

THÈSE

Présentée à

L'U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

pour obtenir le

**DIPLÔME DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE
FRANCHE-COMTÉ**

Spécialité Automatique et Informatique

**PARALLÉLISATION DU LANCER DE RAYON
PAR ÉVALUATION DYNAMIQUE DE LA
TOPOLOGIE DE LA SCÈNE.**

par

M. RIS Philippe

Soutenue le 27 septembre 1996 devant la commission
d'examen:

Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur

R. Caubet, Professeur, IRIT, Université de Toulouse
R. Hubbard, Professeur, Université de Manchester
B. Péroche, Professeur, École des Mines, St Étienne

Directeur de thèse

D. Arquès, Professeur, Université de Marne-la-Vallée
Ch. Chaillou, Professeur, EUDIL, Lille

Examineur
Examineur
Examineur

M. Naimi, Professeur, Institut Polytechnique de
Sévenans
J.Y. Thibon, Professeur, Université de Marne-La-
Vallée

Remerciements

Je remercie l'Université de Franche-Comté pour m'avoir procuré les moyens de commencer mes travaux, les Universités de Marne-La-Vallée et de Lille qui m'ont tour à tour accueilli et donné les moyens de les mener à bien.

J'exprime ma gratitude à MM les professeurs Caubet, Hubbard et Péroche qui ont bien voulu être les rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'à mes examinateurs MM. Chaillou, Naimi et Thibon.

Je suis reconnaissant au professeur Didier Arquès pour m'avoir donné la chance de commencer cette thèse ainsi que pour le temps et les connaissances qu'il a pu partager avec moi.

J'exprime toute ma sympathie à Sylvain pour sa présence amicale pendant ces deux dernières années.

Enfin, je remercie mes parents, qui malgré le temps et les distances, m'ont toujours apporté un soutien indéfectible et irremplaçable.

**PARALLÉLISATION DU LANCER DE RAYON
PAR ÉVALUATION DYNAMIQUE
DE LA TOPOLOGIE DE LA SCÈNE.**

Tables des Matières

Introduction.....	21
Chapitre I.....	25
Mots clés.....	25
Résumé.....	25
Summary.....	25
I) Introduction.....	25
II) Principe du lancer de rayon.....	26
III) Le modèle de l'appareil photo simplifié.....	26
IV) L'algorithme.....	26
Bibliographie.....	28
Chapitre II.....	29
Mots clés.....	29
Résumé.....	29
Summary.....	29
Introduction.....	29
I) Un bref historique.....	30
I.1) La lumière dans l'antiquité.....	30
I.2) La naissance de l'instrumentation optique et des lois d'optiques géométriques.....	30
I.3) La lumière décrite comme un corpuscule.....	30
I.4) La lumière décrite comme une onde.....	30
I.5) La théorie de Maxwell.....	31
I.6) La lumière est composée de photons.....	31
I.7) Les effets quantiques de la lumière.....	32
I.8) Interactions matière-lumière.....	32
II) L'optique géométrique.....	33
II.1) Les domaines d'applications.....	33
II.2) Définitions et vocabulaire.....	33
II.3) Les lois de l'optique géométrique.....	35
II.3.a) Le principe de Fermat.....	35
II.3.b) Les lois de Snell-Descartes.....	35
II.4) Effets non traités ou difficilement traités en optique géométrique.....	36
II.4.a) Les interférences lumineuses.....	36
II.4.b) La diffraction.....	36
II.4.c) La polarisation.....	37
II.4.d) La biréfringence.....	37
II.4.e) La réflexion partielle (issue de la transmission).....	37
II.4.f) Le problème des sources ponctuelles.....	38
II.4.g) Un problème particulier pour le lancer de rayon.....	38
II.4.h) Ambiguïté photométrique dû à la modélisation.....	39
II.5) Des champs d'application particuliers : les caustiques.....	39
II.6) Conclusion.....	39
III) Modèles d'illumination en synthèse d'image.....	39
III.1) Illumination ambiante.....	40
III.2) Réflexion lambertienne ou diffuse.....	40
III.3) Amélioration du modèle de réflexion lambertienne.....	41
III.4) Modèle d'illumination de Phong : prise en compte de la specularité.....	42
III.5) Des modèles encore plus complets.....	44
III.5.a) Modèle de Whitted.....	44
III.5.b) Équation intégrale du rendu.....	45
III.5.c) Extension de l'équation du rendu.....	46

III.5.d) Modèle de Hall et lien avec l'équation étendue du rendu.....	47
III.5.e) De l'équation de rendu au lancer de rayon.....	48
III.5.e.1) Composante diffuse.....	51
III.5.e.2) Composante spéculaire idéale.....	52
III.5.e.3) Composante de transmission idéale.....	52
III.5.e.4) Composante spéculaire diffuse.....	53
III.5.e.5) Composante de transmission orientée.....	53
III.5.e.6) Conclusion.....	53
Conclusion.....	54
Bibliographie.....	54
Chapitre III.....	57
Mots clés.....	57
Résumé.....	57
Summary.....	57
I) Classification classique des méthodes du lancer de rayon.....	58
I.1) Considérations sur le choix d'une méthode d'optimisation.....	58
I.1.a) Critères d'applicabilité.....	58
I.1.b) Critères de performance.....	58
I.1.c) Critères sur les ressources.....	58
I.1.d) Critère de simplicité.....	59
I.2) Une classification rapide des méthodes d'optimisation.....	59
I.3) Intersections plus rapides : structuration des données.....	61
I.3.a) Les volumes englobants.....	61
I.3.a.1) Principe.....	61
I.3.a.2) Optimisation pour les arbres CSG.....	62
I.3.b) Division spatiale.....	63
I.3.b.1) Division spatiale non uniforme.....	64
I.3.b.2) Division spatiale guidée par les données.....	65
I.3.b.3) Division spatiale uniforme.....	65
I.3.b.4) Ressources et applicabilité.....	66
I.3.c) Les techniques directionnelles.....	66
I.3.c.1) Outils de base : le cube directionnel (direction cube).....	66
I.3.c.2) Le tampon de lumière (light buffer).....	67
I.3.c.3) L'algorithme de cohérence des rayons (ray coherence algorithm).....	67
I.3.c.4) L'algorithme de classification des rayons (ray classification).....	67
I.3.c.5) Ressources et applicabilité.....	68
I.3.d) Des organisations de données particulières.....	68
I.4) Comment avoir moins de rayons ?.....	68
I.4.a) Exploiter la cohérence.....	68
I.4.b) Optimisations statistiques.....	70
I.5) Notion de rayons généralisés.....	70
I.5.a) Lancer de cône.....	71
I.5.b) Lancer de faisceau.....	71
I.5.c) Tracer de crayon.....	71
I.5.d) Points communs de ces trois extensions.....	72
I.5.e) Le lancer de rayon discret.....	72
I.6) Les techniques parallèles et vectorielles.....	72
I.6.a) Approches vectorielles.....	72
I.6.b) Les machines dédiées.....	73
I.6.c) Des machines parallèles plus générales.....	73
I.6.c.1) Approche processeur par pixel.....	74
I.6.c.2) Approche processeur par voxel.....	74
I.6.c.3) Approche processeur par objet.....	74
I.6.d) Conclusion sur le parallélisme.....	74
II) Conclusion sur cette classification classique.....	75
III) Définitions et nouvelle classification.....	75
III.1) Description du lancer de rayon à l'aide de graphes.....	76
III.1.a) Définition de trois entités algorithmiques pour le lancer de rayon.....	76
III.1.a.1) Les objets réels.....	76
III.1.a.2) Les objets virtuels.....	79
III.1.a.3) Les processus.....	82
III.1.b) Association de ces trois entités.....	82

III.1.b.1) (processus, objet réel).....	83
III.1.b.2) (processus, objet virtuel).....	83
III.1.b.3) (objet virtuel, objet réel).....	84
III.1.c) Relations internes aux trois entités.....	85
III.1.c.1) (processus, processus).....	85
III.1.c.2) (objet virtuel, objet virtuel).....	85
III.1.c.3) (objet réel, objet réel).....	86
III.1.d) Récapitulation des relations entre les graphes.....	86
III.1.e) Notion de "bon graphe".....	86
III.1.f) Autres exemples.....	87
III.1.f.1) Exemple 1 : lancer de rayon de base.....	87
III.1.f.2) Exemple 2 : cas d'une base de données répartie associée à une division de l'écran par regroupement de rayons primaires.....	87
III.1.f.3) Exemple 3 : cas de la division spatiale volumique (voxels).....	89
III.1.f.4) Exemple 4 : méthodes vectorielles.....	90
III.2) Nouvelle classification et classifications classiques.....	91
III.2.a) Méthodes traitant d'abord les objets réels.....	92
III.2.a.1) Parallélisation du traitement de ces scènes structurées.....	92
III.2.a.2) Traitement particulier des rayons sur des scènes structurées.....	92
III.2.a.3) Structuration successives de ces trois graphes.....	92
III.2.b) Méthodes traitant d'abord les objets virtuels.....	93
III.2.b.1) Parallélisation.....	93
III.2.b.2) Traitement structuré.....	93
III.2.c) Méthodes travaillant en priorité sur les processus.....	93
III.2.c.1) Association des rayons à la parallélisation.....	93
III.2.c.2) Association des objets réels à la parallélisation.....	94
III.2.d) Considérations générales sur la structuration des trois graphes.....	94
III.2.e) Un exemple structurant les trois graphes.....	95
III.2.f) Classification statique.....	96
III.2.g) Classification d'Arvo & Kirk.....	97
III.2.g.1) Généralisation de la notion de rayon.....	97
III.2.g.2) Avoir moins de rayons.....	97
III.2.g.3) Intersections plus rapides.....	98
III.2.h) Classification des méthodes parallèles.....	98
III.3) Conclusion sur cette nouvelle classification.....	101
Conclusion.....	101
Bibliographie.....	101
Chapitre IV.....	109
Mots clés.....	109
Résumé.....	109
Summary.....	109
Introduction.....	109
I) Première série de règles caractérisant des propriétés topologiques simples.....	110
A1 : Règle sur les réflexions.....	111
A2 : Règle sur les transmissions.....	111
A3 : Règle sur les rayons à l'intérieur d'un objet.....	111
A4 : Règles sur les rayons d'ombrage.....	111
A5 : Règle sur les rayons d'ombrage et secondaires.....	112
A6 : Règles sur les rayons d'un espace trié en profondeur.....	112
A7 : Information sur la dynamique des calculs d'ombrage.....	112
II) Optimisation topologique parallèle.....	113
II.1) Graphes de l'optimisation topologique.....	113
II.1.a) Construction de Gp.....	114
II.1.b) Construction de Gv.....	115
II.1.c) Construction de Gr.....	115
II.2) Association des processus et des processeurs.....	116
II.2.a) Différents cas d'association.....	116
I.2.a.1) Un processeur, un processus.....	116
I.2.a.2) Parallélisme simulé.....	117
I.2.a.3) Plusieurs processeurs, un processus par processeur.....	117
I.2.a.4) Mélange de parallélisme vrai et simulé.....	117
I.2.a.5) Parallélisme multi-niveaux.....	117

II.2.b) Conclusion.....	118
III) Découverte et échange d'information topologique.....	118
III.1) Comportement de l'algorithme.....	118
III.1.a) Niveau du processeur.....	118
III.1.b) Niveau des Gp(Mi).....	118
III.1.c) Niveau du processus.....	118
III.1.d) Niveau du pixel.....	119
III.1.e) Conclusion.....	119
III.2) Messages.....	120
III.2.a) Variables booléennes ligne et colonne.....	120
III.2.b) Messages vus et non vus.....	120
III.2.c) Messages sur les boîtes englobantes.....	120
III.2.d) Message FINI.....	121
III.2.e) Direction de diffusion.....	121
III.2.f) Gestion des messages.....	121
III.2.g) Conclusion.....	121
III.3) Déductions topologiques.....	122
III.3.a) Déductions B1 : génération des messages "VU" et "NON VU".....	122
III.3.b) Déductions B2 : génération des messages "FINI".....	122
III.3.c) Déductions B3 : cas des petits objets.....	126
III.3.d) Déductions B4 : émission récursive des messages.....	126
III.3.e) Déductions B5 : déductions locales.....	126
III.3.f) Déductions B6 : déductions sur les boîtes englobantes.....	127
IV) Propriétés du programme.....	127
IV.1) Un routage simplifié.....	127
IV.2) Un algorithme tolérant aux pannes et libre d'inter-blocage.....	127
IV.3) Un algorithme extensible.....	127
IV.4) Un algorithme à la granularité ajustable.....	128
IV.5) Retour sur les critères d'applicabilité.....	128
IV.6) Retour sur les critères de performance.....	128
IV.7) Retour sur les critères sur les ressources.....	129
IV.8) Retour sur le critère de simplicité.....	130
IV.9) Les trois graphes du programme.....	130
IV.9.a) Graphe des objets virtuels.....	130
IV.9.b) Graphe des processus.....	131
IV.9.c) Graphe des objets réels.....	131
Conclusion.....	132
Bibliographie.....	133
Chapitre V.....	135
Mots clés.....	135
Résumé.....	135
Summary.....	135
Introduction.....	135
I) État de l'art.....	136
I.1) Quelques tests existants.....	136
I.2) Des tests spécifiques au lancer de rayon.....	137
II) Buts de tels tests en lancer de rayon.....	138
II.1) Vérifier la validité d'un programme de lancer de rayon.....	138
II.1.a) Points à vérifier.....	138
II.1.b) Méthodologie de vérification.....	139
II.1.b.1) Comparaison directe.....	139
II.1.b.2) Comparaison entre images.....	140
II.1.c) Conclusion.....	140
II.2) Évaluer les performances.....	141
II.2.a) Complexité théorique.....	141
II.2.b) Prise de temps de calculs.....	142
II.2.c) Complexité mémoire.....	143
III) Recherches de paramètres.....	144
III.1) Définitions.....	144
III.2) Paramètres concernant les rayons primaires.....	145
III.2.a) Définitions.....	145
III.2.b) Algorithme.....	147

III.3) Paramètres concernant les rayons réfléchis et transmis.....	147
III.3.a) Définitions.....	147
III.3.b) Algorithme.....	148
III.4) Paramètres concernant les rayons d'ombrage.....	148
III.4.a) Définitions.....	148
III.4.b) Algorithme.....	150
III.5) Conclusion.....	151
IV) Problème de l'aliassage.....	151
IV.1) Point de départ et vecteur directeur.....	152
IV.1.a) Les rayons primaires.....	152
IV.1.b) Les rayons secondaires et d'ombrage.....	152
IV.1.c) Conclusion.....	153
IV.2) Résolution des intersections.....	153
IV.3) Évaluation quantitative de l'aliassage.....	153
IV.4) Aliassage structurel.....	154
V) Conclusion.....	155
Bibliographie.....	155
Chapitre VI.....	157
Mots clés.....	157
Résumé.....	157
Summary.....	157
Introduction.....	157
I) Calibrage de l'algorithme.....	158
I.1) Calibrage des rayons primaires.....	160
I.2) Calibrage des rayons d'ombrage.....	161
I.3) Calibrage des rayons réfléchis et transmis.....	162
I.4) Résultats globaux du calibrage.....	162
I.5) Meilleurs résultats.....	164
I.5.a) Presse-papiers.....	164
I.5.b) Objets de base.....	164
I.5.c) Aléatoire.....	164
I.6) Justesse de l'algorithme.....	164
II) Test séquentiel.....	166
II.1) Configuration.....	166
II.2) Résultats de référence.....	166
III) Tests parallèles.....	166
III.1) Parallélisme simulé.....	166
III.1.a) Évolution du nombre d'objets testés par rayon et du temps de calcul.....	167
III.1.b) Évolution du nombre de messages et de leur temps de gestion.....	167
III.1.c) Évolution en fonction du nombre d'objets.....	167
III.2) Parallélisme vrai.....	170
III.2.a) Configuration.....	170
III.2.b) Nombre d'objets testés par type de rayon.....	170
III.2.c) Comparaison en terme de temps de calcul.....	171
III.2.d) Distribution de la scène de la Figure VI-8 sur un réseau de stations.....	172
IV) Comparaison avec d'autres algorithmes.....	173
IV.1) Vérification de la justesse des méthodes.....	175
IV.2) Objets testés par rayon primaire.....	175
IV.3) Pourcentage d'intersections utiles pour les rayons primaires.....	175
IV.4) Nombre moyen d'objets testés tous rayons confondus.....	176
IV.5) Temps de calculs.....	176
V) Conclusion.....	176
Bibliographie.....	177
Chapitre VII.....	179
Mots clés.....	179
Résumé.....	179
Summary.....	179
Introduction.....	179
I) Évaluation statistique des optimisations des rayons primaires en topologie bande.....	180
I.1) Hypothèses.....	180
I.2) Modèle théorique d'une scène pour les rayons primaires de la topologie bande.....	181
I.3) Modèle de la topologie bande.....	183

I.4) Modélisation et quantification des messages dans ce modèle.....	183
I.5) Applications.....	185
I.5.a) Gain théorique.....	185
I.5.b) Comparaisons numériques.....	187
II) Modèle statistique des optimisations des rayons primaires en topologie carrée.....	188
II.1) Hypothèses.....	188
II.2) Modèle théorique d'une scène pour la topologie carrée.....	188
II.3) Modèle de la topologie carrée.....	189
II.4) Modélisation et quantification des messages dans ce modèle.....	190
II.5) Applications.....	191
II.5.a) Cas particulier 1 :	192
II.5.b) Cas particulier 2. Tirage de scène avec dépendance des dimensions des objets.....	195
II.6) Application à la prédiction du gain pour des scènes réelles.....	196
II.6.a) Évaluation de la fonction de répartition d'une scène "réelle".....	196
II.6.b) Démarche.....	197
II.6.c) Scène "sphere flakes".....	199
II.6.d) Scène déduite de collier, 250 objets (Cf. Album, chapitre IX).....	200
II.6.e) Scène déduite des objets de base, 17 objets (Cf. Album, chapitre IX).....	201
II.6.f) Conclusion.....	201
III) Modélisation et adaptation de la partition de l'écran à la scène.....	201
III.1) Introduction.....	202
III.2) Définition et présentation du modèle.....	204
III.3) Calcul de la moyenne $E(hp)$ de la v.a. donnant le nombre moyen d'objets non testés par rayon primaire 205	
III.4) Quelques conséquences de l'équation générale de l'espérance de gain en topologie bande donnant $E(hp)$ (formule 1, Cf. § III.3).....	210
III.4.a) Une majoration de $E(hp)$	210
III.4.b) Quelques cas limite intéressants.....	210
III.4.c) Problèmes et perspectives posés par la maximisation de $E(hp)$	213
III.5) Autres critères à étudier.....	219
Conclusion.....	219
Bibliographie.....	220
Annexe du chapitre VII.....	221
I) Pourcentage d'objets non testés en partition carrée.....	221
Chapitre VIII.....	223
Mots clés.....	223
Résumé.....	223
Summary.....	223
Introduction.....	223
I) La modélisation.....	224
I.1) Ébauche d'un modèleur graphique.....	224
I.2) Fichier d'échange de données.....	224
I.3) Réalisation d'un compilateur pour la modélisation.....	225
I.4) Réalisation d'une bibliothèque C.....	226
I.4.a) Caractéristiques du programme.....	226
I.4.b) Un serveur interactif de base de données.....	227
II) La parallélisation.....	228
II.1) Information du parallélisme dans le serveur de base de données.....	228
II.2) Programme de distribution des calculs.....	228
III) Les textures.....	229
III.1) Définition.....	229
III.2) Propriétés générales des textures.....	229
III.3) Textures matrice de pixels (bitmap).....	229
III.4) Textures mathématiques.....	230
III.5) Textures par variation de la normale ("bump mapping").....	231
III.6) Textures spéciales.....	231
Conclusion.....	231
Bibliographie.....	231
Chapitre IX.....	233
Mots clés.....	233
Résumé.....	233
Summary.....	233
Introduction.....	233

I) Extension des règles à l'animation.....	234
I.1) Les boîtes englobantes.....	234
I.2) Les ombres.....	234
I.3) Diffusion des messages.....	235
I.4) Optimisations annexes.....	235
I.5) Bénéfices issus de ces optimisations.....	235
II) Test236	
II.1) Configuration.....	236
II.2) Résultats.....	238
II.3) Autre test.....	238
Conclusion.....	239
Chapitre X.....	241
Conclusion.....	261
ANNEXES.....	263
Bibliographie.....	265
ANNEXE I.....	274
I) Le presse-papiers.....	274
II) Les objets canoniques.....	278
III) La scène aléatoire.....	280
Annexe II.....	285
Résumé.....	291