. Les feuilles sont mates et offrent un aspect différent de chaque côté. Elles sont très pointues au sommet et asymétriques à leur base. À droite : Frêne. Les feuilles sont d'un vert vif et très spéculaire. Elles sont composées de cinq à neuf folioles ovales.

2.2.2 Ramure

La ramure est formée des pousses de l'année. La forme (dépendant de l'organisation des feuilles) et la disposition des rameaux influent fortement l'aspect de l'arbre (cf. figure 7). Les feuilles sont plus ou moins nombreuses dans un rameau, ce qui est essentiellement déterminé par l'espèce mais aussi par la vivacité de l'arbre. Les rameaux secondaires, au bout des branches, ont une direction particulière : de tombantes à cause de leur poids et de la faiblesse de leur attache (cf. figure 8) à parallèles entre elles, presque horizontales, cherchant à s'étaler au maximum pour offrir la surface la plus grande aux rayons du soleil (cf. figure 9).

Deux autres aspects contribuant à l'apparence d'un arbre sont la forme et la dispersion de ses rameaux (cf. figures 8 et 9). L'aspect de paquet des rameaux se caractérise par leur taille et leur opacité, qui, eux, dépendent du nombre de feuilles et de leur répartition. Par exemple les rameaux du Saule Pleureur (cf. figure 8 à droite) ou du Chêne (cf. figure 11) sont compacts et denses alors que ceux du Cyprès ou du Peuplier (cf. figure 12 à gauche) sont aérés. Leur nombre et leur répartition plus ou moins concentrée donnent un aspect plus ou moins continu et compact à l'arbre (ce qui joue aussi sur la transparence générale comme nous le verrons en 2.2.3). Par exemple le



FIG. 8 – Les rameaux secondaires au bout des branches peuvent avoir une direction pleureuse, donnant un aspect caractéristique à l'espèce. À gauche : un Épicéa aux rameaux pleurants. Au milieu : le rameau du Saule Pleureur est dense et pleurant. À droite : les rameaux dispersés et peu nombreux d'un Saule Pleureur lui donne un aspect aéré.



FIG. 9 – Les feuilles peuvent être parallèles et quasi-horizontales, offrant ainsi une surface maximum au soleil. Les rameaux sont alors moins discernables que pour un arbre à rameaux pleurant. À gauche : le rameau d'un Erable de Norvège. À droite : trois Erable de Norvège.

Chêne, composé de beaucoup de rameaux a un aspect dense et compact alors que le Saule Pleureur, composé de peu de rameaux a un aspect plus aéré (on distingue ses branches internes).

2.2.3 Forme générale d'un arbre (silhouette)

La forme naturelle d'un arbre dépend de son type biologique et des variations que peut lui faire subir son environnement. On pourra distinguer une forme biologique, issue de la génétique, et une forme réelle de l'individu soumis aux contraintes de son milieu [CIR]. Nous présenterons les deux aspects déterminant la silhouette d'un arbre : la dominance apicale/latérale et la transparence.

Dominante apicale ou latérale

La sève monte : en fonction de l'espèce on observe une réaction plus ou moins marquée par la différence de vigueur entre la croissance verticale et latérale. Ce qui influence la forme générale de l'arbre, aux niveaux des branches principales comme aux niveaux de la ramure.

Les directions et le nombre de branches principales constituent la structure principale de l'arbre et déterminent sa silhouette. Cette structure se décrit en allant des arbres ayant une flèche

dominante (forme globale allongée ou triangulaire) aux arbres ayant plusieurs branches principales (formes plus rondes) (cf. figure 10).



FIG. 10 – Le nombre de branches principales détermine l'allure générale de l'arbre. À gauche : un Philodendron formé de nombreuses branches principales. Au milieu : un Erable à feuilles composées formé de trois ou quatre branches principales. À droite : un Copalme d'Amérique, avec une flèche prédominante donnant une forme allongée et une dominance latérale pour ses rameaux, donnant des branches horizontales, presque tombantes.

Cette prédominance pour une croissance verticale ou latérale des branches principales se retrouve aussi dans les branches secondaires et dans la ramure. La dominante apicale engendre des rameaux plutôt verticaux et donne une forme ovoïde, voire allongée, à la silhouette de l'arbre (cf. figure 11 à gauche). La dominante latérale produit des rameaux latéraux et donne une forme étalée, voire sphérique, à la silhouette de l'arbre (cf. figure 11 à droite).



FIG. 11 – La dominante apicale ou latérale détermine la forme générale de l'arbre, allant d'allongée à étalée. À gauche : un Châtaignier. La dominance est apicale pour les branches principales et pour les rameaux, donnant une forme ovoïde. À droite : un Chêne. La dominance est latérale pour les branches principales et pour les rameaux, donnant une forme étalée. Le nombre élevé de rameaux lui donne un aspect compact.

Transparence globale

Un aspect important allant de pair avec la silhouette d'un arbre est sa transparence globale. Plus la masse est transparente et plus le détail des contours et contrastes intérieurs prennent de la valeur, et inversement, plus la masse est opaque et plus le contour externe est valorisé.

L'arbre trouve son énergie dans la lumière, les feuilles et les rameaux se développent donc aux endroits où la lumière est la plus présente. Un arbre dense aux rameaux opaques a la majorité

de ses feuilles concentrées sur sa périphérie, l'intérieur étant trop à l'ombre pour y favoriser la pousse massive de nouvelles feuilles (cf. 12 à droite). L'auto-ombrage de ce type d'arbre⁴ est assez proche de l'auto-ombrage d'une sphère (cf. figure 13 à gauche). En revanche, un arbre ayant une transparence plus grande ou une répartition de ses rameaux plus disparate dans son volume (cf. figure 12 à gauche) a un auto-ombrage bien plus complexe, la lumière interagissant avec tous les rameaux pour former de nombreuses ombres internes (cf. figure 13 à droite).



FIG. 12 – La transparence d'un arbre influence la répartition de ses rameaux et de ses feuilles. À gauche : un Tilleul d'Amérique et un *Cladrastis kentukea*, dont l'opacité est forte ont leurs feuilles plutôt réparties sur la périphérie. À droite : un Peuplier Baumier et un Cyprès, dont l'opacité est faible, ont leurs feuilles réparties uniformément dans le volume de l'arbre.

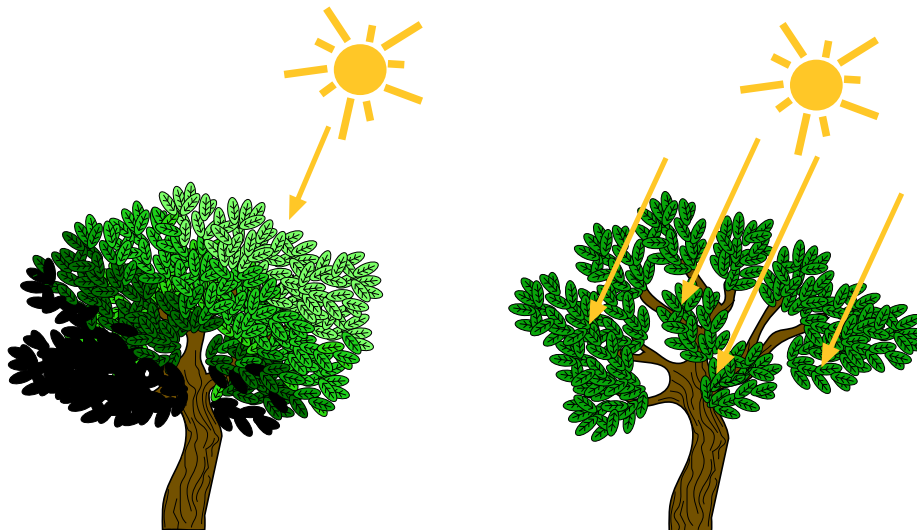


FIG. 13 – À gauche : un arbre dense aura un auto-ombrage proche de celui d'une sphère. À droite : lorsque la densité et la répartition des rameaux sont aérées, la lumière pénètre dans tout le volume de l'arbre, entraînant un jeu de lumière et d'ombre complexe.

⁴L'auto-ombrage est l'ombre que produit un objet sur lui-même.

2.2.4 En résumé

Pour résumer, on peut dire que l'apparence globale d'un arbre provient de sa texture, de ses rameaux et de sa silhouette.

La texture d'un arbre se caractérise par sa couleur et par sa transparence : sa couleur générale est déterminée par la couleur et l'aspect brillant ou mat des feuilles, et sa transparence par le nombre, la répartition et la taille des feuilles.

La silhouette détaillée d'un arbre est formée par ses rameaux : un petit nombre de rameaux dispersés donne un arbre aéré alors qu'un grand nombre de rameaux serrés lui donne un aspect compact et dense. Leur direction tombante ou non, donne un aspect caractéristique à l'arbre.

La silhouette générale d'un arbre dépend de sa dominance apicale qui engendre une forme ovoïde à allongée ou de sa dominance latérale qui est à l'origine d'une forme étalée à sphérique.

3 Synthèse d'images d'arbres

D'après ce que nous venons de voir, un arbre peut couramment compter plusieurs milliers de feuilles et une scène de paysage contenir plusieurs milliers d'arbres de tous types, ce qui totalise largement plusieurs milliards de primitives (feuilles, aiguilles, éléments de troncs, etc.). Cette complexité est à l'origine de deux problèmes majeurs liés à la reproduction d'arbres en synthèse d'images : la lourdeur du traitement dont nous parlerons en 3.1 et la résolution trop fine des détails que nous traiterons en 3.2.

3.1 Complexité en nombre de primitives

Même si le peintre voulait dessiner toutes les feuilles les unes après les autres sur sa toile, il serait limité dans sa représentation par la résolution de son pinceau et de ses yeux. De ce fait il est contraint de regrouper les feuilles par paquets et de les représenter par une simple touche du pinceau (*i.e.* forme elliptique). En informatique, il est tentant de laisser l'ordinateur calculer les tâches répétitives. Il est donc théoriquement possible de laisser la machine traiter toutes les feuilles afin d'obtenir les détails les plus fins pour une image. En pratique ceci n'est pas réalisable car la quantité de données à traiter dépasse largement les capacités d'un ordinateur actuel, de plus de nombreuses applications contraignent les temps de calcul, voire exigent le temps réel (*e.g.* les simulateurs). Une idée pour répondre à ce problème peut être de trouver, à l'instar du peintre, des représentations plus simples à traiter et plus proches de l'effet visible que de l'"atome" structurel. Ce type de représentation simple, intégrant toute la complexité d'un grand nombre de feuilles, devra avoir le même comportement photométrique que l'ensemble des primitives remplacées.

3.2 Idée intuitive de l'aliassage

Le problème de la différence de résolution entre les détails que l'on représente et ce qui est humainement représentable par un pinceau est une bonne introduction au problème d'aliassage que nous exposons maintenant de manière intuitive.

Si on regarde de plus près une image affichée par un ordinateur, on s'aperçoit qu'elle est composée de points (*pixels*). Une solution naïve en synthèse d'images est de calculer la couleur d'un pixel en considérant un échantillon unique, par exemple en appliquant comme couleur celle de l'objet se trouvant en son centre. Si on bouge très légèrement la position de la caméra on s'attend à ce que l'image ne change pratiquement pas. Pourtant du fait de la finesse des détails dans le cas

de scènes de paysages, il est très probable que l'objet se trouvant au centre du pixel change (par exemple d'une feuille verte on peut passer à une branche brune ou au sol). Ce phénomène s'appelle l'aliasing ou *aliasing* (cf. figure 14) et se traduit sur les images fixes par une sorte de texture aléatoire peu réaliste ("bruit"), et à l'animation par un effet de grouillement très désagréable.

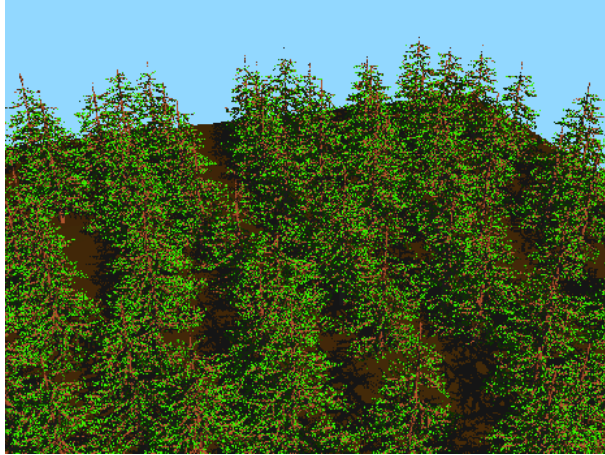


FIG. 14 — Problème d'aliasing : l'image a été calculée en ne traitant qu'un unique objet par pixel choisi aléatoirement.

En regardant la composition de la photographie d'un arbre (cf. figure 15), on s'aperçoit que les feuilles ne sont pas distinguables individuellement. En revanche, de par le mécanisme de prise de vue, elles ont bien toutes contribué à la couleur verte du pixel.

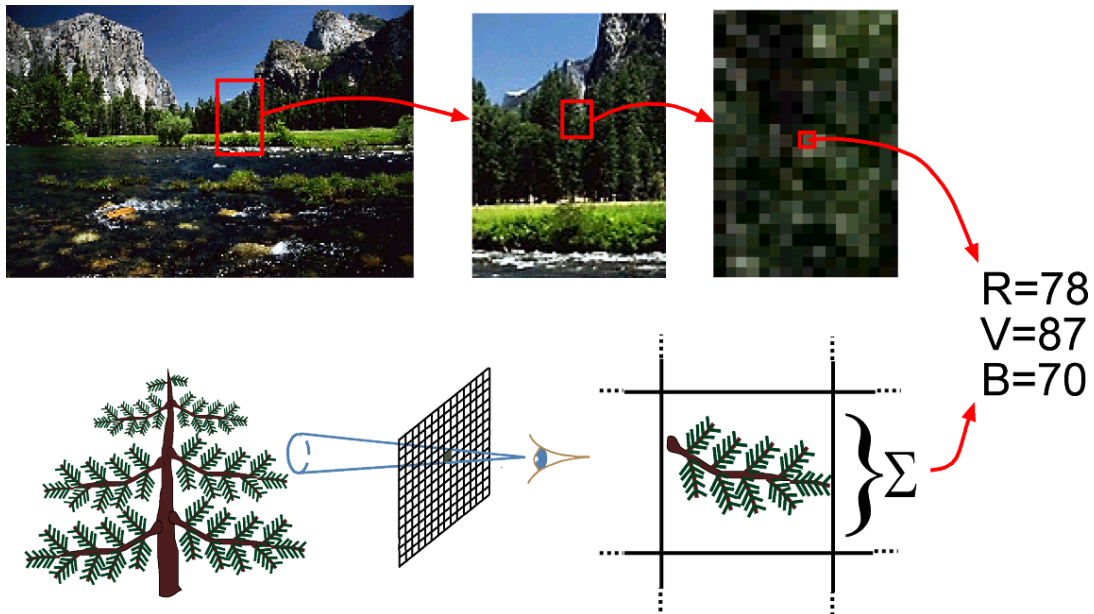


FIG. 15 — La couleur d'un pixel dépend de tous les objets se projetant sur sa surface. Par exemple ce sapin projette de nombreuses données (une partie d'une de ses branches) sur la surface du pixel de la photographie.

Dans le cas d'une photo, tous les objets se trouvant dans un pixel participent (par l'intermédiaire des photons) à la couleur au capteur de l'appareil photo. De la même manière en synthèse

d'images, pour calculer "physiquement" la couleur d'un pixel de l'image il faudrait traiter tous les objets se trouvant dans sa pyramide de vue.

Que se passe-t-il si, dans un soucis de diminution du coût de traitement, on ne considère pas tous les objets apparaissant dans un pixel ? En négligeant quelques-uns, il est probable que la couleur du pixel obtenue ne soit pas très différente de la couleur exacte. Par contre, si on décide de n'en traiter que quelques-uns choisis de manière aléatoire et uniforme, l'erreur sera plus grande. Même si en moyenne le résultat sera correct, ces erreurs seront visibles par des discontinuités fortes entre des pixels voisins pour une image et par des discontinuités temporelles lors d'une animation (aliassage) : l'œil n'est pas sensible qu'à la moyenne !

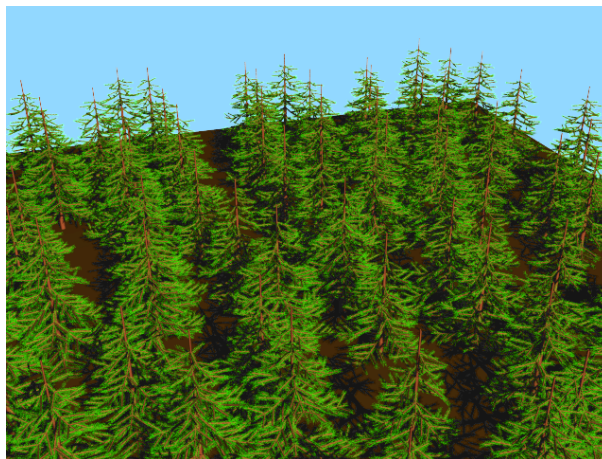


FIG. 16 – Amélioration de l'aliassage : l'image est calculée en traitant au maximum 64 objets par pixel.

4 Conclusion

Ce chapitre permet de mieux nous rendre compte des difficultés qui nous attendent, liées à la représentation des arbres. Ces difficultés sont en grande partie dues à la complexité en nombre de primitives : lourdeur du traitement, finesse des détails, complexité des ombres, des auto-ombrages, problème d'aliassage, etc.

Il ressort de l'étude de cas que les arbres disposent de propriétés hiérarchiques intéressantes : un arbre est constitué d'un axe privilégié (*i.e.* tronc devenant la flèche) puis de branches principales qui sont composées de branches secondaires, elles-mêmes composées de ramures (*i.e.* feuilles ou aiguilles). Ceci ouvre des perspectives de factorisation des traitements. Les rameaux d'une même espèce d'arbres sont assez similaires, et à l'instar du peintre qui représente un groupe de feuilles par une tache de pinceau, il devrait être possible, en synthèse d'images, de regrouper les feuilles d'un arbre (rameau) en une forme simple associée à une technique synthétisant leurs comportements vis à vis de la lumière. Ceci aurait le double avantage de diminuer le coût de traitement et le coût de l'anti-aliassage. La hiérarchie des arbres peut nous aider pour la partie regroupement du travail. En revanche la difficulté consiste à concevoir les techniques transcrivant l'aspect visuel réaliste, tout comme la réalisation de la couleur est délicate pour le peintre. Ce sont à ces deux aspects que se propose de s'attaquer cette thèse.

