

Projet iMAGIS

*Modèles, Algorithmes, Géométrie pour le Graphique et l'Image
de Synthèse*

Rhône-Alpes

THÈME 3B



*R*apport
*d'**A*ctivité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Visualisation, rendu et simulation de l'éclairage	5
3.2	Animation et modélisation	6
3.3	Géométrie algorithmique	8
3.4	Réalité augmentée et réalité virtuelle	9
4	Domaines d'applications	10
5	Résultats nouveaux	10
5.1	Visualisation, rendu et simulation de l'éclairage	10
5.1.1	Méthodes hiérarchiques pour la simulation de l'éclairage	11
5.1.2	Application de la simulation de l'éclairage à la croissance des plantes . . .	13
5.1.3	Rendu haute qualité pour des environnements généraux	13
5.1.4	Visualisation interactive de données urbaines	15
5.1.5	Éclairage interactif pour des environnements généraux	15
5.1.6	Acquisition et rendu de cheveux	16
5.1.7	Interpolation d'images	17
5.1.8	Représentations alternatives	18
5.2	Animation et modélisation	18
5.2.1	Modélisation par surfaces implicites	19
5.2.2	Simulation de l'environnement	20
5.2.3	Animation de formes organiques	23
5.2.4	Textures d'animation	25
5.3	Géométrie algorithmique	26
5.3.1	Précalcul pour le rendu des scènes complexes	26
5.4	Réalité augmentée et réalité virtuelle	27
5.4.1	Mise en place d'une plate-forme de réalité virtuelle	27
5.4.2	Environnement multi-utilisateurs pour la Réalité Augmentée	27
5.4.3	Sculpture virtuelle	30
5.4.4	Illustration et annotation en 3D	30
5.4.5	Simulateur de chirurgie	31
6	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	33
6.1	Végétation animée et interactive pour le jeu vidéo	33
7	Actions régionales, nationales et internationales	33
7.1	Actions régionales	33
7.1.1	Plate-forme de réalité virtuelle	33
7.1.2	Projet DEREVE	34

7.1.3	Simulation de textiles sur grappes de processeurs	34
7.1.4	Coulées de boue et avalanches virtuelles	34
7.1.5	Projet Argos	35
7.1.6	NeuroRV : Neurosciences motrices et réalité virtuelle	35
7.1.7	Digisens	35
7.2	Actions nationales	36
7.2.1	CYBER : fusion temps réel d'un animateur réel dans un monde virtuel .	36
7.2.2	Action Incitative Télémédecine « CAESARE »	36
7.2.3	ARC Simulation de Chirurgie Intestinale	36
7.2.4	COLOR : CAVE2A iMAGIS-CSTB	37
7.3	Actions financées par l'Union Européenne	37
7.3.1	SIMULGEN (Open LTR 35772)	37
7.3.2	Projet PAVR : animation et réalité virtuelle	37
7.4	Relations bilatérales internationales	38
7.4.1	Europe	38
7.4.2	Amérique du Nord	38
8	Diffusion de résultats	39
8.1	Animation de la communauté scientifique	39
8.2	Enseignement universitaire	39
8.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	40
8.4	Diffusion auprès du grand public	40
9	Bibliographie	40

iMAGIS, équipe du Laboratoire GRAVIR-IMAG (UMR 5527), est un projet commun entre le CNRS, l'INRIA, l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) et l'Université Joseph Fourier (UJF).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Claude Puech [professeur, UJF]

Personnel ITA (Laboratoire GRAVIR)

Isabelle Delas [gestionnaire INPG (en congé parental depuis le 1^{er} octobre 2001)]

Jean-Luc Douvillé [ingénieur de recherche CNRS-GRAVIR]

Pascal Di Giacomo [ingénieur de recherche INPG-GRAVIR]

Ornella Mazzeo [gestionnaire, UJF-GRAVIR]

Patricia Mathieu [assistante de direction, CNRS-GRAVIR]

Sonia Nogueira [gestionnaire, INPG-GRAVIR]

Personnel INRIA

George Drettakis [CR 1 (jusqu'au 10 mai 2001)]

Nicolas Holzschuch [CR 2]

Lionel Reveret [CR2 (depuis le 1^{er} novembre 2001)]

François Sillion [DR 2]

Cyril Soler [CR 2]

Ingénieurs associés

Laurence Boissieux [accueil jeune INRIA]

Stéphane Gobron [ingénieur UJF]

Marc Lapierre [ingénieur UJF (depuis le 1^{er} décembre 2001)]

Marc Pont [accueil jeune INRIA (jusqu'au 30 septembre 2001)]

Personnel CNRS

Gilles Debunne [CR2 (depuis le 1^{er} octobre 2001)]

Jean-Dominique Gascuel [CR 1]

Fabrice Neyret [CR 1]

Personnel Universitaire

George-Pierre Bonneau [professeur, UJF (depuis le 1^{er} Oct. 2001)]

Marie-Paule Cani [professeur, INPG]

François Faure [maître de conférences, UJF]

Jean-Marc Hasenfratz [maître de conférences, Université Pierre Mendès-France]

Joëlle Thollot [maître de conférences, INPG]

Chercheur post-doctorant

Andréas Ruf [juin-septembre 2001]

Chercheurs doctorants

David Bourguignon [allocataire MENRT, INPG]

Jean Combaz [allocataire MENRT, UJF]

Cyrille Damez [allocataire MENRT, UJF]

Xavier Décoret [AMX, UJF]

Éric Ferley [BDI, CNRS-Renault (jusqu'au 30 mai 2001)]
Stéphane Grabli [allocataire MENRT, UJF]
Xavier Granier [allocataire MENRT, UJF]
Raphaël Grasset [allocataire MENRT, UJF]
Samuel Hornus [élève ENS Cachan]
Sylvain Lefebvre [allocataire MENRT, UJF]
Alexandre Meyer [allocataire MENRT, UJF]
Sylvain Paris [AMX, UJF]
Franck Perbet [allocataire MENRT, INPG]
Jérémy Turbet [contrat ESPRIT, UJF]

Doctorants invités

Pauline Jepp [doctorante à Calgary, mai-octobre 2001]
Michael Wimmer [doctorant à TU-Wien, juin 1999-janvier 2001]
Peter Wonka [doctorant à TU-Wien, juin 1999-janvier 2001]

Stagiaires

Alexis Angelidis [DEA IVR 00-01]
Thomas di Giacomo [DEA IVR 00-01]
Florent Duguet [DEA ENS/X 00-01]
Sylvain Faisan [DEA IVR 00-01]
Damien Hinsinger [DEA IVR 00-01]
Stéphane Jaeger [DEA IVR 00-01]
Alex Reche [DEA IMAGE Sophia-Antipolis 00-01]
Franck Sénégas [DEA IVR 00-01]
Sylvain Trimoreau [DEA IVR 00-01]

Depuis le 10 mai 2001, George Drettakis a créé l'action REVES à l'INRIA Sophia-Antipolis.

2 Présentation et objectifs généraux

iMAGIS est un projet INRIA et une équipe de l'unité mixte de recherche (UMR) GRAVIR entre le CNRS, l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), l'INRIA et l'Université Joseph Fourier (UJF). Le laboratoire GRAVIR est membre de la fédération IMAG (Institut d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble).

Les recherches menées au sein du projet iMAGIS concernent la visualisation graphique de phénomènes complexes, simulés numériquement. On assiste, en effet, au développement de systèmes graphiques qui permettent de réaliser de véritables « maquettes informatiques », dont la complexité approche celle des problèmes réels. Les utilisateurs de ces « prototypes virtuels », qu'ils soient scientifiques ou ingénieurs, architectes, designers ou chirurgiens, réclament des environnements interactifs dans lesquels ils puissent concevoir (ou réutiliser) des modèles réalistes et effectuer des simulations efficaces. Ces deux aspirations contradictoires ne sont pas conciliables dans les systèmes actuels. Nos recherches visent donc à trouver des compromis

acceptables entre réalisme et temps de calcul grâce à des approches novatrices. Dans cette optique, le projet s'attache, d'une part, à résoudre des problèmes « fondamentaux » et, d'autre part, à contribuer à des avancées technologiques dans les différents domaines d'application.

Dans la catégorie des problèmes fondamentaux, on peut citer la création de modèles 3D géométriques ou physiques, et la conception d'algorithmes efficaces. Plusieurs de ces derniers s'appuient sur des techniques multi-échelles ou multi-résolution permettant une éventuelle adaptation « en ligne » du niveau de détail des données traitées. Les principaux thèmes étudiés dans ce cadre sont la modélisation de la lumière et de son interaction avec les objets, la modélisation et la visualisation efficace de formes ou scènes géométriques complexes, la modélisation du comportement physique d'objets déformables ou articulés, et l'étude de problèmes géométriques fondamentaux liés aux notions de visibilité et de cohérence.

Les applications comprennent notamment les études d'impact, les simulateurs, la communication visuelle, l'imagerie médicale, et l'industrie du loisir audiovisuel. La mise en œuvre des techniques dites « de réalité virtuelle » permettant, pour certaines de ces applications, une meilleure interaction entre l'utilisateur et la maquette numérique sur laquelle il travaille, nous développons notre savoir-faire dans ce domaine.

3 Fondements scientifiques

3.1 Visualisation, rendu et simulation de l'éclairage

Participants : Cyrille Damez, George Drettakis, Xavier Granier, Jean-Marc Hasenfratz, Nicolas Holzschuch, Alexandre Meyer, Fabrice Neyret, Claude Puech, François Sillion, Cyril Soler, Marc Stamminger, Joëlle Thollot, Jérémie Turbet.

Mots clés : logiciel de rendu, plaquage de texture, rendu réaliste, simulation d'éclairage, simulation interactive, synthèse d'images.

Résumé :

La création d'images synthétiques impose de définir et de mettre en œuvre un modèle de « rendu », qui spécifie de quelle façon les objets visibles doivent apparaître dans l'image. Deux tendances distinctes se dessinent dans les recherches sur ce sujet, qui sont à première vue antagonistes mais non nécessairement contradictoires. La première vise à permettre un rendu ultra-rapide favorisant l'interactivité, soit en simplifiant les modèles mathématiques, soit en utilisant une stratégie de raffinement progressif ou hiérarchique. La seconde approche concerne la « qualité » des images, notion très dépendante de l'application visée : dans certains cas, l'image la plus satisfaisante sera celle découlant d'une simulation « réaliste » des phénomènes lumineux, qui permet de garantir la fidélité aux phénomènes sous-jacents ; d'autres applications mettront l'accent sur la qualité de l'impression visuelle, et l'absence d'artéfacts dans l'image, deux aspects importants pour fournir une expérience de réalité virtuelle de qualité. D'autres encore chercheront un rendu de type croquis, dessin, gravure ou peinture, distinct de l'apparence simulée et souvent appelé — par défaut — « non-photoréaliste ».

L'activité d'iMAGIS au sein du thème « rendu » couvre tous ces angles d'attaque, à savoir, d'une part, l'étude de méthodes adaptées pour une utilisation interactive de la simulation, et d'autre part la recherche d'algorithmes de simulation permettant un réalisme accru, une meilleure qualité visuelle ou un style de rendu plus expressif.

Dans la première catégorie, nous avons construit et analysé des solutions à base d'images, dans lesquelles nous remplaçons la géométrie complexe par des « décors », accélérant ainsi la visualisation de grands volumes de données 3D. Nous avons également construit des solutions à base d'« habillage » de surfaces classiques simples par des représentations non polygonales, à base de volumes d'une part (*texels*), de relief procédural d'autre part. Nous étudions actuellement des « shaders », fonctions de réflectance réalisant l'intégration analytique des contributions lumineuses des petits détails, ce qui est bien adapté au cas des scènes naturelles (e.g. végétation).

L'axe de recherche sur la simulation réaliste s'intéresse à la définition et à la mise en œuvre de techniques multi-échelles ou progressives pour la simulation de l'éclairage. Le but recherché est de permettre une gradation *continue* entre une image grossière (mais quasi instantanée) et une image de haute qualité, très coûteuse. Nous travaillons dans ce cadre sur la définition des mesures d'erreur (prenant en compte l'application visée), le calcul de gradient de la fonction d'éclairage et aussi le calcul du maillage « de discontinuités ». L'étude du contrôle de l'erreur dans les algorithmes hiérarchiques de simulation participe également de la recherche d'une qualité optimale pour un effort donné. L'« optimalité » visée doit bien sûr être distincte pour des applications en réalité virtuelle, où la continuité et l'impression visuelle dominent, et des applications de type vérification/certification ou design, pour lesquelles la fidélité quantitative est importante. Nous commençons également à explorer l'apport des informations de simulation d'éclairage dans la production d'images « non-photoréalistes ».

Certains axes de recherche se situent au carrefour des deux problématiques : c'est le cas de la simulation de l'éclairage pour des scènes (dites « dynamiques ») dont on peut déplacer les objets. Nous avons notamment proposé et étudié des solutions pour le cas de l'éclairage direct, et l'étude du problème de l'éclairage global, bien plus complexe, est en cours.

Nous travaillons également sur les problèmes posés par la visualisation interactive de maquettes géométriques de très grande taille, ainsi que sur ceux posés par la visualisation de données réparties sur un réseau. D'autre part nous travaillons à enrichir la description des aspects de surfaces tout en restant dans le cadre du temps réel (utile par exemple pour des simulateurs chirurgicaux).

3.2 Animation et modélisation

Participants : Marie-Paule Cani, François Faure, Jean-Dominique Gascuel, Fabrice Neyret, David Bourguignon, Jean Combaz, Gilles Debunne, Eric Ferley, Frank Perbet.

Mots clés : animation, simulation, déformations, collisions, croissance, modélisation géométrique, niveaux de détail, surfaces implicites, textures animées, phénomènes naturels, environnement, simulation chirurgicale, modeler, interaction.

Résumé : *La synthèse de séquences animées pose des problèmes difficiles de calcul de mouvements et de déformations réalistes, et conduit naturellement à rechercher*

une représentation adéquate des objets. Nous explorons trois voies pour permettre la simulation d'objets hétérogènes complexes déformables en des temps raisonnables : la mise au point de représentations multi-couches basées sur des hiérarchies de modèles générateurs simples couplés, la conception de modèles générateurs fondés soit sur des équations physiques locales simplifiées, soit sur des règles phénoménologiques, et le développement d'algorithmes adaptatifs permettant de concentrer à chaque instant la puissance de calcul là où elle est la plus nécessaire.

Les travaux du projet iMAGIS recouvrent les aspects modélisation, simulation, et contrôle du mouvement d'objets complexes, articulés ou déformables. Les « modèles générateurs » qui se développent depuis quelques années en animation de synthèse constituent un outil privilégié pour atteindre ce but. Contrairement aux approches descriptives traditionnelles, ils sont, en effet, capables d'engendrer mouvements et déformations à partir de descriptions physiques ou phénoménologiques des objets, de conditions initiales, et de contraintes éventuelles à respecter au cours du mouvement. De plus, ces modèles sont capables de réagir à des stimuli extérieurs (manipulation interactive, collisions, etc).

Disposer d'une bonne représentation de surface peut être déterminant pour l'animation d'objets complexes. En effet, la surface d'un objet intervient lors de la détection et du traitement des interactions (collisions, contacts) avec d'autres objets de la scène. De plus, c'est cette surface et elle seule qui sera visualisée lors du rendu d'une animation. Nous avons développé depuis quelques années une technique de représentation à base de surfaces implicites (iso-surfaces d'un champ potentiel) qui améliore l'efficacité des détections de collision, offre une modélisation exacte des surfaces de contact, et permet une représentation aisée des changements de topologie (fractures, fusions).

D'autre part, animer des maquettes numériques en des temps raisonnables constitue un véritable défi, dans la mesure où ces maquettes sont le plus souvent destinées à simuler le mouvement et les déformations d'objets hétérogènes complexes du monde réel. C'est le cas par exemple pour la simulation d'organes du corps humain, rendue indispensable par le développement des applications médicales, ou pour celle des phénomènes naturels destinés aux effets spéciaux dans le secteur audiovisuel (coulées de lave, ruisseaux, végétation animée, croissance et déchirures, etc). Le problème de l'efficacité des algorithmes est encore exacerbé pour certaines applications comme les simulateurs interactifs ou les mondes virtuels, pour lesquelles le temps-réel est requis. Notre méthodologie pour aborder ces problèmes s'appuie sur trois axes majeurs :

1. La représentation d'un phénomène complexe grâce à une hiérarchie ou à un graphe de sous-modèles couplés (on parle de « modèle à couches » pour désigner l'ensemble ainsi constitué) : Il s'agit de décomposer, autant qu'il est possible, l'objet ou le phénomène à représenter en une hiérarchie de sous-phénomènes en interaction, pouvant correspondre à des échelles totalement différentes. Le modèle offrant le meilleur compromis entre réalisme et temps de calcul est choisi pour chacun de ces sous-phénomènes, sans hésiter à les simuler à des fréquences différentes, ni à jouer sur la diversité des représentations choisies pour chaque couche. Alors qu'un véritable modèle physique sera utilisé pour certaines d'entre elles, un simple habillage cinématique, géométrique, ou même des textures animées pourront faire gagner en efficacité pour les autres.

2. La mise au point de modèles générateurs adaptés à une échelle et un phénomène donné, les contraintes étant que ceux-ci doivent être efficaces en temps de calcul et facilement contrôlés par un utilisateur. Nous développons d'une part des modèles découlants d'équations physiques locales simplifiées (voire résultant parfois d'analogies), et d'autre part des modèles phénoménologiques (prairies sous le vent, ruisseaux, croissance, textures animées), quand il est plus simple de modéliser et contrôler les effets visibles des phénomènes que leur cause physique.
3. La conception d'algorithmes de simulation adaptatifs, offrant à chaque instant le meilleur compromis entre précision et réalisme. Ces algorithmes permettent d'adapter dynamiquement en cours de simulation, soit la nature des modèles utilisés au sein d'un modèle à couche, soit la précision à laquelle sont effectués les calculs pour un modèle donné. Cette adaptation peut être faite en fonction des contraintes d'efficacité, de précision, et de l'importance de chaque objet dans la scène.

3.3 Géométrie algorithmique

Participants : George Drettakis, Claude Puech, Samuel Hornus.

Mots clés : géométrie algorithmique, visibilité.

Résumé :

Les problèmes de proximité et de visibilité jouent un rôle fondamental dans de nombreux algorithmes de rendu réaliste et d'animation : calculer une vue depuis un point dans l'espace, trouver les objets intersectés par un rayon lumineux pour le lancer de rayons, détecter les objets voisins pour la gestion des collisions en animation, ou encore déterminer les couples d'objets visibles pour le calcul des facteurs de forme en radiosité. Ces problèmes, de nature algorithmique fondamentale, font l'objet de recherches dans le cadre de leur application aux classes d'exemples citées ci-dessus.

Les recherches développées au sein du projet iMAGIS ont en commun de s'intéresser à des problèmes liés à la visualisation d'environnements ou maquettes numériques complexes. Dans bien des cas, même si ce n'est pas le seul élément qui contribue à la complexité de la scène, le nombre de primitives géométriques de base la constituant est très important. Il est alors crucial, surtout lorsque l'on souhaite développer des techniques interactives, de structurer ces données pour pouvoir les traiter efficacement.

Déterminer ce qui est visible dans une direction donnée lors de la visualisation (affichage) d'une scène, ou le faire lors des suivis de « rayons lumineux » (technique du lancer de rayons) ou des calculs d'échanges d'énergie lumineuse (technique de radiosité) en vue de simulation d'éclairage, déterminer s'il y a ou non collision entre objets à un instant donné du déroulement d'une animation, sont autant d'opérations dont l'efficacité est critique du fait qu'elles doivent être répétées des millions de fois avant que le résultat recherché ne soit obtenu.

Deux problèmes jouent un rôle particulièrement important en informatique graphique (ceux évoqués ci-dessus s'y ramènent) et ce sont ceux sur lesquels nous avons jusqu'ici concentré nos efforts : il s'agit du développement de techniques permettant de coder de manière efficace les

relations de visibilité entre objets (points, polygones, etc.) dans une scène, et de techniques permettant de regrouper des objets voisins ou de structurer l'espace en prenant en compte la proximité entre objets.

La *géométrie algorithmique* est un domaine de recherche très actif qui a développé au cours des dernières années un grand nombre de structures et d'algorithmes originaux pour traiter efficacement des objets géométriques. Notre approche est tout à la fois d'aller y rechercher des solutions aux problèmes que nous traitons en vue de les adapter à nos besoins et de contribuer au développement du domaine.

3.4 Réalité augmentée et réalité virtuelle

Participants : Marie-Paule Cani, George Drettakis, Jean-Dominique Gascuel, Gilles Debunne, Raphaël Grasset, Eric Ferley.

Mots clés : réalité augmentée, réalité virtuelle, synthèse de sons, interaction.

Résumé :

Réalité augmentée et réalité virtuelle constituent des domaines d'activité récents pour le projet iMAGIS qui enrichit son savoir-faire sur ces thèmes. D'autre part, nous cherchons à résoudre des problèmes d'environnement temps-réel pour la réalité virtuelle immersive ou augmentée. Nous nous intéressons en particulier à des systèmes où plusieurs utilisateurs sont physiquement ensemble, dans une interaction avec un même modèle virtuel. Ces applications s'inscrivent notamment dans le cadre du studio de réalité virtuelle en cours de montage à l'INRIA Rhône-Alpes.

Étudier des techniques efficaces de simulation et de visualisation interactive de scènes complexes conduit tout naturellement à envisager des compromis entre la qualité du résultat et la rapidité de l'interaction offerte à l'utilisateur. A partir d'un niveau d'interactivité suffisant, si la qualité est par ailleurs « raisonnable », il est possible d'envisager de nouvelles applications, dont celles dites « de réalité augmentée » dans lesquelles objets réels et virtuels coexistent, et même des applications « de réalité virtuelle » dans lesquelles l'utilisateur est immergé dans un monde virtuel.

Nous nous intéressons, au sein du projet iMAGIS, à différents aspects de ce nouveau domaine :

- Nous travaillons sur les problèmes liés à l'éclairage commun, c'est-à-dire la prise en compte des effets de lumière (ombres portées, inter-réflexions) entre objets réels et objets virtuels dans des scènes mixtes. Notre objectif étant d'aider la conception et la modélisation de scènes mixtes virtuelles/réelles, nous nous concentrons sur les algorithmes interactifs.
- D'autre part, nous cherchons à résoudre des problèmes de rendu temps-réel pour la réalité virtuelle partiellement immersive. En particulier, nous développons des techniques de configuration automatique de la caméra virtuelle, de manière à ce que les images de synthèse calculées s'adaptent aux mouvements et gestes de l'utilisateur, ou à la position de certains objets réels.

- Enfin, nous développons de nouvelles méthodes de modélisation et d'animation pour créer des maquettes déformables temps-réel, avec lesquelles nous expérimentons de nouveaux modes d'interaction, via un dispositif à retour d'effort destiné à restituer le sens du toucher. Ces expériences ont lieu dans le cadre de deux projets : la mise au point d'un système de sculpture virtuelle d'une part, et celle d'un simulateur chirurgical d'autre part.

4 Domaines d'applications

iMAGIS développe des outils permettant de concevoir, puis d'utiliser dans le cadre d'applications de taille significative, et en particulier en vue de simulation, des maquettes numériques 3D. Celles-ci peuvent être purement géométriques ou posséder également des propriétés « physiques » (photométriques ou mécaniques, par exemple, parfois sonores).

Les applications visées incluent toutes les applications audiovisuelles (effets spéciaux, jeux vidéos), mais sont loin de s'y limiter, l'utilisation de techniques « avancées » de visualisation correspondant à un besoin largement répandu. Le projet iMAGIS a ainsi été conduit à s'intéresser à des sujets aussi variés que, par exemple, la simulation de risques naturels (éboulements rocheux), les études d'impact (simulation de l'éclairage d'une crypte archéologique avant son ouverture au public), la visualisation d'environnements urbains (que ce soit pour la simulation de conduite ou pour la visualisation de propagation d'ondes radio-téléphoniques), la simulation d'environnements naturels animés et interactifs pour les jeux vidéo, la synthèse de paysages réalistes de type forêt pour la production audiovisuelle, la modélisation d'organes pour la simulation de gestes chirurgicaux, la réalisation de logiciels de simulation de l'éclairage, le développement de techniques de visualisation dans un environnement réparti sur réseau rapide, ou la mise au point d'effets visuels (partage d'objets virtuels par ex.) ou sonores en tant que supports à la vidéo-conférence.

Dans certains cas, il s'agit de concevoir les techniques (modélisation et algorithmes graphiques) sur lesquelles reposent les systèmes « de réalité augmentée » (ou « virtuelle ») dont certains commencent à être utilisés dans l'industrie. Le défi est de fournir aux applications la puissance nécessaire à l'affichage et à l'interaction « temps réel » qui les caractérisent. Ceci a conduit le projet iMAGIS à se rapprocher de fournisseurs de solutions matérielles graphiques performantes.

5 Résultats nouveaux

5.1 Visualisation, rendu et simulation de l'éclairage

Participants : George Drettakis, Nicolas Holzschuch, Fabrice Neyret, Claude Puech, François Sillion, Cyril Soler, Joëlle Thollot, Cyrille Damez, Xavier Granier, Jean-Marc Hasenfratz, Alexandre Meyer, Frédéric Perez, Jérémie Turlibet.

5.1.1 Méthodes hiérarchiques pour la simulation de l'éclairage

Participants : François Sillion, George Drettakis, Cyril Soler, Cyrille Domez, Jean-Marc Hasenfratz, Nicolas Holzschuch, Frédéric Perez, Jérémie Turbet.

Nos travaux portent sur la définition de techniques de calcul hiérarchiques, permettant de réaliser des approximations bien contrôlées et d'accélérer ainsi les simulations. Nous avons en particulier travaillé sur les aspects suivants :

- Nous avons continué à développer la simulation hiérarchique à base de radiosité intégrant une dimension temporelle. L'objectif est de permettre une simulation de grande qualité pour des animations dans lesquelles les mouvements et évolutions temporelles sont connus à l'avance (cas des effets spéciaux pour le cinéma). Par un raffinement hiérarchique couplé dans les domaines spatial et temporel, on peut réduire très fortement les temps de calcul, tout en assurant une qualité maximale selon des critères de continuité temporelle. Nos premiers résultats avaient mis en évidence le potentiel de cette approche, mais aussi le risque d'introduire des effets visuellement gênants à travers le couplage temporel d'instantants différents. Nous avons donc modifié notre approche pour mieux contrôler l'impact des erreurs dans le domaine temporel, grâce à l'utilisation d'une base d'ondelettes pour cette dimension du problème [11].
- Les techniques de simulation à base d'éléments finis, comme la méthode de radiosité, souffrent de la nécessité de spécifier une base de fonctions pour le calcul de la solution, qui impose en général un coût minimal lié à la taille de la scène, correspondant à la définition d'un maillage sur les objets. Une approche extrêmement prometteuse consiste à rechercher un découplage entre la complexité géométrique des objets composant la scène et la complexité des fonctions de base utilisées pour représenter l'éclairage. Ce découplage peut être réalisé par la re-paramétrisation d'objets, mais celle-ci est quasi impossible pour des objets composites et arbitrairement complexes. Nous avons développé deux axes de recherche permettant d'envisager des calculs de radiosité sur des scènes de complexité quelconque.

En premier lieu, une technique d'*instanciation hiérarchique* qui identifie des sous-ensembles répétés dans la scène (de façon exacte ou approchée), et permet de mener un calcul multi-échelles en ne considérant à chaque instant qu'une fraction de la complexité globale de la scène. Cette approche donne en particulier d'excellents résultats pour la simulation de l'éclairage de plantes, discutée un peu plus loin, mais elle est également applicable au cas de scènes architecturales dans lesquelles le mobilier est souvent formé d'éléments identiques.

Nous avons poursuivi nos travaux sur le contrôle du raffinement hiérarchique dans les méthodes de radiosité : en particulier, nous avons mis au point une technique de simplification géométrique adaptée au calcul des échanges radiatifs, et au cas particulier des scènes architecturales. Grâce à l'identification de groupes d'objets (quasi) coplanaires, les temps de calcul sont réduits dans une proportion importante (voir figures 1 et 2).

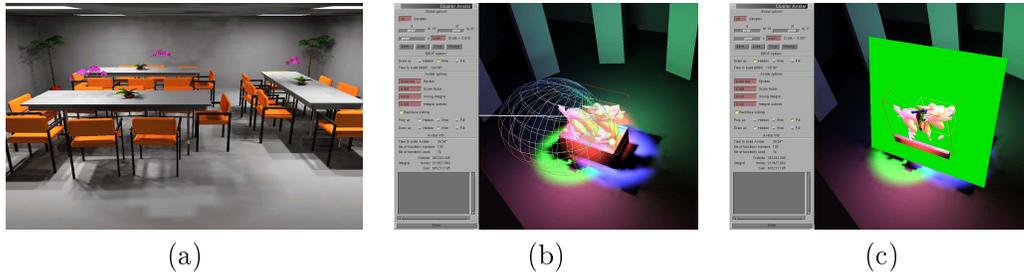


FIG. 1 – (a) Solution d'une simulation par instanciation hiérarchique dans une scène architecturale. (b) Tracé de la fonction de transfert et de la fonction approchée pour une direction incidente fixée (c) Visualisation des plans supports des polygones fournissant une réponse équivalente

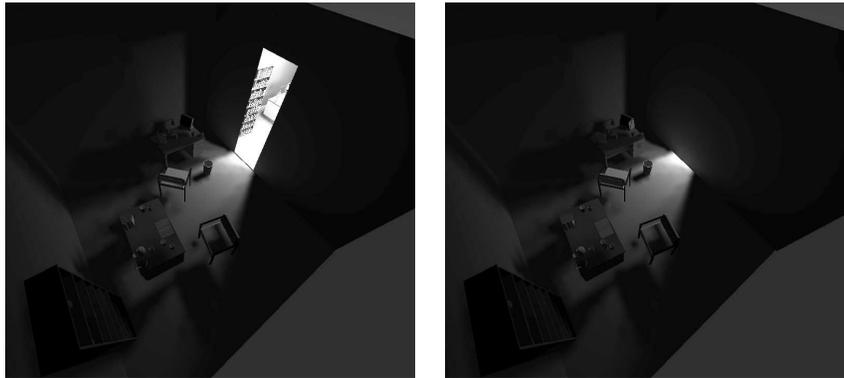


FIG. 2 – Avatars 2D : (a) La simulation de l'éclairage calculée en utilisant les avatars 2D (b) Visualisation des avatars 2D présents dans la scène.

5.1.2 Application de la simulation de l'éclairage à la croissance des plantes

Participants : François Sillion, Cyril Soler.

Dans le cadre d'une collaboration avec le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) nous avons associé une simulation des échanges lumineux à un moteur physiologique de croissance végétale (AMAP). De telles simulations permettent non seulement de prévoir la forme, mais aussi le fonctionnement interne des plantes ou des arbres au fil de leur croissance.

La forte complexité géométrique des scènes végétales, associée au manque de cohérence topologique observé dans ce type de modèles, pousse les algorithmes classiquement efficaces (radiosité hiérarchique avec *clustering*) au delà de leurs limites. Nous avons donc développé des techniques spécialement adaptées à ce cas difficile, en utilisant le principe de l'*instanciation*, qui consiste à économiser de la mémoire en partageant les attributs de la scène (géométrie, fonctions de réflectance,...) qui peuvent être confondus selon un critère de précision fixé par l'utilisateur. Grâce à l'autosimilarité qui existe dans les modèles de végétaux à plusieurs niveaux d'échelle (feuilles, branches, arbres entiers,...), il est en effet possible d'ordonner les calculs de façon à ne conserver qu'une petite partie de la totalité de la géométrie de la scène en mémoire, tout en calculant un équilibre global de l'énergie lumineuse, c'est à dire faisant intervenir chaque partie de la scène.

Couplé à un modèle d'interaction local de la lumière avec les feuilles, notre algorithme nous permet de calculer rapidement des solutions au problème de l'éclairage global dans des scènes comportant plusieurs milliers d'arbres (*i.e* plusieurs dizaines de millions de polygones), comme le montre la figure 3. D'autre part, utilisé pour fournir à chaque pas de temps au simulateur de croissance l'énergie lumineuse reçue par les feuilles, il permet de faire pousser des plantes qui se comportent de manière naturelle, comme le montre la figure 4.

Initié à l'occasion de l'ARC *SOLEIL* (01/99 → 01/01), ce travail se poursuit sous la forme d'une étroite collaboration entre les chercheurs du CIRAD, du LIAMA, de l'Université d'Agriculture de Pékin et d'iMAGIS. La mise au point du système de croissance touchant à sa fin, nous allons entamer une étape de calibration et de validation de l'interaction entre AMAP et le simulateur de l'éclairage, en comparant des mesures statistiques sur des plantations effectuées en serre à des plantes virtuelles cultivées dans les mêmes conditions.

5.1.3 Rendu haute qualité pour des environnements généraux

Participants : Georges Drettakis, Nicolas Holzschuch, François Sillion, Xavier Granier.

Dans le cadre du projet européen *SIMULGEN*, nous avons comparé diverses techniques de représentation de distributions directionnelles, utilisées notamment pour exprimer la répartition de la lumière quittant une surface (ou un groupe d'objets) suivant les directions de l'espace. Avec un choix de représentation (une représentation hiérarchique ici) et une stratégie de raffinement appropriés, nous avons calculé une solution prenant en compte les aspects non-diffus. Cette solution permet l'affichage interactif. De plus notre implémentation a été développée pour être portable sur diverses plates-formes de calcul d'illumination.



FIG. 3 – Scène végétale virtuelle comportant plusieurs centaines d'arbres (2 millions de polygones) dans laquelle une solution d'éclairage global a été calculée grâce à l'algorithme que nous avons développé.

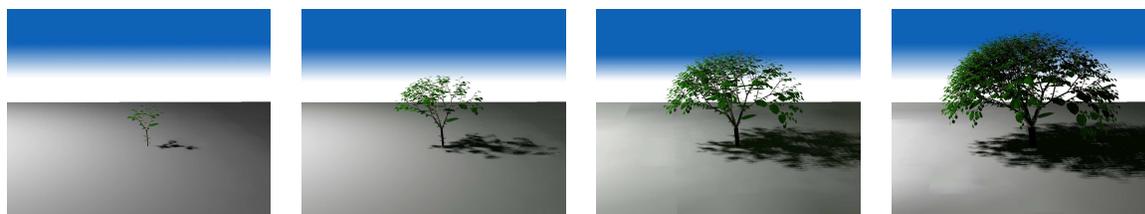


FIG. 4 – Exemple de croissance suivie d'un arbre virtuel influencé par une unique source de lumière (le ciel n'est pas considéré comme tel dans cet exemple). La déformation progressive de la plante ainsi que la non uniformité de son feuillage sont apparents.

5.1.4 Visualisation interactive de données urbaines

Participants : François Sillion, Joëlle Thollot, Xavier Décoret, Michael Wimmer, Peter Wonka.

La visualisation de très grands volumes de données est un problème récurrent dans de très nombreuses applications graphiques : en effet, avec l'avènement de techniques de simulation fiables et des techniques de réalité virtuelle, la croissance du volume de données à traiter est largement supérieure à l'augmentation de capacité des matériels graphiques (pourtant déjà impressionnante!). Par ailleurs, le cas particulier des données urbaines est intéressant à un double titre. Tout d'abord, les applications concernées sont nombreuses, allant des simulateurs de conduite au tourisme virtuel en passant par l'éducation, l'évaluation de projets d'aménagement urbains et les jeux. De plus, la morphologie urbaine impose des contraintes fortes sur la structuration des données, et cette structure peut à notre sens être exploitée pour obtenir des algorithmes de visualisation très performants.

Nous avons poursuivi le développement de techniques de simplification de modèles, visant à remplacer le modèle 3D d'origine par une représentation équivalente sur le plan visuel, mais beaucoup plus rapide à afficher. Notre premier angle d'attaque concerne l'étude de transformations géométriques dans lesquelles un ensemble de faces du modèle est projeté sur un plan unique. Grâce à des bornes d'erreur garanties, il est possible de contrôler la qualité du résultat visuel, tout en réglant par ailleurs et de façon indépendante la texture qui est appliquée sur le modèle simplifié. Au total, il devient donc possible d'extraire automatiquement d'un modèle un ensemble de plans texturés fournissant un rendu correct pour une fraction du coût d'affichage initial.

De plus, nous avons également travaillé sur l'analyse et la création de modèles à base de points échantillons. Les questions posées ont trait à la difficulté de l'échantillonnage d'un modèle 3D (représentation de la complexité visuelle, problèmes d'*aliasing*, apparition de trous dans l'image...). Nous avons proposé une technique de simplification et de rendu qui fournit une représentation compacte (indépendante de la complexité géométrique initiale), adaptée à la résolution de l'image produite et valable pour une zone de visualisation spécifiée. Les effets de variation d'apparence en fonction de la direction de vue sont pris en compte grâce à un filtrage précis des contributions lumineuses, et représentés dans une texture [25].

5.1.5 Éclairage interactif pour des environnements généraux

Participants : Georges Drettakis, Xavier Granier.

Nous avons développé une nouvelle méthode qui, en intégrant un tracé de particules (pour les réflexions non diffuses) à l'étape de transfert d'énergie d'un algorithme de radiosité hiérarchique (pour les réflexions diffuses), permet de traiter efficacement tous types de propagation lumineuse. Cette approche permet un calcul rapide et une simulation de bonne qualité visuelle. Les transferts diffus sont ainsi non bruités, grâce à la radiosité hiérarchique, mais l'on peut également obtenir rapidement des effets non diffus comme des caustiques.

Grâce à un tel système, un utilisateur peut visualiser et manipuler interactivement des scènes de petite taille en tenant compte de tous les effets lumineux. Mais cette simulation globale et

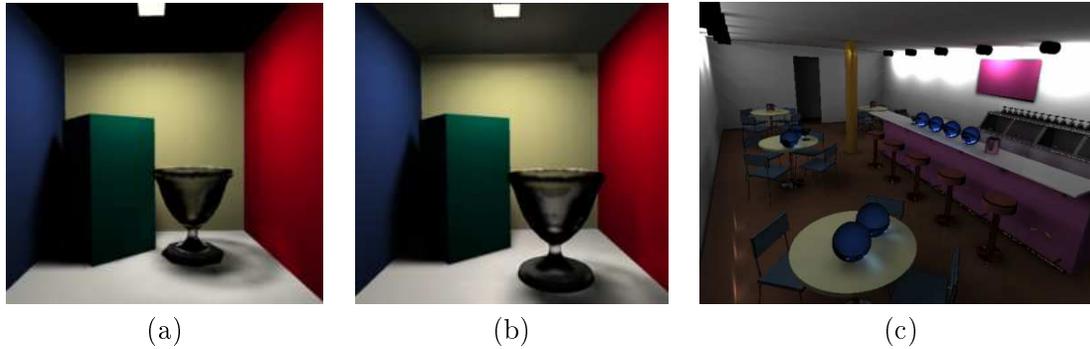


FIG. 5 – (a)-(b) Deux images d'une utilisation interactive : le verre (avec caustiques et éclairage global) se déplace à 1 image/seconde. (c) Simulation d'une scène plus complexe.

générale est applicable aussi à des scènes plus complexes, avec bien sûr un temps de calcul plus long. Ce système peut également traiter efficacement la simulation de l'éclairage indirect. Enfin, il permet une transition douce d'une solution rapide mais de faible qualité vers une solution de grande qualité mais plus lente.

Sur la figure 5(a-b) nous montrons deux instantanés d'un exemple d'une scène pour laquelle notre méthode permet le déplacement du verre avec la caustique au sol avec une vitesse de rafraîchissement de 1 image par seconde. Sur la figure 5(c) nous montrons une image d'une scène complexe, où l'éclairage indirect est prédominant, calculée en 9 minutes.

Ce travail fait l'objet de la thèse de Xavier Granier [2] et a été publié à la conférence Eurographics 2001 [6].

5.1.6 Acquisition et rendu de cheveux

Participants : François Sillion, Stéphane Grabli.

Le développement des jeux vidéo et des systèmes de vidéo-conférence a suscité un intérêt grandissant pour la modélisation d'avatars, ou personnages représentatifs d'un individu particulier. Or, si des systèmes de capture géométrique à base de télémétrie laser ou de correspondance d'images commencent à voir le jour, il n'existe actuellement aucun moyen d'acquérir ou de reproduire l'apparence des cheveux (ou barbes et moustaches) d'une manière permettant l'identification rapide de la personne représentée.

Nous avons lancé un projet de recherche en coopération avec des chercheurs de Microsoft Research et de Stanford University, visant à construire un système complet de capture, modélisation et rendu de cheveux (et autres pilosités faciales). Notre objectif n'est pas de recréer un modèle physique complet de la chevelure, mais de définir un modèle approprié pour permettre un rendu adapté à une application de jeu ou de vidéo-conférence : il est important de pouvoir reconnaître la forme et le modelé d'une coiffure, et de pouvoir modifier les conditions d'éclairage, mais probablement inutile de rechercher un réalisme objectif parfait.

Nous utilisons une approche inverse, fondée sur l'analyse des variations d'apparence de la chevelure lorsque les conditions d'éclairage sont modifiées : le but est de tirer avantage de la très forte anisotropie de la réflexion lumineuse sur les cheveux pour contraindre un algorithme



FIG. 6 – Vecteurs d’orientation des cheveux obtenus par l’analyse, dans l’espace image, d’une séquence d’éclairage variable, et exemple de profil de radiance mesuré pour la séquence d’images.

de recherche d’orientation de mèches en 3D.

Nous avons développé un prototype qui permet de reconstruire un ensemble de mèches 3D avec une bonne fidélité (voir figure 6). Ces travaux seront poursuivis dans l’optique d’une part de compléter l’ensemble de mèches reconstruites en utilisant plus de chemins lumineux pour éclairer le modèle, et d’autre part de se rapprocher d’une analyse en temps réel ou interactif.

5.1.7 Interpolation d’images

Participants : François Sillion, Sylvain Paris.

Poursuivant les recherches menées depuis trois ans sur les représentations à base d’images de la géométrie, nous avons lancé cette année une étude sur la reprojection 3D à partir d’une série d’images obtenues à l’aide d’un ensemble de caméras réparties sur un axe. Ce type de série, acquis par un ensemble de caméras synchronisées, est actuellement utilisé dans les effets spéciaux pour simuler un mouvement de caméra dans un environnement dont le temps « s’est arrêté ». Nous avons montré que l’existence d’un axe de prise de vue permet de reconstruire des profils tridimensionnels même lorsque l’information de texture dans les images est a priori insuffisante pour effectuer une mise en correspondance au niveau de chaque pixel. Nous avons développé une chaîne de traitement permettant d’obtenir un modèle surfacique 3D de bonne qualité, même en présence d’occultations. Pour cela nous combinons un ensemble de traitements morphologiques visant à rendre plus robuste et complète la surface reconstruite, avec une étape de régularisation basée sur un filtre EDP qui conserve les arêtes vives du modèle. L’objectif à terme est d’une part de produire de la vidéo 3D, d’autre part de construire des représentations à base d’images réelles pour fournir un haut degré de détail dans des scènes virtuelles (par exemple urbaines).



FIG. 7 – Représentations alternatives pour la représentation réaliste interactive de forêts. À gauche et au milieu : Textures bidirectionnelles. À droite : Textures volumiques.

5.1.8 Représentations alternatives

Participants : Fabrice Neyret, Alexandre Meyer, Franck Sénagas.

Nous avons poursuivi nos travaux sur les représentations non-polygonales adaptées aux scènes complexes constituées d'un grand nombre de détails pour lesquels on dispose d'une connaissance *a priori* de la répartition. Nous nous intéressons notamment aux scènes naturelles, comme les forêts, dont le calcul du rendu réaliste par les méthodes actuelles est prohibitif et pose des problèmes de qualité visuelle (aliasing).

Nous avons travaillé cette année à une représentation hiérarchique complète à base d'images, de type *texture bidirectionnelle*, permettant d'obtenir en temps réel des scènes forestières avec ombrage dynamique (thèse d'Alexandre Meyer, qui soutient en décembre). Le principe consiste à précalculer des imageries pour une série de points de vues et de sources lumineuses, et à reconstruire par interpolation un « billboard » évolué au moment du rendu. Afin de conserver une occupation mémoire raisonnable, selon la distance ce sont soit les arbres entiers, soit les branchages, soit les touffes qui sont représentées dans les imageries. En outre, nous introduisons une structure hiérarchique de visibilité (*visibility cube map*) qui permet d'obtenir une estimation dynamique des ombres. Ce travail a fait l'objet d'une publication au Workshop Eurographics sur le Rendu [18].

D'autre part, nous avons poursuivi les travaux sur les *textures volumiques en temps réel*, et parvenons progressivement à obtenir une représentation alternative complète des objets complexes (ici des arbres) en s'appuyant sur les fonctionnalités avancées de la nouvelle génération de cartes graphiques (type Nvidia), notamment pour calculer l'illumination en chaque voxel (voir figure 7).

5.2 Animation et modélisation

Participants : Marie-Paule Cani, Fabrice Neyret, François Faure, Gilles Debunne, Jean-Dominique Gascuel, Alexis Angelidis, Damien Hinsinger, David Bourguignon, Eric

Ferley, Frank Perbet, Pauline Jepp, Thomas di Giacomo.

5.2.1 Modélisation par surfaces implicites

Participants : Marie-Paule Cani, Jean-Dominique Gascuel, Eric Ferley, Alexis Angelidis, Samuel Hornus, Pauline Jepp.

Sculpture virtuelle. Nous développons une méthode de modélisation de formes qui vise à restituer le mode d'interaction qu'un artiste peut avoir avec sa sculpture. La représentation de cette sculpture repose sur les surfaces implicites, puisqu'il s'agit de l'iso-surface d'un champ potentiel scalaire tridimensionnel échantillonné sur une grille. L'application d'un outil se fait par édition directe des échantillons stockés. L'outil possède un potentiel propre définissant sa **forme**, et une **action** définissant la manière de combiner son potentiel au potentiel existant (ajout, soustraction de matière, déformations locales, ...).

La poursuite de nos travaux sur ce thème nous a conduit cette année d'une part à la réalisation d'un prototype adaptatif que nous détaillerons ci-après.

Disposer d'une représentation multi-résolution du modèle sculpté est essentiel pour permettre une gestion rapide des déformations à grande échelle, tout en offrant un haut niveau de détail là où c'est utile (voir figure 8). Notre solution repose sur le stockage du champ potentiel scalaire dans un octree généralisé, pour lequel un nœud peut se subdiviser en $n \times n \times n$ nœuds enfants, n étant fixé à la compilation. Cette représentation limite le nombre de niveaux intermédiaires servant uniquement à stocker la structure. La subdivision est guidée par l'outil, qui peut localement imposer une taille d'échantillonnage maximale à atteindre pour garantir un échantillonnage correct de son potentiel. La mise à jour du champ est réalisée par *profondeur* ce qui permet une mise à jour rapide (et grossière) puis un raffinement progressif. L'affichage de la surface sculptée se fait toujours par *Marching Cubes* incrémental réalisé en même temps que la mise à jour du champ, donc en profondeur d'abord. Nous avons limité le nombre de triangles affichés de manière à conserver l'interactivité du système, grâce à des techniques d'élimination des éléments hors du volume de vue (*frustum culling*) et à une limitation dans la descente dans la hiérarchie guidée par une estimation de la taille projetée à l'écran : il est en effet inutile d'afficher les éléments de surface des enfants d'un nœud si la taille de ce dernier est proche d'un pixel.

Dans un but de gain en interactivité, nous avons également exploré différentes implémentations parallèles pour l'application de l'outil :

- création d'un processus par application d'outil ;
- création d'un processus par *profondeur* dans la structure pour éviter les nombreux verrous d'accès aux données nécessaires dans l'approche précédente ;
- création d'un seul processus responsable de l'application de l'outil pour limiter le nombre de processus créés, les machines usuelles étant dans le meilleur des cas mono-processeur.

Nous avons finalement retenu la dernière solution, plus réaliste en nombre de processus créés et ne demandant que très peu de synchronisation pour l'accès aux données partagées. Les résultats de ces travaux ont été soumis à la revue *Graphical Models*.



FIG. 8 – Exemple de sculpture complexe, créée en complétant un objet existant (une tête) convertie à partir d'une représentation polygonale. Le caractère multi-résolution de la représentation a permis d'ajouter des détails à des échelles totalement différentes.

Ces travaux vont également être intégrés à la réalisation d'un prototype industriel de simulation d'opérations dentaires (voir partie 5.2).

Surfaces Implicites Multirésolution. Nous avons d'autre part entamé l'exploration de représentations multi-résolution dans le cadre des surfaces implicites engendrées par des squelettes. Ces surfaces sont des iso-surfaces d'un champ potentiel engendré par un ensemble de primitives géométriques (points, segments de courbes, ou éléments de surfaces).

Notre première contribution, qui a fait l'objet d'une publication à *Shape Modeling International* [10], a porté sur la définition d'une primitive implicite dont le squelette est une courbe de subdivision. Les différentes résolutions disponibles pour le squelette permettent de disposer de différents niveaux de détail sur la fonction potentiel, permettant de recourir à un modèle dégradé si nécessaire, dans le cadre d'une utilisation interactive de ce modèle. Les travaux se poursuivent actuellement par l'étude de primitives implicites engendrées par des graphes de courbes et surfaces de subdivision.

5.2.2 Simulation de l'environnement

Participants : Marie-Paule Cani, François Faure, Jean-Dominique Gascuel, Fabrice Neyret, Frank Perbet, Damien Hinsinger, Sylvain Lefebvre, Thomas di Giacomo.

La réalisation d'effets spéciaux purement numériques demande de savoir modéliser et animer des phénomènes naturels complexes, tout en offrant à la fois des temps de calcul acceptables et un bon réalisme visuel.

Simulation de coulées : ruisseaux, boues et avalanches. Nous travaillons depuis plusieurs années sur la simulation d'effets gravitaires comme les chutes de blocs et les coulées visqueuses, qui avaient débouché en 1999 sur l'animation de coulées de lave visuellement réalistes. Nous avons poursuivi cette thématique en 2000 et 2001 en travaillant sur un projet de simulation visuellement réaliste de ruisseaux, fondé sur des modèles phénoménologiques : le parti

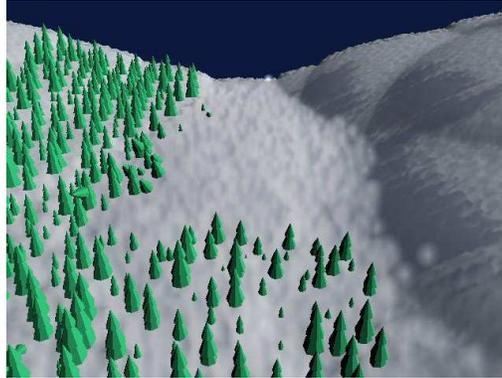


FIG. 9 – Utilisation d’un système de particules pour habiller et visualiser les avalanches de neige dense.

pris est que les attributs visibles du ruisseau en mouvement sont relativement simples à décrire (ondes quasi-stationnaires, reflets, perturbations), tandis qu’une simulation physique réaliste demanderait la résolution d’équations particulièrement complexes (Navier-Stokes non-linéaire, compressible, avec frontière libre et tension superficielle) et une finesse d’échantillonnage déraisonnable. Ces travaux préliminaires ont conduit à un modèle animé sans habillage réaliste, qui reproduit les divers systèmes d’ondes autour des obstacles et du rivage en régime quasi-statique. Ils ont été publiés à la conférence *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation* [19].

D’autre part, nous avons entamé un travail sur la simulation visuellement réaliste de coulées de boue et d’avalanches dans le cadre d’une Action de Recherche Concertée INRIA avec le projet IDOPT (INRIA-LMC/IMAG), le CEMAGREF et le LEGI, intitulée : « Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et d’aide à la décision pour les risques en montagne ». Cette action a bénéficié du soutien de l’INPG dans le cadre du Bonus Qualité Recherche.

Nos premières contributions dans ce cadre ont porté sur l’utilisation d’un système de particules pour habiller et visualiser avec un certain réalisme les avalanches de neige dense. La figure 9 illustre nos premiers résultats.

Les travaux de l’an dernier sur la simulation phénoménologique des ondes quasi-stationnaires à la surface des ruisseaux ont fait l’objet d’une publication à EGCAS [19].

Nous avons engagé des travaux connexes, sur la construction phénoménologique des ressauts hydrauliques. Dans ces deux cas, il s’agit de tirer partie de la forte connaissance disponible a priori (de nature empirique ou analytique) sur les phénomènes naturels pour obtenir une simulation crédible en temps réel, alors que la simulation physique est coûteuse, de faible résolution, et difficilement contrôlable (voir figure 10).

Animation adaptative de la surface de la mer. Nous avons mis au point un modèle efficace et flexible pour générer une surface de mer animée, pouvant être utilisé aussi bien pour calculer des images visuellement réalistes que des animations en temps réel (voir figure 11). L’idée maîtresse consiste à utiliser des représentations adaptatives, à la fois en ce qui concerne

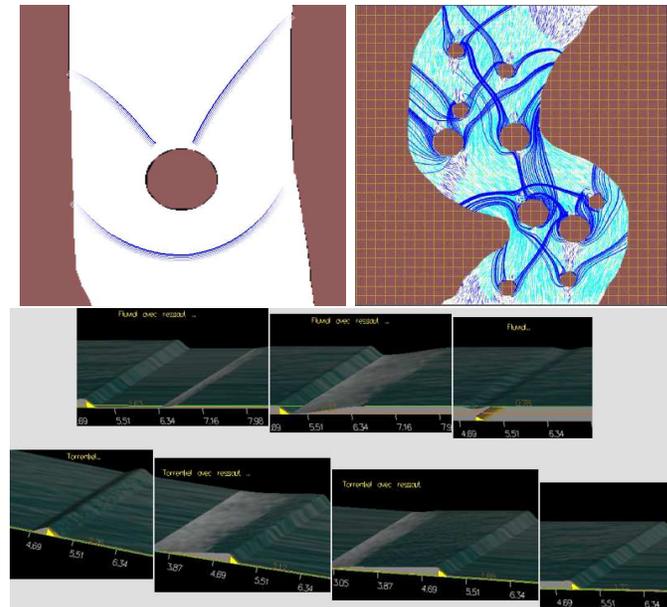


FIG. 10 – Simulation phénoménologique d'ondes quasi-stationnaires à la surface des ruisseaux. *En haut* : ondes de chocs et ridules. *En bas* : ressauts hydrauliques.

la géométrie de la surface animée (l'échantillonnage s'adaptant selon la distance à la caméra), que pour les primitives d'animation représentant les trains de vagues (ces dernières sont filtrées en fonction de la taille des éléments auxquels elles s'appliquent). Ce travail fait l'objet d'un papier en cours de soumission.

Animation interactive de la végétation. Le second volet de nos travaux sur la simulation de l'environnement concerne l'animation de la végétation (nous ne reparlons pas ici des travaux sur la représentation et le rendu des forêts, traités dans la partie rendu). Ce travail s'inscrit dans un cadre d'animation interactive, voire temps-réel, dans la mesure où nous visons une application aux jeux vidéo, dans le cadre d'un contrat PRIAMM avec la société *Infogrames* (voir partie 6.1).



FIG. 11 – Simulation adaptative de la surface de la mer.



FIG. 12 – À gauche : Trace laissée par un rocher roulant dans la prairie. À droite : Arbres animés interactifs.

Nous avons continué le travail sur l'animation de prairies, en développant de nouveaux modèles de niveaux de détail pour la prairie, ainsi que la possibilité d'y laisser des traces. Les trajectoires d'objets ou personnages sont représentées par des lignes brisées, sources d'un potentiel permettant de coucher les herbes (voir figure 12). Ce travail a été réalisé par Sylvain Guerraz, stagiaire de MST ESI2.

Dans le cadre du même projet, l'animation d'arbres a constitué le sujet du stage de DEA de Thomas di Giacomo. Deux modèles ont été développés. Le premier est un modèle procédural de mouvement dû au vent avec niveaux de détail. Le deuxième est un modèle physique permettant l'interaction du joueur ou d'un personnage avec les arbres. Le modèle physique, plus perfectionné et coûteux en temps de calcul, peut être appliqué localement pour répondre aux besoins d'interactions, alors que le modèle procédural est appliqué à toute une forêt. Ces travaux illustrés en figure 12 ont fait l'objet d'une publication scientifique au *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation* [14].

Simulation d'écorces. Dans le cadre de la modélisation semi-automatique de l'état de surface, nous avons démarré des travaux sur les surfaces à déchirures type écorces d'arbre. Nous avons introduit un modèle empirique basé sur la séparation entre une simulation de bandelettes horizontales élastiques en croissance et une propagation verticale des déchirures, la croissance et l'élasticité jouant essentiellement à l'intérieur des failles (voir figure 13).

5.2.3 Animation de formes organiques

Participants : Marie-Paule Cani, Gilles Debunne, Francois Faure, Alexis Angelidis, Pauline Jepp.

Simulation adaptative d'organes déformables. La modélisation de tout ou partie du corps humain est l'un des défis de l'animation de synthèse. Les applications d'une telle modéli-



FIG. 13 – Simulation d'écorces. *En haut à gauche* : des bandelettes à la surface habillée. *En haut à droite* : diverses réalisations en variant les paramètres. *En bas* : résultats.

sation vont de l'enseignement et de l'aide au diagnostic en médecine à l'animation de modèles sophistiqués de personnages pour les applications à l'audiovisuel.

Nous avons développé et enrichi un modèle déformable temps-réel, que nous destinons à la modélisation d'un foie virtuel dans le cadre d'un simulateur de chirurgie (voir les parties 5.4 et 7.2). Nous appuyant sur la théorie de l'élasticité et sur une simulation dynamique (par opposition au cas statique), nous atteignons le temps-réel vrai (le temps de simulation est égal au temps simulé pour le modèle virtuel) en adaptant automatiquement l'échantillonnage dans le temps comme dans l'espace de manière à toujours concentrer la puissance de calcul là où elle est la plus nécessaire. Nous utilisons des maillages tétraédriques indépendants, correspondant à différentes échelles de représentation, et pouvant être localement activés ou désactivés selon la précision nécessaire. Les maillages localement actifs interagissent entre eux par l'intermédiaire de points virtuels. Ce modèle permet une gestion fine des opérateurs différentiels en présence, grâce à la bonne qualité des maillages. L'amélioration apportée par rapport au modèle de l'année dernière est l'introduction d'un tenseur de déformation non linéaire permettant une simulation des déformations beaucoup plus réaliste. Nous avons de plus ajouté une intégration temporelle semi-implicite qui autorise de plus grands pas de temps. Ce travail, réalisé en collaboration avec Mathieu Desbrun d'UCLA et Alan Barr de Caltech, a fait l'objet d'une publication à la conférence internationale *Siggraph* [12].

Ce travail a été prolongé lors d'un stage ingénieur d'été par l'implémentation d'un modèle de collision multi-résolution entre objets déformables. Ce modèle est le premier à utiliser les principes de la multi-résolution qui sont maintenant disponibles en animation pour en tirer parti et traiter les collisions entre objets. On peut ainsi garantir que les zones de collisions seront discrétisées aussi finement que possible lors du contact, ce qui assure une grande précision. L'originalité du modèle est également de proposer une resimplification des zones après contact afin d'alléger la charge de calcul dans cette région qui n'en a plus besoin.

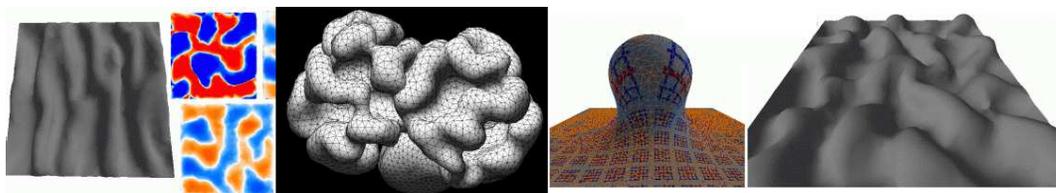


FIG. 14 – Surfaces complexes obtenues à l’aide de textures de dilatation élémentaires.

Nous avons également commencé à explorer l’usage des surfaces implicites multirésolution décrites au paragraphe 5.2 pour l’animation efficace d’un intestin, en vue, à nouveau, d’une application à la simulation de chirurgie (voir la partie 7.2). Très déformables et susceptibles de subir des déplacements importants lorsque le chirurgien les manipule pour dégager la zone à opérer, les viscères ne peuvent être simulés de manière isolée : ils reposent et s’enroulent les uns sur les autres, rendant primordiale une modélisation extrêmement rapide des collisions et des contacts, avec en particulier la prise en compte des inter-collisions. D’autre part, leur structure tubulaire permet d’exploiter une représentation multi-couches pour les animer. Nous avons ainsi opté pour une chaîne masses-ressorts constituant leur squelette, et dont le nombre d’éléments sera adaptatif, habillée par une surface implicite de subdivision, gérant les déformations géométriques locales et pouvant elle aussi être calculée à différents niveaux de détail.

Animation de chevelure. Enfin, nous avons poursuivi notre travail sur la simulation de chevelures, un point important pour le réalisme visuel des acteurs de synthèse. Nous avons déjà mis au point, dans le cadre d’une collaboration avec l’Université de Montréal, un modèle à couches permettant de structurer une chevelure virtuelle en un ensemble de mèches inter-agissantes. Cette technique permet l’animation de longues chevelures en interaction avec le corps du personnage animé. Nous travaillons sur l’animation dynamique des chevelures à différents niveaux de détail, ce qui permet d’importants gains en efficacité. Les détails peuvent être trouvés dans une publication à *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation* [23].

5.2.4 Textures d’animation

Participants : Fabrice Neyret, Jean Combaz.

Textures de dilatation Les travaux sur les textures de dilatation se poursuivent : il s’agit d’offrir un outil de modélisation des surfaces complexes dont la forme résulte d’un mouvement de croissance (e.g. surfaces biologiques ou géologiques), en permettant à l’utilisateur de contrôler la croissance plutôt que la forme elle-même. Le contrôle s’effectue via une texture encodant la nature, l’intensité et l’orientation des déformations, soit explicitement (e.g. carte des rifts et subductions), soit de manière générative (e.g. réticulation, points chauds...) (voir figure 14).

Textures fluides En collaboration avec Ken Perlin à l’Université de New-York, nous avons développé une technique procédurale permettant de simuler qualitativement l’apparence de

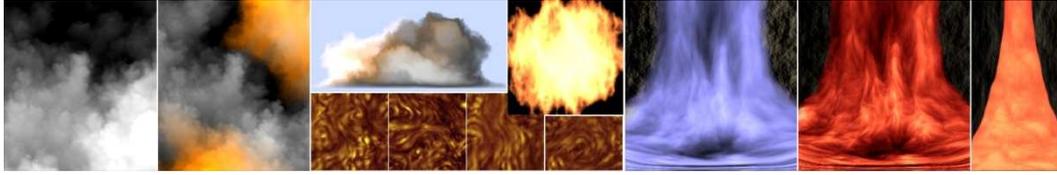


FIG. 15 – Textures procédurales animées simulant divers types de fluides.

fluides (*flow noise*) à l'aide de fonctions stochastiques fractales (les textures de Perlin, qui sont déjà largement utilisées pour simuler divers matériaux comme le bois ou le marbre). Il s'agissait de mieux traiter les aspects temporels, qui n'ont pas les mêmes propriétés que les aspects spatiaux (mouvements corrélés en espace, influences entre les déplacements aux diverses échelles) (voir figure 15). Ce travail a fait l'objet d'une présentation aux Technical Sketches de Siggraph [22].

5.3 Géométrie algorithmique

Participants : George Drettakis, Claude Puech, François Sillion, Joëlle Thollot, Xavier Décoret.

Un point commun à des applications aussi diverses que la réalité virtuelle, les systèmes d'information géographique ou encore la conception assistée par ordinateur, est la complexité des environnements manipulés et des opérations exécutées. Ainsi des opérations telles que le calcul d'une vue pour une image de synthèse ou la détection de l'intersection de deux surfaces polyédriques, lorsqu'elles portent sur un nombre de primitives pouvant atteindre le million, requièrent des structures de données extrêmement performantes.

Faisant suite à une étude sur la conception de structures de données efficaces prenant en compte cohérence spatiale et notions de proximité, les travaux du projet iMAGIS se sont concentrés sur des études portant sur la visibilité.

Notre but est de mettre au point des structures de données et de nouveaux algorithmes de visibilité 3D, et de démontrer leur utilité pour la résolution des problèmes graphiques.

5.3.1 Précalcul pour le rendu des scènes complexes

Participants : Georges Drettakis, François Sillion, Claude Puech, Joëlle Thollot, Xavier Décoret, Michael Wimmer, Peter Wonka.

Notre travail sur le précalcul de visibilité a porté cette année sur la mise en œuvre pratique de ce précalcul dans un système temps réel. Nous avons développé une technique de visibilité « instantanée », dans laquelle deux processus concurrents sont chargés l'un du calcul de visibilité (avec une technique garantissant la validité du résultat dans une région de l'espace autour de l'observateur), l'autre de l'affichage. Les résultats dans le cadre d'une promenade dans un environnement urbain ont démontré la faisabilité de l'approche, Ce travail a obtenu le prix du meilleur article de la conférence Eurographics 2001 [9].

5.4 Réalité augmentée et réalité virtuelle

Participants : Jean-Dominique Gascuel, Marie-Paule Cani, George Drettakis, François Faure, Gilles Debunne, David Bourguignon, Fabrice Neyret, Franck Perbet, Jean-Luc Douvillé, Laurence Boissieux, Raphaël Grasset, Stéphane Gobron, Thomas di Giacomo, Xavier Granier, Éric Ferley.

5.4.1 Mise en place d'une plate-forme de réalité virtuelle

Participants : Laurence Boissieux, Jean-Luc Douvillé, Jean-Dominique Gascuel.

Dans le cadre de la construction de la seconde tranche de bâtiments de l'INRIA Rhône-Alpes, une surface de 130 m² a été réservée pour l'installation d'une Plate-forme de Réalité Virtuelle. Ce projet doit permettre de focaliser un certain nombre d'acteurs des nouvelles technologies de l'information de la région Grenobloise. Il se propose d'être un outil très performant, permettant à la fois :

- d'utiliser une avance technologique déterminante afin de finaliser certains travaux des équipes locales engagées dans des travaux de recherche sur la modélisation, la synthèse d'images, l'animation, l'exploration temps-réel de mondes virtuels 3D, notamment celles du laboratoire GRAVIR (unité mixte entre le CNRS, l'INRIA, l'INPG et l'UJF) ;
- d'attaquer des problèmes durs (au sens scientifique du terme) qui restent à traiter : simulation sonore et intégration son/image, ombres portées entre monde virtuel et réel, interfaces aussi bien matérielles (capteurs à 6 degrés de liberté), logicielles (menus, widgets 3D), que mixtes (retour d'effort), simplification de scènes et traitement de données très complexes, etc.) ;
- le partage de savoir-faire, l'étude grandeur réelle de problèmes de visualisation graphique distribuée, avec des équipes situées ailleurs dans la région (Saint-Étienne, Lyon), en France (Rennes, Nancy), ou dans le monde (Naples, Vienne, M.I.T.), aussi bien qu'avec des acteurs industriels.

Un certain nombre de dispositifs propres à l'interaction en réalité virtuelle et augmentée ont été acquis ou prévus : capteurs de positions et d'orientations (type MotionStar et SAGEIS), lunettes stéréos, bras à retour d'effort (type Phantom), casques d'immersion, etc.

Le super ordinateur graphique SGI, a évolué début 2001 vers une machine Onyx3000 à 16 processeurs et trois canaux graphiques. Ce ordinateur est capable, avec ses outils logiciels, de calculer et d'afficher des scènes hautement complexes en temps réel (25 à 120 images par seconde sur chaque canal).

5.4.2 Environnement multi-utilisateurs pour la Réalité Augmentée

Participants : Jean-Dominique Gascuel, Raphaël Grasset.

Nous étudions des situations de Réalité Augmentée (RA) collaboratives : plusieurs personnes placées autour d'une table, équipées de périphériques peuvent visualiser et interagir avec des éléments virtuels placés dans l'environnement réel (dans notre prototype, sur une



FIG. 16 – Deux utilisateurs interagissent avec des éléments virtuels affichés sur le plateau de jeu. Ils sont équipés de casques et interagissent à l'aide de stylo (les 2 éléments sont suivi grâce à l'utilisation de capteurs).

table visible sur la figure 16). L'utilisation de casques semi-transparent et d'un stylo d'interaction permet de voir (et de manipuler) dans un même espace éléments réels et éléments virtuels (voir figure 17).

La RA permet alors de conserver les métaphores naturelles de communications (verbales, gestuelles, expressions) nécessaires à un travail collaboratif (perdu avec les systèmes immersifs). De plus l'interaction est grandement favorisée par la réunion de l'espace d'action et de perception (contrairement à un système écran-souris-clavier).

L'interaction avec des objets virtuels permet d'apporter un grand nombre de possibilités par rapport à une situation réelle : animation d'objets, simulation complexe, possibilité d'immersion dans la scène, accès à un grand nombre d'informations (internet, base de données).

Les principales difficultés sont :

- la définition d'une architecture logicielle et matériel modulaire et souple.
- le suivi des objets et des mouvements des utilisateurs (tête, main).
- l'erreur d'alignement entre objets réels et virtuels : problème de calibrage, bruits des capteurs et de temps de latence.
- la réalisation de techniques d'interactions spécifiques à la réalité augmentée : tangible user interface.
- l'intégration réaliste entre objets réels et virtuels : occultation, éclairage (voir figure 19).
- la gestion du multi-utilisateurs : vue privée, vue publique.

Dans le cadre de la thèse de Raphaël Grasset, un premier prototype a été réalisé [15, 16]. L'apport d'un nouveau système de suivi (capteur optique), va maintenant permettre la coopération simultanée de plusieurs utilisateurs avec l'environnement, et de définir de nouvelles techniques d'interactions.

Le système peut être utilisé dans de nombreux domaines basés sur une collaboration : visualisation scientifique, planification urbaine et architecturale (voir figure 18), ingénierie, jeu, etc.



FIG. 17 – Vision d'un utilisateur à travers le casque. Des éléments virtuels (personnage, arbres, dragon) sont positionnés sur un plateau de jeu réel.



FIG. 18 – Vision d'un utilisateur à l'aide d'une caméra (simule la perception d'un utilisateur). Dans le cadre de planification urbaine, des éléments virtuels sont positionnés sur une carte réel (feuille blanche). L'utilisateur peut interagir avec les éléments réels (brochure, règle, stylo, feuille) mais aussi virtuels (bâtiments 3D, image 2D, annotation 3D sous forme de cube bleu, menu d'actions, menu de listes d'objets).



FIG. 19 – Intégration entre objets réels et virtuels. Les objets réels (ici des maquettes) peuvent être combinés avec des maquettes virtuelles (bâtiment vert). L'utilisateur peut placer des éléments virtuels directement sur des éléments réels (pion sur le bâtiment).

5.4.3 Sculpture virtuelle

Participants : Marie-Paule Cani, Jean-Dominique Gascuel, François Curnier, Stéphane Gobron, Éric Ferley.

La technologie de sculpture virtuelle, issue d'une thèse CIFRE entre iMAGIS et Renault SA, est en train d'être reprise et spécialisée pour créer un simulateur de chirurgie dentaire (voir figure 20). Dans la pratique, on utilisera un bras à retour d'effort éprouvé (PHANTOM de SenSable), un PC graphique standard, et un logiciel optimisé afin de simuler le fraisage des dents, avec une visualisation et un touché acceptable pour l'opérateur. Ce type de simulateur s'adresse aussi bien à la formation initiale des chirurgiens dentistes qu'à la formation continue des praticiens. Une forte demande existe de la part des universités pour remplacer l'apprentissage sur dents extraites qui n'est plus souhaitable sur le plan éthique et en terme de risque sanitaire.

Un projet d'entreprise soutenue par l'Université Joseph Fourier, le GRAIN (Grenoble Alpes Incubation) et la Région Rhône-Alpes devrait voir le jour au printemps 2002. Elle aura pour objet l'industrialisation et l'exploitation de simulateurs en réalité virtuelle pour l'enseignement de la chirurgie dentaire.

5.4.4 Illustration et annotation en 3D

Participants : Marie-Paule Cani, George Drettakis, Davis Bourguignon.

Même en tenant compte des possibilités offertes par la sculpture virtuelle, l'interaction 3D n'offre pas, jusqu'à présent, la simplicité et la richesse en termes de possibilités expressives inhérentes au dessin 2D. Nous travaillons sur des systèmes interactifs innovants, destinés à permettre l'illustration directement en 3D (le « dessin » est alors visible, et peut être complété, sous tous les angles), ainsi que l'annotation interactive d'un objet tridimensionnel existant, ce

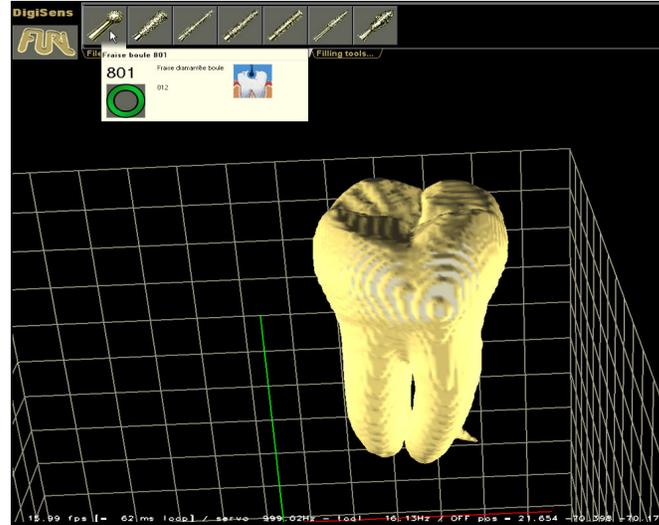


FIG. 20 – Utilisation de la technologie de sculpture virtuelle pour un simulateur de chirurgie dentaire.

qui est particulièrement intéressant en terme d'applications (enseignement, design collaboratif, etc) (voir figure 21).

Notre premier système est basé sur une inférence locale de la forme autour de chaque « trait » tracé par l'utilisateur, dans un plan lui faisant face. Cette inférence permet de faire glisser les silhouettes de manière réaliste lorsque le point de vue change, les traits étant atténués lorsque la probabilité de pertinence de la surface inférée diminue. Un algorithme de rendu multi-passe permet de gérer l'occultation. Ce travail a fait l'objet d'une publication à la conférence Eurographics 2001 [5]

5.4.5 Simulateur de chirurgie

Participants : Marie-Paule Cani, Fabrice Neyret, Gilles Debunne.

La création de maquettes 3D interactives destinées aux systèmes de réalité virtuelle pose un défi spécifique à l'animation de synthèse : au-delà des exigences habituelles de réalisme visuel des déformations, de simplicité de contrôle, et d'efficacité des calculs, il s'agit maintenant d'assurer une réponse temps-réel de la maquette déformable, quelles que soient l'intensité et la nature des déformations que l'utilisateur lui fait subir. Une partie des problèmes à résoudre au sein de l'Action Incitative Télémedecine *CAESARE* (voir 7.2), s'inscrit dans ce cadre. Ainsi, nous avons développé un modèle de foie virtuel qui se déforme en temps réel sous l'action des instruments manipulés par l'utilisateur via une interface à retour d'effort (*Phantom*). Le modèle utilisé est un modèle à couche, qui comprend :

- un **modèle élastique adaptatif**, permettant de calculer en temps réel les déformations de l'organe grâce à une simulation volumique d'élasticité linéaire ;
- une peau géométrique, attachée aux points d'échantillonnage du modèle interne. Cette peau est utilisée pour l'affichage, et lors du **traitement temps réel des collisions** avec



FIG. 21 – Exemples de modèles 3D réalisés avec le système d'illustration 3D décrit à la section 5.4.4.

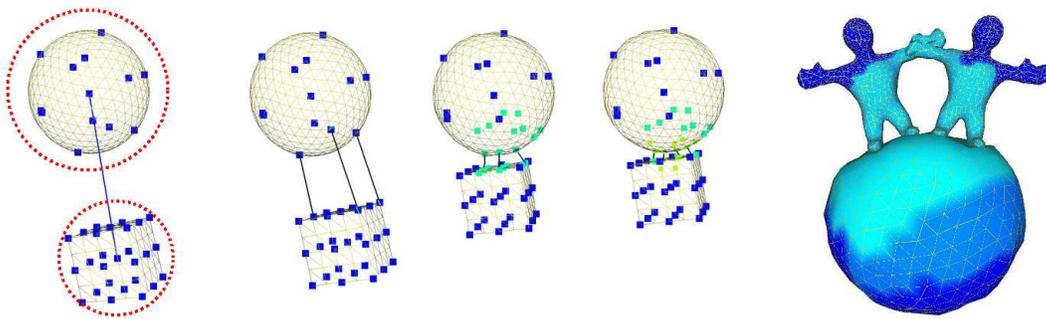


FIG. 22 – Gestion multirésolution des collisions entre deux objets déformables. La couleur représente le niveau de discrétisation utilisé.

les instruments chirurgicaux virtuels.

- des couches de texture permettant de restituer un rendu réaliste de l'organe (modifications cellulaires, reflets), et de tenir compte de son **aspect de surface évolutif**. Ceci comprend la simulation des contusions, du blanchiment, et de la cautérisation.

Une première contribution scientifique réside dans les différents modèles élastiques adaptatifs utilisés pour la première couche, qui ont fait l'objet de plusieurs publications, dont [12], qui a été décrit dans le paragraphe 5.2.

La seconde, concernant le rendu des aspects évolutifs à la surface du foie sous l'action des instruments, s'appuie sur des textures animées à l'aide de *sprites*.

La possibilité d'interagir avec plusieurs objets déformables a été réalisée lors du stage d'été de Stéphane Guy. Un procédé de gestion des collisions multirésolution a ainsi été développé (voir figure 22).

6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

6.1 Végétation animée et interactive pour le jeu vidéo

Participants : Marie-Paule Cani, François Faure, Franck Perbet, Thomas di Giacomo.

Dans le cadre d'un financement PRIAMM nous travaillons avec Infogrames (deuxième entreprise mondiale dans le domaine du jeu vidéo), sur le thème : *végétation animée et interactive pour le jeu vidéo*. A l'heure actuelle, les jeux utilisent encore peu de décors naturels. Lorsqu'ils apparaissent, ces derniers sont presque toujours statiques, en raison du très grand nombre d'éléments à animer. La mise en place d'éléments de végétation dynamiques (prairies, buissons et arbres agités par le vent, ou interagissant avec un personnage) permettrait pourtant d'améliorer considérablement l'immersion du joueur. Notre travail porte sur l'utilisation de représentations à différents niveaux de détail et sur une gestion fine des transitions entre ces représentations pour atteindre le temps-réel malgré la complexité des scènes. Les résultats déjà obtenus ont été présentés dans le paragraphe 5.2, rubrique simulation de l'environnement.

7 Actions régionales, nationales et internationales

7.1 Actions régionales

7.1.1 Plate-forme de réalité virtuelle

Participants : Laurence Boissieux, Jean-Luc Douvillé, Jean-Dominique Gascuel.

La plate-forme de Réalité Virtuelle, décrite à la section 5.4 et située dans le bâtiment de l'INRIA Rhône-Alpes à Montbonnot, a l'ambition et la potentialité de s'appuyer sur les compétences en infographie et simulation, robotique, vision, présentes au sein de la communauté de recherche grenobloise en général, et du laboratoire GRAVIR en particulier.

Elle se propose d'être un outil très performant permettant à la fois :

- La finalisation des travaux des équipes locales engagées dans des travaux de recherche sur la modélisation, le rendu, l'animation, l'exploration temps réel de mondes virtuels 3D (par exemple, dans le cadre de collaborations avec les laboratoires ICP ou TIMC).
- Le partage de savoir-faire, l'étude grandeur réelle de problèmes de visualisation graphique distribuée, avec des équipes situées ailleurs dans la région (Lyon), en France (Rennes, Nancy), ou dans le monde (Naples, Vienne).
- La mise à la disposition des chercheurs d'autres communautés scientifiques de cette plate-forme d'expérimentation.
- La jonction de ces travaux avec les buts poursuivis par l'industrie. La plate-forme réalisée pourra permettre de réaliser des études finalisées permettant de juger et de comparer l'intérêt de solutions de type « réalité virtuelle » dans le cadre de contextes applicatifs précis.

Il faut également noter qu'un laboratoire de parallélisme massif (grappe de 200 PC), sur lequel travaillent les projets APACHE (**ProjetApache**) et SIRAC (**ProjetSirac**), va être installé à proximité. Il est certain que des collaborations scientifiques entre calcul intensif et visualisation interactive verront le jour dans ce cadre.

7.1.2 Projet DEREVE

Participants : Joëlle Thollot, François Sillion, Jean-Dominique Gascuel, Nicolas Holzschuch.

Le projet DEREVE (Développement d'un Environnement Logiciel de Réalité Virtuelle Elaboré) est un projet thématique de la région Rhône-Alpes. Il regroupe 3 laboratoires de la région : le LIGIM (Lyon), ICA (Grenoble) et iMAGIS.

Le but du projet est de trouver des méthodes pour rendre les techniques de réalité virtuelle, à l'heure actuelle très coûteuses en matériel et logiciel, utilisables par le milieu industriel.

Pour cela, trois axes de recherche sont prévus : la représentation des données 3D adaptée à une visualisation rapide, les techniques logicielles propres au temps réel, les aspects interactifs multisensoriels.

François Sillion et Joëlle Thollot, responsables de ce projet pour iMAGIS, participent dans ce cadre à une collaboration avec le laboratoire ARIA de l'École d'architecture de Lyon sur le rendu non-photoréaliste interactif de scènes urbaines complexes.

7.1.3 Simulation de textiles sur grappes de processeurs

Participant : François Faure.

Une collaboration avec l'équipe APACHE (**ProjetApache**) du laboratoire ID a été entamée en septembre 2000. Elle porte sur la simulation physique de textiles en parallèle sur une grappe de PC. Le but est d'accélérer les calculs dynamiques (matériaux déformables soumis à des forces) et géométriques (détection de collisions) pour parvenir à l'animation en temps réel d'un personnage portant des vêtements réalistes. L'entreprise Yxendis basée à Saint-Chamond (42) est partenaire de l'opération, qui a obtenu un soutien financier de la région Rhône-Alpes dans le cadre du programme « Thématiques Prioritaires 2000 ».

7.1.4 Coulées de boue et avalanches virtuelles

Participants : Marie-Paule Cani, Fabrice Neyret, Jean-Dominique Gascuel.

Nous avons entamé une collaboration avec d'autres laboratoires Grenoblois : le CEMA-GREF, le LMC (projet INRIA IDOPT) et le LEGI sur la simulation visuellement réaliste de coulées de boue et d'avalanches, en vue d'obtenir un outil de communication et d'aide à la décision pour les risques en montagne. La prévention des risques passe en effet par des simulations numériques de plus en plus poussées débouchant sur d'importants volumes de données.

Communiquer de tels résultats au grand public, ainsi qu'aux acteurs politiques dont on attend une prise de décision, n'est pas une tâche facile. Le but de notre collaboration est de constituer une chaîne logicielle complète, permettant d'aller de la simulation d'un risque en montagne à sa représentation graphique visuellement réaliste. Les coulées de boue et avalanches virtuelles ainsi produites pourront notamment être visualisées en 3D dans la salle de réalité virtuelle de l'INRIA Rhône-Alpes, où l'immersion pourrait en outre être augmentée par un rendu sonore spatialisé de la coulée. Nous avons obtenu un financement d'ARC locale de l'INRIA Rhône-Alpes ainsi qu'un Bonus Qualité Recherche de l'INPG pour ce projet.

7.1.5 Projet Argos

Participants : Joëlle Thollot, Jean-Dominique Gascuel, Vincent Cantin, Sylvain Trimoreau.

Nous avons commencé une collaboration suivie depuis un an, avec l'équipe ERGA, des universités de Grenoble III - Stendhal et de Grenoble II - Pierre Mendès-France et avec l'École Française d'Archéologie d'Athènes. Notre but est la reconstitution et la visualisation interactive d'une ville grecque de l'époque géométrique au haut-empire, Argos.

L'équipe ERGA apporte une expertise en histoire et en archéologie, ainsi que les données connues sur la ville. Les données archéologiques sont fragmentaires, et un premier travail portera sur la modélisation automatique d'un modèle complet de ville à partir de ces données fragmentaires.

Nous travaillons également sur un rendu interactif de la ville reconstituée, mais dans un style de dessin proche du dessin employé actuellement par les archéologues.

Enfin, la visualisation interactive d'un modèle aussi complexe qu'une ville entière impose une représentation multi-échelle des bâtiments, à base de niveaux de détail.

7.1.6 NeuroRV : Neurosciences motrices et réalité virtuelle

Participants : Jean-Dominique Gascuel, Laurence Boissieux, Olivier Martin [UFR APS, Grenoble], Christophe Prablanc [INSERM, Lyon].

Ce projet a pour but d'étudier les principes d'adaptation de la motricité humaine aux contraintes de l'environnement visuel, en se concentrant sur un double objectif. Pour les spécialistes de neurosciences motrices qui s'intéressent à l'adaptation de la motricité, il s'agit de profiter des avancées technologiques en modélisation et simulation graphique appliquée à la réalité virtuelle (RV) pour étudier l'adaptabilité des fonctions motrices aux contraintes sensorielles et perceptives de l'environnement visuel.

Pour iMAGIS, il s'agit d'intégrer des connaissances sur les interactions fonctionnelles entre la vision et le mouvement observées en environnement réel et virtuel afin d'améliorer l'ergonomie et l'interactivité des environnements d'immersion. Avec pour objectifs la réduction des conflits inter-sensoriels, l'augmentation du confort de l'utilisateur et de l'ergonomie des systèmes.

Ce projet est financé par une ARC locale de l'INRIA Rhône-Alpes.

7.1.7 Digisens

Participants : Jean-Dominique Gascuel, François Curnier, Stéphane Gobron.

Stéphane Gobron, chercheur ingénieur, travaille à iMAGIS sur une extension des travaux d'Éric Ferley sur la sculpture virtuelle. Le projet est de réaliser un simulateurs en réalité virtuelle pour l'enseignement de la chirurgie dentaire. Nous allons dans ce cadre participer à la création au printemps 2002 d'une start-up nommée Digisens. Fondée par François Curnier, chirurgien dentiste, elle bénéficie de l'« appui à la création d'entreprise » de l'Université Joseph Fourier et de la région Rhône-Alpes.

7.2 Actions nationales

7.2.1 CYBER : fusion temps réel d'un animateur réel dans un monde virtuel

Participants : Jean-Marc Hasenfratz, Jean-Dominique Gascuel, Edmond Boyer, Stéphane Jaeger, Sylvain Faisan, Marc Lapierre.

iMAGIS a lancé l'Action Concertée Incitative « Jeunes Chercheurs » CYBER, avec la participation de MOVI (ProjetMovi). Le projet CYBER se propose de fusionner l'image vidéo d'une personne réelle avec un décor virtuel. Le défi est d'assurer une homogénéité visuelle, notamment la cohérence des éclairages et des ombres, à la fois réelles et virtuelles, en temps réel.

On se place dans le contexte d'une présentation devant un public, où un animateur réel évolue dans un décor virtuel. On souhaite que l'animateur interagisse de manière forte aussi bien avec son public, réel, qu'avec son environnement virtuel. Les techniques actuelles sont limitées à des décors sommaires, et l'incrustation de l'animateur est d'un réalisme limité, en particulier sans ombres portées convaincantes, l'éclairage des décors n'est pas cohérent avec celui de l'animateur...

Les recherches à iMAGIS dans le cadre de CYBER porteront d'abord sur la calibration et l'extraction en temps réel d'un modèle de l'animateur, puis sur le ré-éclairage de l'animateur et de la scène virtuelle : on veut que l'animateur influe sur l'éclairage de la scène virtuelle notamment en projetant son ombre, mais aussi en recevant et en réfléchissant l'éclairage qui provient de la scène virtuelle. De plus, nous voulons étudier les possibilités de nouvelles scénarisations profitant du fait que la caméra soit virtuelle. Par exemple, nous nous intéressons à des *traveling* impossibles dans la réalité, comme traverser un mur ou effectuer des changements d'échelle dans une séquence, par exemple pour passer d'un monde macroscopique à un monde microscopique.

7.2.2 Action Incitative Télémedecine « CAESARE »

Conduite par six projets de l'INRIA et le groupe ESI, en liaison avec l'IRCAD à Strasbourg (centre de formation médicale), cette action a pour but la réalisation d'un prototype de simulateur chirurgical pour la laparoscopie (chirurgie non-invasive du foie). Ce dispositif est destiné à terme à l'entraînement et à l'évaluation des chirurgiens, l'une des principales difficultés pour ce type d'opération étant l'apprentissage de la coordination des mouvements. Le travail effectué à iMAGIS, sous la responsabilité de Marie-Paule Cani, porte sur trois aspects : les modèles de déformation temps-réel, l'intégration des méthodes de rendu réaliste temps-réel de l'organe (peau, reflets, lésions) et la gestion des interactions (découpes, interactions avec les organes voisins).

7.2.3 ARC Simulation de Chirurgie Intestinale

Cette action portée par iMAGIS, et qui a débuté en janvier 2001, est menée en collaboration avec deux laboratoires Lillois, le LIFL et ITM, ainsi qu'avec l'IRCAD (centre de formation des chirurgiens à Strasbourg), et la société SIMEDGE, qui commercialise des simulateurs chirurgicaux pédagogiques. Le but de cette action est de concevoir des modèles

d'organes virtuels pouvant être utilisés pour la simulation temps-réel des viscères, en vue de la conception d'un simulateur chirurgical pédagogique dédiés aux cancers de l'appareil intestinal. Cette recherche, déjà évoquée au paragraphe 5.2, est rendue particulièrement ardue par la complexité des contacts et inter-collisions entre les viscères. iMAGIS explore dans ce cadre des modèles multi-couches ainsi que des techniques de simulation adaptatives.

7.2.4 COLOR : CAVE2A iMAGIS-CSTB

Depuis l'implantation de l'antenne iMAGIS à Sophia-Antipolis, une action COLOR (Collaboration Locales de Recherche) entre l'Inria et le CSTB a été lancée sous la responsabilité de T. Vieville (projet ROBOTVIS) et G. Drettakis. Le but de cette action est d'établir une collaboration entre l'équipe Réalité Virtuelle du CSTB et l'Inria, en particulier dans la perspective de la mise en place d'une salle de réalité virtuelle au CSTB à Sophia-Antipolis.

7.3 Actions financées par l'Union Européenne

7.3.1 SIMULGEN (Open LTR 35772)

SIMULGEN, dont les responsables sont N. Holzschuch et F. Sillion, est la deuxième phase d'un projet européen « Open Long Term Research ». Les partenaires sont l'Université de Girone (coordonnateur – Espagne), le Max-Planck-Institut für Informatik à Saarbrücken (Allemagne) et LightWorkDesign (RU). Nous avons étendu le travail effectué pendant la première phase pour développer des algorithmes plus applicables aux problèmes réels et plus proches d'un niveau « pré-produit ». Trois axes sont en cours : des nouveaux algorithmes de résolution par la radiosité étendue, des nouvelles méthodes de reconstruction et des améliorations pour la production d'animation.

7.3.2 Projet PAVR : animation et réalité virtuelle

Le projet européen TMR (Training and Mobility for Researchers) *Platform for Animation and Virtual Reality (PAVR)*, dont Jean-Dominique Gascuel est responsable pour iMAGIS, regroupe onze équipes universitaires (3 françaises, 2 suisses, 1 espagnole, 2 anglaises, 2 autrichiennes et 1 belge) travaillant dans le domaine de la synthèse d'images et d'animations, ainsi qu'une start-up viennoise, Imagination GesMbh. Le but du projet est d'identifier et de résoudre les problèmes communs des systèmes de réalité virtuelle et d'animation. Il s'agit des problèmes de modélisation, d'implémentation, ainsi que d'utilisation et de contrôle sur réseau. Pour cela, nous menons depuis plusieurs années une tâche d'intégration des outils logiciels développés par les différents partenaires.

Dans ce cadre, nous avons invité cette année deux doctorants autrichiens (Peter Wonka et Michael Wimmer) pour 7 mois : d'une part pour combiner les outils d'iMAGIS et de l'Université Technique de Vienne en une plateforme de visualisation urbaine commune, puis pour utiliser cet outil afin de tester des nouveaux types d'imposteurs, compatibles avec des bases de données dynamiques.

7.4 Relations bilatérales internationales

7.4.1 Europe

iMAGIS a développé des liens étroits avec l'Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone) et l'Université de Girone, concrétisés par de fréquents échanges impliquant aussi bien les membres permanents que les étudiants financés par le programme ERASMUS et par le *Computer Graphics Network* d'ERCIM.

Nous entretenons également des liens étroits avec le **Max-Planck-Institut für Informatik** à Saarbrücken, en Allemagne, concrétisés par des échanges d'étudiants, des travaux communs, et des projets européens en commun.

Nous accueillons régulièrement des étudiants de l'Université d'Erlangen en Allemagne pour des périodes de six mois.

Nous entretenons également des relations suivies avec l'Université Technique de Vienne (Autriche). François Faure s'y rend périodiquement à des fins d'enseignement et de collaboration scientifique. Deux doctorants autrichiens, Peter Wonka et Michael Wimmer, sont venus travailler avec François Sillion Juin 2000 à Janvier 2001.

Depuis le début de l'année nous avons entamé une collaboration sous la responsabilité de G. Drettakis, avec la Fondation du Monde Hellénique (Athènes, Grèce) sur deux axes principaux : l'éclairage des sites antiques reconstruits utilisés dans le centre de réalité virtuelle à Athènes (« Kivotos ») et l'utilisation de la réalité augmentée pour l'affichage mixte de sites et édifices archéologiques reconstruits.

7.4.2 Amérique du Nord

Une coopération suivie avec Pierre Poulin, professeur à l'Université de Montréal permet d'échanger des étudiants sur des projets de recherche communs au niveau de la maîtrise au Québec (équivalent du DEA français), et d'assurer la cotutelle de thèses.

Une collaboration a eu lieu avec Alan Barr, Professeur à l'Institut Californien de Technologie *Caltech*, et Mathieu Desbrun, professeur à l'UCLA, sur le thème *Niveau de détail adaptatif en animation d'objets déformables*. Poursuite des travaux de thèses, cette collaboration a cette année donné naissance à une publication à la conférence *Siggraph* [12].

Franck Perbet a bénéficié d'une bourse EURODOC de la région Rhône-Alpes pour aller travailler avec Przemyslaw Prusinkiewicz de l'université de Calgary. Ses travaux traitent de la représentation multirésolution de végétaux.

Pauline Jepp, qui est elle étudiante en thèse à Calgary sous la direction de Brian Wyvill est venue effectuer un séjour de 6 mois à iMAGIS pour travailler sur les surfaces implicites multirésolution.

Dans le cadre de l'accord NSF-INRIA, nous travaillons avec l'équipe « Computer Graphics » du laboratoire d'informatique du M.I.T. sur la prise en compte des caractéristiques morphologiques des scènes urbaines, dans le but de fournir des outils de visualisation et de navigation parfaitement adaptés à ces données.

Nous avons collaboré avec le laboratoire de recherche de la société Microsoft (Microsoft Research, Redmond) et l'université de Stanford sur l'acquisition et le rendu de cheveux.

Nous avons collaboré avec Ken Perlin, de l'Université de New-York, sur la génération de textures animées. Fabrice Neyret est allé travailler une semaine à New-York en Septembre 2000, après que Ken est passé à iMAGIS en 1999. De cette collaboration est née une publication en 2001 [22].

8 Diffusion de résultats

8.1 Animation de la communauté scientifique

Des membres du projet ont été membres des comités de programme des conférences Eurographics workshop on rendering, Eurographics 2001, Symposium on Interactive 3D Graphics 2001, Pacific Graphics 2001, de la *Winter School of Computer Graphics 2001* (République Tchèque) et de la *Spring Conference of Computer Graphics 2001* (République Slovaque).

F. Sillion est membre des comités éditoriaux des revues *ACM Transactions on Graphics* et *Computer Graphics Forum*, président du groupe de travail Eurographics sur le rendu, membre du comité éditorial de la collection Eurographics-Springer Wien, et membre du conseil d'administration d'Eurographics. Marie-Paule Cani est membre du comité éditorial de la revue *Graphical Models*, publiée par Academic Press.

Marie-Paule Cani et Joëlle Thollot sont membres du conseil d'administration de l'AFIG.

Marie-Paule Cani est co-responsable du groupe de travail français sur l'animation et la simulation de l'AFIG et du GDR-PRC ALP depuis mars 2000. Nicolas Holzschuch est co-responsable du groupe de travail français sur le rendu et la visualisation de l'AFIG et du GDR-PRC ALP depuis novembre 2000.

Les membres du projet participent aux groupes de travail d'Eurographics et de l'AFIG sur les thèmes « rendu », « animation et simulation » et « modélisation ».

Marie-Paule Cani est membre du jury décernant le prix de thèse de *SPECIF*.

Plusieurs membres du projet sont impliqués dans des comités de l'INRIA Rhône-Alpes (CUR, CUMI).

Les membres du projet ont effectué des reviews d'articles scientifiques pour les revues et conférences suivantes : IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, The Visual Computer, Pacific Graphics, ACM Transactions on Graphics, Computer Graphics Forum, Eurographics conference, Eurographics Workshop on Rendering, ACM Siggraph, Graphics Interface, IEEE Computer Graphics and Applications, Siggraph Symposium on Interactive 3D, Traitement du Signal, International Journal of Shape Modeling.

8.2 Enseignement universitaire

En plus des activités normales d'enseignement des personnels universitaires (à l'Université Joseph Fourier, à l'Institut National Polytechnique de Grenoble et à l'Université Pierre Mendès-France), les membres du projet interviennent dans l'enseignement du DEA Imagerie, Vision, Robotique de Grenoble, en DESS Ingénierie Mathématique à Grenoble, et à l'École Polytechnique.

François Faure a donné un cours de 22 heures sur la synthèse d'animation à l'Université Technique de Vienne (Autriche).

8.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Les membres du projet ont participé à de nombreuses conférences et *workshops*; on se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste.

Marie-Paule Cani a organisé le colloque d'Informatique Graphique qui a eu lieu à la cité des sciences de la Villette en mars 2001.

François Faure a présenté une conférence invitée au Groupe de Travail Animation et Simulation de l'AFIG, en Mars 2000 à Grenoble.

8.4 Diffusion auprès du grand public

Les membres d'iMAGIS ont participé de façon importante aux journées « Sciences en Fête » sur le stand de l'INRIA.

Fabrice Neyret a participé à un échange avec une classe de troisième du collège Jules Flandrin à Corenc (Isère) dans le cadre d'une action « Passion Recherche ». Il participe au montage de café-science dans ce collège.

Fabrice Neyret participe à l'animation de diverses opérations grand public (hors INRIA) dont les Cafés Science et Citoyens, et le projet Cité de l'Innovation et de la Découverte.

9 Bibliographie

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [1] C. DAMEZ, *Simulation globale de l'éclairage pour des séquences animées prenant en compte la cohérence temporelle*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, décembre 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/Dam01>.
- [2] X. GRANIER, *Contrôle automatique de qualité pour l'éclairage global*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, novembre 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/Gra01>.
- [3] A. MEYER, *Représentations d'arbres réalistes et efficaces pour la synthèse d'images de paysages*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, décembre 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/Mey01>.
- [4] F. NEYRET, *Complexité Naturelle et Synthèse d'Images*, Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier, octobre 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/Ney01>.

Articles et chapitres de livre

- [5] D. BOURGUIGNON, M.-P. CANI, G. DRETTAKIS, « Drawing for Illustration and Annotation in 3D », *Computer Graphics Forum* 20, 3, septembre 2001, p. C114–C122, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/BCD01>.
- [6] X. GRANIER, G. DRETTAKIS, « Incremental Updates for Rapid Glossy Global Illumination », *Computer Graphics Forum* 20, 3, 2001, p. C268–C277, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/GD01>.
- [7] F. NEYRET, R. HEISS, F. SÉNÉGAS, « Realistic Rendering of an Organ Surface in Real-Time for Laparoscopic Surgery Simulation », *The Visual Computer*, 2001, à paraître.

- [8] C. SOLER, F. SILLION, « Texture-Based Visibility for Efficient Lighting Simulation », *ACM Transactions on Graphics* 19, 4, octobre 2000, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2000/SS00b>.
- [9] P. WONKA, M. WIMMER, F. SILLION, « Instant Visibility », *Computer Graphics Forum* 20, 3, 2001, p. C411–C421, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/WWS01>.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [10] M.-P. CANI, S. HORNUS, « Subdivision Curve Primitives : a New Solution for Interactive Implicit Modeling », in : *Shape Modelling International*, Italy, mai 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/CH01>.
- [11] C. DAMEZ, N. HOLZSCHUCH, F. SILLION, « Space-Time Hierarchical Radiosity with Clustering and Higher-Order Wavelets », in : *Eurographics 2001 Short Presentations*, J. C. Roberts (éditeur), Eurographics, p. 35–42, septembre 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/DHS01>.
- [12] G. DEBUNNE, M. DESBRUN, M.-P. CANI, A. H. BARR, « Dynamic Real-Time Deformations using Space and Time Adaptive Sampling », in : *Computer Graphics Proceedings (proceedings of Siggraph 2001)*, Annual Conference Series, ACM Press, août 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/DDCB01>.
- [13] C. FAISSTNAUER, J.-D. GASCUEL, W. PURGATHOFER, M. GERVAUTZ, « Construction of an Open Geometry Server for Client-Server Virtual Environments », in : *IEEE Virtual Reality 2001*, mars 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/FGPG01>.
- [14] T. D. GIACOMO, S. CAPO, F. FAURE, « An Interactive Forest », in : *Computer Animation and Simulation '01*, M.-P. Cani, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann (éditeurs), Springer-ComputerScience, Springer-Verlag Wien New York, p. 65–74, septembre 2001. Proc. Eurographics Workshop, Manchester UK, September 2–3, 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/DCF01>.
- [15] R. GRASSET, X. DÉCORET, J.-D. GASCUEL, « Augmented Reality Collaborative Environment : Calibration and Interactive Scene Editing », in : *Virtual Reality International Conference 2001 (Laval Virtual)*, mai 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/GDG01>.
- [16] R. GRASSET, J.-D. GASCUEL, « Environnement de Réalité Augmentée Collaboratif : Manipulation d'Objets Réels et Virtuels », in : *AFIG '01 (Actes des 14èmes journées de l'AFIG)*, p. 101–112, novembre 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/GG01>.
- [17] A. MEYER, E. CECCHET, « Stingray : Cone Tracing using a software DSM for SCI clusters », in : *Third IEEE International Conference on Cluster Computing*, 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/MC01>.
- [18] A. MEYER, F. NEYRET, P. POULIN, « Interactive Rendering of Trees with Shading and Shadows », in : *Eurographics Workshop on Rendering*, juillet 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/MNP01>.
- [19] F. NEYRET, N. PRAIZELIN, « Phenomenological Simulation of Brooks », in : *Computer Animation and Simulation '01*, M.-P. Cani, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann (éditeurs), Springer-ComputerScience, Springer-Verlag Wien New York, p. 53–64, septembre 2001. Proc. Eurographics Workshop, Manchester UK, September 2–3, 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/NP01>.
- [20] E. PAQUETTE, P. POULIN, G. DRETTAKIS, « Surface Aging by Impacts », in : *Proceedings of Graphics Interface 2001*, juin 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/PPD01>.

-
- [21] F. PERBET, M.-P. CANI, « Animating Prairies in Real-Time », in : *Symposium on Interactive 3D Graphics*, ACM Press, p. 103–110, mars 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/PC01>.
- [22] K. PERLIN, F. NEYRET, « Flow Noise », in : *Siggraph Technical Sketches and Applications*, p. 187, août 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/PN01>.
- [23] E. PLANTE, M.-P. CANI, P. POULIN, « A Layered Wisp Model for Simulating Interactions inside Long Hair », in : *Computer Animation and Simulation '01*, M.-P. Cani, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann (éditeurs), *SpringerComputerScience*, Springer-Verlag Wien New York, p. 139–148, 2001. Proc. Eurographics Workshop, Manchester UK, September 2–3, 2001.
- [24] J. TURBET, F. SILLION, « A graph process for easy design of refiners in hierarchical radiosity », in : *WSCG (Winter School of Computer Graphics)*, février 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/TS01>.
- [25] M. WIMMER, P. WONKA, F. SILLION, « Point-Based Impostors for Real-Time Visualization », in : *EuroGraphics Workshop on Rendering*, juillet 2001, <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/WWS01b>.

Rapports de recherche et publications internes

- [26] C. SOLER, F. SILLION, F. BLAISE, P. DEREFFYE, « A physiological Plant Growth Simulation Engine Based on Accurate Radiant Energy Transfer », *rapport de recherche n° 4116*, INRIA, IMAGIS / LIAMA, février 2001, 31 pages., <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/SSBD01>.