

Rapport INRIA 1994 — Programme 4

Synthèse d'image, animation, modélisation et
simulation

Projet SIAMES

3 mai 1995

Projet SIAMES

Synthèse d'image, animation, modélisation et simulation

Localisation : *Rennes*

Mots-clés : animation de scène (1, 7), calcul formel (1, 7), calculateur parallèle (1, 19), cohérence (1), colorimétrie (1), commande (1, 7), conception par objets (1, 7), contrainte (1, 7), Galerkin (3), géométrie (1), hypercube (1, 19), maillage (3), mécanique (1, 7), mémoire répartie (1, 19), milieu semi-transparent (3), modélisation (1, 3), modélisation déclarative (1), MVC (1, 7), ondelettes (3), photométrie (1), radiosité (1, 3), SIAMES (1), simulation (1, 7), synthèse d'image (1, 3), tracé de particule (3).

Siames est un projet commun Inria/CNRS (URA 227).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Bruno Arnaldi, CR Inria puis professeur Insa depuis le 1^{er} septembre 1994

Secrétaire

Edith Blin, TR Inria

Personnel Inria

Guy André, CR
Alain Chauffaut, IR (Atelier)

Personnel URA 227

Kadi Bouatouch, professeur, université de Rennes 1
Éric Maisel, maître de conférences, université de Rennes 1
Stéphane Donikian, Ater Ifsic puis CR CNRS à partir du 1^{er}
octobre 1994
Annick Leroy, IR CNRS à partir du 1^{er} septembre 1994
Dominique Villard, Ater Insa jusqu'au 30 septembre 1994
Christophe Lecerf, Ater Insa jusqu'au 30 septembre 1994

Chercheur invité

Sumant Pattanaik, post-doc Inria

Chercheurs doctorant

Laurent Cogné, allocataire MESR
Rémi Cozot, bourse Inria
Jean-Charles Gicquel, allocataire MESR
Éric Languéno, allocataire MESR jusqu'au 30 septembre 1994
Jean-Luc Nougaret, BDI CNRS Région
Thiboult Cyril, boursier CEA (basé au CEA)
Anne Bachy, allocataire MESR depuis le 1^{er} octobre 1994
Eric Zeghers, allocataire MESR depuis le 1^{er} octobre 1994
Samuel Carré, bourse CSTB depuis le 1^{er} septembre 1994

Collaborateurs extérieurs

Gérard Hégron, professeur, école des Mines de Nantes
Christian Bouville, ingénieur, CCETT, Rennes

2 Présentation générale et objectifs

Les objectifs de nos études concernent principalement trois axes :

- **l'informatique graphique** : où l'essentiel des travaux consiste à élaborer et intégrer des *modèles*, à définir des *algorithmes* et à étudier les *complexités* des solutions proposées ;
- **la simulation** : notre objectif principal est de pouvoir confronter les résultats produits par nos algorithmes à des valeurs numériques mesurées sur site réel, ceci afin de *valider* expérimentalement les approches et concepts étudiés ;

- **l'organisation système** : pour développer les deux points précédents, nous devons être à même de traiter des cas grandeur nature et valider nos approches par des mises en œuvre.

Plus précisément, les études s'articulent autour de deux champs d'activités complémentaires mais de problématiques distinctes :

- **la simulation d'éclairage** : les algorithmes de synthèse d'image réalistes permettent d'obtenir des résultats de très haute qualité par l'introduction de modèles d'éclairement fondés sur la physique, afin d'évaluer les interactions entre la lumière et les objets ;
- **la simulation de systèmes physiques** : nous abordons la simulation de systèmes physiques sous l'angle des schémas de calcul nécessaires pour la production des équations régissant ces systèmes. Nous étudions aussi la résolution de ces équations (approche symbolique / numérique). Cette approche nous permet d'aborder les problèmes de simulation ou d'animation par ordinateur.

Un thème transversal est aussi activement exploré :

- **les algorithmes parallèles** : la tendance actuelle est largement orientée vers l'utilisation de modèles de plus en plus complexes (forme, mouvement, rendu). Les conséquences directes en sont la forte augmentation des coûts de calcul dus à la production d'images fixes ou animées. Outre les recherches visant à réduire la complexité des algorithmes séquentiels, l'étude des schémas de parallélisation de ces algorithmes revêt un caractère fondamental. Ces travaux sont menés en étroite collaboration avec T. Priol du projet Caps.

3 Actions de recherche

3.1 Synthèse d'image et simulation de rayonnement

L'objectif visé est la simulation du rayonnement lumineux dans des environnements contenant à la fois des objets diffus et spéculaires, et aussi des milieux semi-transparentes tels que fumée, brouillard, feu... Cette simulation peut être effectuée dans les domaines visibles et invisibles (infrarouge). Le but est d'obtenir une simulation la plus précise possible afin d'établir une forte corrélation entre la simulation effectuée et la réalité tout en considérant des environnements complexes en termes de

nombre d'objets et de phénomènes physiques pris en compte. Ceci n'est possible que grâce à l'élaboration d'un modèle d'illumination globale, à une approche physique, à l'utilisation d'outils mathématiques rigoureux et enfin à la conception et la mise en œuvre d'algorithmes efficaces en termes de temps de calcul et de mémoire. C'est l'approche suivie par notre équipe.

Dans un environnement ne contenant pas de milieux semi-transparents, le modèle d'illumination est une équation intégrale. Quant au rayonnement à l'intérieur d'un milieu semi-transparent, il est régi par une équation intégro-différentielle. Dans un environnement contenant des milieux semi-transparents, le modèle d'illumination est la combinaison de ces deux équations. La simulation a donc pour objectif de résoudre parallèlement ces deux types d'équations.

3.1.1 Méthode de Galerkin utilisant les ondelettes

Participants : Kadi Bouatouch, Sumant Pattanaik

Approche déterministe

La méthode de Galerkin est une méthode puissante permettant de résoudre des équations intégrales en approchant une fonction inconnue par sa projection sur une base de fonctions. Les fonctions de luminance sont en général complexes et contiennent souvent des discontinuités. Il n'existe pas de fonctions de base qui s'adaptent à ces discontinuités. C'est pourquoi, on recourt souvent à un maillage des surfaces des objets de l'environnement pour mieux localiser les discontinuités et approcher la fonction luminance sur chaque maille. Les fonctions de base de type ondelette s'avèrent très utiles dans cette situation pour les raisons suivantes :

- le caractère de multirésolution lié aux ondelettes permet un maillage hiérarchique de l'environnement ;
- la propriété de moments nuls contrôle le degré d'approximation de la fonction luminance dans le domaine discrétisé (maillé).

Nous avons mis en œuvre la méthode de Galerkin en utilisant les ondelettes pour simuler l'illumination globale dans un environnement. Nos contributions sont les suivantes :

- nous avons conçu et mis en œuvre un algorithme de maillage adaptatif,
- nous avons proposé l'utilisation d'ondelettes interpolantes pour un calcul rapide des transformations ondelettes,
- enfin, notre algorithme permet de calculer l'illumination globale pour des environnements contenant des objets diffus et spéculaires.

Approche déterministe adaptée aux discontinuités

Pour éviter les problèmes de discontinuité, il est possible d'effectuer un maillage de discontinuité qui consiste à déterminer sur chaque surface des zones homogènes (mailles) ne contenant pas de discontinuité. Ces zones sont par exemple des zones de pénombre et d'ombre. Une fois ces zones trouvées, on peut calculer l'illumination globale de l'environnement en approchant la luminance sur ces zones et sur les autres mailles par une combinaison linéaire de fonctions de base (méthode de Galerkin). Une alternative consiste, toujours dans le cas de méthode de Galerkin utilisant les ondelettes, à utiliser des fonctions de base d'ordre élevé pour bien cerner les discontinuités. Mais nous avons montré que ceci n'est pas possible. C'est pourquoi nous travaillons sur une approche visant à aligner les ondelettes avec les contours de discontinuité, ce qui permettrait d'utiliser l'avantage fourni par les ondelettes en multirésolution.

Approche non déterministe

Si on opte pour un modèle corpusculaire de la lumière, la simulation du rayonnement lumineux peut être réalisée à l'aide de la méthode de *tracé de particules*. Cette méthode consiste à émettre des particules (paquets de photons d'une certaine énergie) à partir d'une source de lumière et dans différentes directions. Après avoir heurté des objets, une particule soit perd complètement son énergie, soit rebondit (est réfléchi), soit est réfractée et par conséquent change de direction de propagation. Le flux de particules réfléchies/réfractées/émises est donné par le nombre de particules (photons) par unité de temps et représente la grandeur physique mesurant la luminosité de tout point de l'environnement. Ces mesures peuvent être obtenues par la méthode de Monte-Carlo. Comme amélioration de la méthode de tracé de particules, nous avons introduit

la notion d'importance. Cette notion permet un contrôle adaptatif du choix de la source de lumière et d'une portion de son énergie à émettre vers l'environnement. Cette amélioration est indispensable pour un déplacement interactif dans des environnements complexes. En effet, selon la région focalisée par l'observateur (caméra), on peut faire un choix optimal de la source de lumière, ce qui permet d'effectuer un calcul rapide de l'éclairage de cette région.

3.1.2 Environnements complexes

Participants : Kadi Bouatouch, Éric Maisel, Sumant Pattanaik

La simulation du rayonnement dans des environnements complexes est très coûteuse en temps de calcul et en capacité mémoire. Elle est d'ailleurs impossible à réaliser sur des stations de travail couramment utilisées du fait de l'immense taille mémoire qu'elle nécessite. Deux stratégies sont alors adoptées par notre équipe.

La première consiste à effectuer précisément la simulation dans la région de l'environnement (que nous appelons région d'importance) focalisée par la caméra, et par conséquent mailler très finement les objets qui s'y trouvent. Le reste de l'environnement est maillé grossièrement, et la simulation y est réalisée de manière moins précise. Ce qui permet de réduire le nombre de mailles et par conséquent la taille mémoire, mais aussi le temps de calcul. Une première mise en œuvre non déterministe (tracé de particules) a été effectuée comme il a été précisé ci-dessus.

La deuxième approche est basée sur la constatation suivante : est-il nécessaire de calculer systématiquement l'échange énergétique entre une surface S et une autre P très éloignée. La réponse est non. Il est plus judicieux de réaliser l'échange entre S et un groupe de surfaces voisines contenant P . Cette approche est appelée stratégie de regroupement (clustering) et son étude est actuellement en cours.

3.1.3 Milieux semi-transparents (MST)

Participants : Kadi Bouatouch, Éric Languéno

Le modèle mathématique décrivant les différents transferts radiatifs au sein d'un milieu transparent est assez compliqué. De même, le calcul de l'illumination globale pour des environnements contenant des MST est un problème extrêmement difficile.

En nous inspirant de travaux effectués par des thermiciens, nous avons proposé et mis en œuvre une méthode de résolution plus générale ne faisant aucune hypothèse sur la géométrie, le nombre de milieux, les propriétés physiques de ces milieux (multiples diffusions, anisotropie, faible ou fort albédo...). Cette méthode s'appuie sur la technique des ordonnées discrètes. Notre algorithme de simulation tient compte aussi des échanges entre milieux MST et objets diffus. L'extension aux objets spéculaires est en cours. Nous souhaitons poursuivre nos travaux en explorant l'utilisation éventuelle de la méthode de Galerkin combinée avec les ondelettes.

3.1.4 Interfaces utilisateurs

Participants : Alain Chauffaut

Étant donné le choix d'orientation vers les interfaces Motif, nous avons développé, pour deux logiciels de synthèse d'images réalistes Visec et Adra, deux interfaces graphiques avec le générateur d'interfaces Builder de Ilog. Ce travail a mis en évidence la complexité de l'interface de programmation des *widgets* motifs. Un développement est donc en cours pour produire une bibliothèque de classes C++ définissant des composants d'interfaces utilisateurs. L'idée est d'encapsuler des *widgets* construits par un générateur d'interfaces pour, à la fois, conserver les avantages d'un éditeur interactif et simplifier l'API de l'interface utilisateur.

3.2 Animation et simulation

3.2.1 Intégration des modèles physiques pour l'animation

Participants : Rémi Cozot, Bruno Arnaldi

Les travaux sur l'animation par simulation des lois physiques ont conduit au développement d'outils spécifiques pour chaque représentation de la matière : solides rigides, solides déformables et système de particules. Le but de ces outils est l'obtention automatique des équations du mouvement ; les algorithmes de calcul des équations sont tous issus d'un formalisme lagrangien.

L'animation de scènes complexes composées d'objets rigides, déformables et de particules impose la possibilité d'interaction et de coopéra-

tion entre les différents outils simulant les différents états de la matière. Les recherches dans ce domaine ont abouti à deux approches :

- une première approche consiste à développer une *physique algorithmique* constituée d'une brique de base et de méthodes de construction ; les différents états de la matière et leurs propriétés sont obtenus par assemblage des briques de base ;
- une seconde approche consiste à étudier et à modéliser les interactions entre les différents modèles ; de telles méthodes arrivent à traiter les actions d'un modèle sur un autre, mais prennent difficilement en compte les interactions bilatérales (actions, réactions).

En jouant sur les deux approches, nous spécifions un modèle intégrant les interactions entre les différents états de la matière et décrit par une représentation homogène. Notre modèle est justifié *a priori* par les recherches menées sur la représentation des systèmes physiques par des abstractions telles le *graphe de lien* (appelé *bond graph*). Nous évaluons, en parallèle, les langages et les outils permettant une implémentation efficace et ouverte du modèle spécifié.

3.2.2 Génération des équations du mouvement

Participants : Laurent Cogné, Dominique Villard, Bruno Araldi

La production de séquences animées en temps-réel reste l'un des objectifs majeurs en animation et en simulation. Dans ce but, les recherches que nous menons portent sur :

- la génération automatique des équations du mouvement de systèmes mécaniques à coût minimum ;
- la phase d'intégration temporelle pour laquelle nous nous intéressons à deux sous-problèmes afférents : le calcul parallèle des équations et l'inversion d'un système linéaire (représenté par son graphe de calcul).

Le premier problème a fait l'objet de nombreuses investigations notamment (et surtout) de la part des roboticiens. Ces recherches ont abouti à deux types d'algorithmes pour engendrer les équations du mouvement d'un système mécanique :

- algorithmes récursifs de type Newton-Euler ; le mécanisme est discrétisé structurellement et les lois de la mécanique sont appliquées à chacun des corps le composant.

- algorithmes issus d'un formalisme lagrangien ; ici les équations du mouvement sont obtenues sous une forme close.

De plus, il est à noter que le domaine d'application de ces algorithmes est restreint aux modèles mécaniques puisque manipulant directement les grandeurs caractéristiques du mécanisme.

Des recherches sur la différentiation ont émergé deux modes de différentiation, les modes *direct* et *inverse* présentant des caractéristiques de complexité calculatoire diamétralement opposées. Ces propriétés nous ont conduit à proposer un algorithme de génération des équations du mouvement d'un mécanisme pour le formalisme lagrangien dont nous avons démontré la complexité calculatoire linéaire. Cet algorithme, contrairement aux algorithmes préexistants, découple totalement le calcul des grandeurs caractéristiques du mécanisme et l'application du formalisme à celles-ci.

De par cette généralité, l'algorithme proposé a un cadre d'application plus large que la génération des équations du mouvement des systèmes mécaniques. Il peut s'appliquer à la génération automatique des équations d'évolution de systèmes issus d'autres disciplines où le formalisme énergétique utilisé est valide comme l'électricité, l'hydraulique, l'acoustique, ..., voire de systèmes pluridisciplinaires.

La génération des équations du mouvement s'appuie sur un noyau de différentiation symbolique dont une nouvelle version a été développée. Ses principales caractéristiques sont : d'une part, l'utilisation du formalisme orienté objets et de la redéfinition d'opérateurs permettant la simplification de l'interfaçage entre le noyau et l'application et facilitant la mise en place de simulations multi-modèles ; d'autre part, l'introduction d'opérateurs vectoriels et matriciels qui, en linéarisant la taille du graphe représentant la matrice jacobienne associée aux équations du mouvement, permet la représentation de modèles mécaniques plus complexes. La génération de code pour le simulateur numérique dédié tire également profit de ces opérateurs, ces derniers se représentant simplement par des appels à des routines efficaces de bibliothèques numériques d'algèbre linéaire (telle que BLAS).

L'efficacité du code numérique séquentiel étant encore insuffisante pour des mécanismes complexes, la génération de code parallèle est à l'étude. L'analyse du problème a permis de l'apparenter à un certain nombre de recherches sur la répartition de graphe sur machine parallèle. Les algorithmes existant ont le double inconvénient de mal gérer les graphes à

grain fin et d'être d'une relative complexité. Là encore, le nouveau noyau de différentiation se révèle utile puisqu'il permet à la fois d'augmenter la granularité du graphe d'expressions et d'en diminuer la taille.

Lors de l'intégration temporelle des équations du mouvement, connaissant un état du système, on cherche à calculer son état au pas de temps suivant. Au cours de ce calcul, on doit résoudre un système linéaire $AX=B$ où A est le jacobien du système d'équations. Relativement au graphe de calcul, cela revient à calculer le graphe biparti représentant son comportement E/S puis à inverser celui-ci. Une étude a porté sur la transformation du graphe de calcul représentant le jacobien étendu afin de se ramener à un graphe directement inversible. Les avantages de l'algorithme développé sont d'une part sa faculté à prendre en compte automatiquement le caractère potentiellement creux du jacobien et d'autre part la complexité calculatoire linéaire du jacobien étendu.

3.2.3 Contrôle du mouvement

Participants : Jean-Luc Nougaret, Bruno Araldi

Plutôt que de laisser la charge de l'animation à l'utilisateur, les modèles physiques générateurs de mouvement peuvent être la base d'un système d'animation réaliste par principe. L'idée est de soumettre tout déplacement aux lois de la mécanique, ce qui revient à simuler le mouvement de systèmes mécaniques articulés. Notre simulateur dérive automatiquement les équations dynamiques du mouvement en calcul formel à partir des caractéristiques du mécanisme. Il prend en entrée les actions appliquées et rend en sortie les valeurs des paramètres caractéristiques de l'état. Les actions et les déplacements sont liés par une relation de cause à effet représentée par les équations dynamiques. Avec les modèles générateurs on explicite donc les causes du mouvement, lequel est alors généré automatiquement par une simulation mécanique. En animation, c'est pourtant les effets que l'on souhaite maîtriser : l'animateur désire imposer un comportement désiré aux objets mobiles de la scène. Se pose alors la question difficile, de stimuler correctement le modèle mécanique de manière à observer les effets désirés. C'est là toute la problématique du contrôle du mouvement.

Les recherches actuelles portent sur le contrôle et le réglage, par optimisation de gestes naturels dans le cadre de l'animation. De manière à accroître les possibilités de contrôle par l'animateur, tout en assurant

le réalisme physique, nous cherchons aussi à formaliser une approche hybride combinant manipulation cinématique et méthodes dynamiques, dans les limites de leur légitimité : par exemple nous avons validé une technique de réglage automatique du mouvement, basée sur l'utilisation conjointe de l'optimisation non-linéaire et des réseaux d'ondelettes, ce qui permet de conférer une certaine flexibilité à un mouvement de référence pré-enregistré (fig. 1).

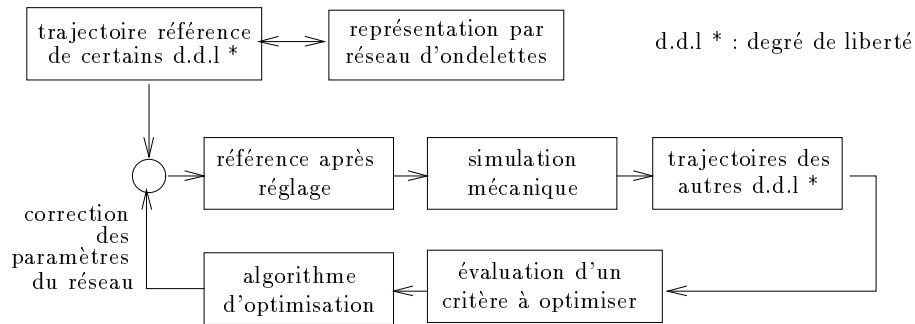


Figure 1 : Boucle de réglage d'un mouvement de référence

3.2.4 Structure de commande interactive pour animation-simulation

Participants : Guy André, Christophe Lecerf

L'informatique graphique a évolué progressivement de la synthèse d'images réalistes vers l'animation de scènes complexes. L'animation peut être abordée en toute rigueur comme une véritable simulation, ou bien peut donner lieu à une algorithmique plus spécifique, mieux adaptée aux besoins de l'animation. En se basant sur le système de simulation dynamique développé précédemment, les travaux actuels portent sur l'extension indispensable : le contrôle. Trois aspects sont considérés : l'algorithmique, la commande interactive, l'architecture de contrôle-commande, applicables soit dans un contexte simulation (avec critères de représentativité et de précision) soit dans un contexte d'animation (avec critère d'interactivité en ligne et contrainte de temps réel).

La possibilité d'interaction de l'opérateur ou de l'animateur, avec le modèle simulé constitue une fonction importante. Ce critère permet de

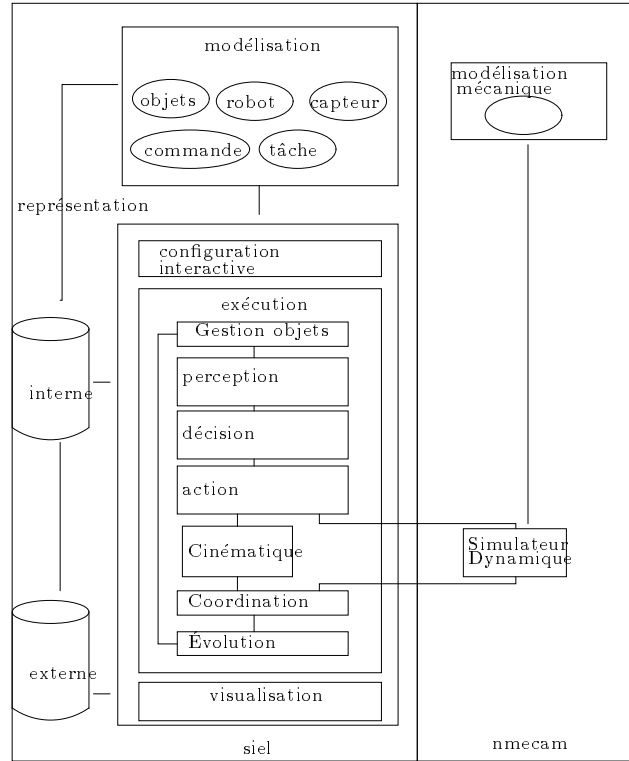


Figure 2 : SIGMA : structure prototype pour animation et simulation

distinguer les techniques en ligne, qui correspondent à une simulation-animation directe en temps réel, et le mode hors-ligne, qui fait l'objet d'une simulation différée. Les algorithmes de contrôle élémentaire de systèmes dynamiques ont été étudiés du point de vue de l'animation par ordinateur. Une analyse comparative de plusieurs classes a été effectuée, en mettant en évidence leur applicabilité pour l'animation. Ainsi certaines techniques de commande optimale (hors ligne) se révèlent intéressantes pour la production automatique de trajectoires, peu intuitives pour l'animateur. Par ailleurs, des techniques de contrôle du mouvement, s'interfacant avec les modèles cinématiques et dynamiques, et prenant en compte le pilotage en ligne par un opérateur ont été mises en œuvre. Deux classes de méthodes ont été identifiées et comparées. La première constitue ce que l'on appelle le contrôle par les actions, sous forme de synthèse portant uniquement sur les consignes, et de commande à retour

d'état issue de la robotique. La deuxième est plus spécifique à l'animation et constitue ce que l'on appelle le contrôle par contraintes. Cette technique peut être vue comme une modification en ligne de la structure même du modèle dynamique, en insérant des équations additionnelles représentant différentes contributions, faciles à spécifier pour l'animateur : contraintes et fonctions orientées tâche ou pilotage par l'animateur. Ces équations sont traitées globalement et en ligne dans le module d'intégration des équations du mouvement du simulateur numérique temps réel.

À un deuxième niveau, nous nous sommes intéressés à la prise en compte de modèles d'interaction et de capteur virtuels, de manière à établir les fondements d'une structure de contrôle-commande en boucle fermée, pour la génération automatique de trajectoires dans un environnement complexe et/ou évolutif. Cette fonction de perception de l'environnement est fondamentale pour faire évoluer les techniques d'animation, jusqu'à présent purement graphiques, vers l'animation d'entités dotées de véritables propriétés robotiques (évolution vers l'animation comportementale). Une réflexion pluridisciplinaire, menée sur les similitudes et les spécificités entre deux domaines : la simulation robotique et l'animation par ordinateur a permis de dégager des perspectives intéressantes.

Dans ce cadre, nous avons développé le système SIGMA, dont la version de base est issue du couplage entre les logiciels SIEL et NMECAM de l'Irisa. Cet environnement prototype, implémenté sur station Silicon Graphics, préfigure les fonctionnalités d'un système générique d'animation-simulation (figure 2).

Plusieurs applications démonstratives mettent en évidence la simulation dynamique temps réel, la prise en compte de contraintes et de capteurs, et le contrôle en ligne, par exemple : simulation dynamique d'un véhicule automobile et pilotage, simulation-animation et pilotage d'une chaîne polyarticulée en ligne (par contraintes), simulation-animation et pilotage d'un robot monopode équipé d'une gamme de senseurs (intervenant pour l'interaction avec le sol et la navigation).

3.2.5 Animation comportementale

Participants : Guy André, Stéphane Donikian

Le but des modèles comportementaux est de simuler le comportement de toutes sortes d'individus vivants (plantes, animaux et êtres humains). Les modèles comportementaux peuvent être classés en deux catégories :

- les modèles de transformation interne, provoquant des changements externes de l'objet (croissance de plantes, muscles, etc),
- les modèles d'animation externe, définissant le comportement extérieur d'un être, ses actions et ses réactions, de manière individuelle (animal, humain) ou collective (nuée d'oiseaux, banc de poissons, troupeau de mammifères).

Les modèles d'animation externe sont tous fondés sur un système relationnel entre des acteurs et leur environnement ce qui implique deux types de relations : la perception et l'action. Plusieurs approches ont été étudiées dans la littérature pour la définition du modèle décisionnel : stimulus / réponses, règles de comportement, environnements prédéfinis et automates. Le constat que l'on peut faire de ces différents travaux est que ce sont des modèles ad hoc conçus pour être appliqués à chaque fois sur des cas particuliers, dans lesquels les objets et leur environnement sont relativement simples et les champs de perception et d'action limités. Aucun des modèles précédents ne s'est intéressé vraiment au problème de la prise en compte du temps dans la phase d'exécution, or le problème se pose à partir du moment où l'on fait évoluer dans un même monde plusieurs entités fonctionnant à des fréquences propres différentes. Le temps joue aussi un rôle essentiel dans la phase de spécification du comportement d'une entité (mémorisation, prédiction, durée d'une action, séquençement de tâches).

Nous avons cherché à unifier ces différents modèles décisionnels et à les étendre à la prise en compte du temps. Un modèle de ces entités comportementales a été spécifié, dans lequel chaque entité est décomposée en quatre parties : perception, décision, action, communication.

Les parties perception et action sont en fait des interfaces avec des modèles de perception (capteurs) et d'action (commande par retour d'état de modèles générateurs). Le modèle décisionnel a quant à lui en charge la définition de son nouvel état en fonction de la perception qu'il a de son environnement, à la fois au travers de la mémorisation de

connaissances historiques (observation + interprétation), l'évaluation de l'état courant et l'anticipation du futur immédiat (modèle prédictif). A partir de ce nouvel état et des éléments fournis par l'utilisateur et/ou le scénario, il doit définir un schéma d'actions qui pourra être remis en question dans le futur (événements prioritaires comme par exemple une collision potentielle).

Le modèle décisionnel est décomposé en un ensemble d'agents spécialisés utilisant eux-mêmes un certain nombre d'experts avant de proposer leur diagnostic à l'agent décisionnel (superviseur) qui les intègre. Le superviseur est constitué d'automates parallèles hiérarchisés (collaboration avec le projet EP-ATR), chaque état d'un automate étant soit un automate lui-même, soit un état terminal devant proposer une action élémentaire à exécuter. La synthèse de l'ensemble des actions proposés doit ensuite être effectuée. Ce système est de plus temps-réel afin d'avoir une bonne adéquation avec les fréquences propres de perception et d'action du ou des utilisateurs de la plate-forme.

3.2.6 Plate-forme de simulation

Participants : Bruno Arnaldi, Stéphane Donikian, Guy André, Alain Chauffaut, Rémi Cozot, Laurent Cogné, Dominique Villard, Eric Maisel

Notre ambition, à travers ce projet d'équipe, est de réaliser une plate-forme logicielle de simulation et d'animation qui permette d'intégrer de manière homogène les différents travaux issus des thèmes de recherches développés dans le projet.

Afin d'être générale, la plate-forme de simulation doit intégrer les différents modèles (générateur, descriptif et comportemental) de contrôle du mouvement et des interactions d'objets dans une scène. Un système de simulation est constitué d'un certain nombre d'entités, dont l'état évolue au cours du temps, chaque entité possédant une fréquence propre de calcul. La plate-forme doit donc permettre la simulation, sur une même échelle temporelle, de plusieurs entités dont la synchronisation et les communications seront gérées par un noyau temps-réel. L'architecture logique que nous proposons pour le système est composée d'un contrôleur général, de blocs élémentaires et de canaux de communication (cf figure 3).

Le contrôleur général est chargé de l'exécution d'un script de simulation fourni par l'utilisateur et doit aussi assurer la synchronisation des dif-

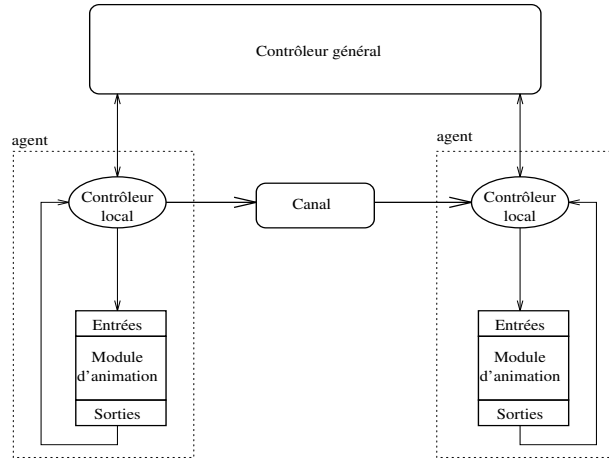


Figure 3 : vision structurelle de l'architecture logique de la plate-forme

férents blocs. Les blocs sont constitués chacun d'un contrôleur local et d'un module d'animation/simulation (descriptif, comportemental, générateur, acquisition et restitution de données). Un module de simulation est constitué d'un ensemble d'entrées, d'une fonction de transfert et d'un ensemble de sorties. Il est cadencé par une horloge et ainsi, après une phase préliminaire d'initialisation, il doit être capable d'effectuer à chaque top d'horloge un pas de simulation, c'est-à-dire d'évaluer la fonction de transfert avec les entrées présentes et de fournir une nouvelle valeur des sorties. Le calcul n'étant pas instantané, un signal est émis lorsque le calcul est terminé. Un contrôleur local est chargé du pilotage du module de simulation auquel il est relié ; il possède une liaison bidirectionnelle avec le contrôleur général, afin de recevoir des tops d'horloge et des commandes, et de fournir des informations au contrôleur général (retard d'évaluation, détection de collision, etc). Un réseau de canaux de communication relie les contrôleurs locaux entre eux, permettant ainsi le passage d'informations entre modules. Les contrôleurs locaux étant cadencés par des horloges différentes, il est nécessaire de définir un schéma de communication prenant en compte les différentes possibilités (sous et sur-échantillonnage, interpolation, extrapolation, filtrage).

Plusieurs expérimentations de la plate-forme ont été effectuées dans le cadre d'une simulation de conduite automobile. Une première mise en œuvre modulaire mono-processus de ce système a été effectuée, dans laquelle la synchronisation et le contrôle des différents agents sont spéci-

fiés à l'aide du langage synchrone temps-réel Ssignal (collaboration avec le projet EP-ATR). L'échange de données entre agents a lieu au travers d'un tableau noir (structure de données commune). Afin de permettre une exécution distribuée, deux études ont été réalisées pour la mise en œuvre du noyau temps-réel : l'une portant sur PVM (Parallel Virtual Machine) et l'autre sur CHORUS :

- PVM est un logiciel qui permet de gérer un réseau de machines hétérogènes comme une unique machine parallèle. L'étude a montré que PVM ne satisfait pas la contrainte temps-réel, mais permet de traiter facilement l'aspect distribué quel que soit le type de machines à notre disposition. Ceci doit nous permettre de mettre en œuvre rapidement un prototype de la plate-forme, avant le passage vers des systèmes temps-réel dur .
- CHORUS est ce qu'on appelle un micro-noyau. De façon générale, un micro-noyau fournit un ensemble de fonctionnalités minimales pour la mise en œuvre de toute application ou service réparti :
 - le cadencement et le contrôle de l'exécution des processus,
 - les communications entre processus,
 - la gestion de la mémoire virtuelle.

À travers une collaboration avec le projet Solidor, une mise en œuvre du noyau temps-réel de la plate-forme a été réalisée qui permet le traitement des contraintes temporelles, la détection des violations de ces contraintes et le traitement de ces violations. Cette première étude ne permet pas la gestion dynamique de la plate-forme (changement de fréquence, naissance ou mort d'un module), mais offre néanmoins une base intéressante pour la réalisation de la plate-forme sur une architecture spécialisée (CHORUS étant une sous-couche système d'UNIX). Des expérimentations seront menées sur un réseau ATM (très haut-débit).

3.2.7 Projet Esprit-Bra Charm

Participants : Bruno Arnaldi, Jean-Luc Nougaret

Nos travaux sur le contrôle du mouvement s'appliquent directement aux thèmes de recherche abordés dans le projet Charm (*a Comprehensive Human Animation Resource Model*), avec comme partenaires :

l'université de Las Islas (Baléares), l'école des Mines de Nantes, l'hôpital Saint-Louis (France), l'EPFL (Suisse), l'université de Lisbonne (Portugal), l'université de Genève (Suisse) et l'université de Karlsruhe (Allemagne). L'objectif de ce projet est d'étudier la modélisation du corps humain dans le but de pouvoir effectuer des simulation physiques des mouvements et des déformations. Notre contribution à ce projet consiste à étudier les méthodes de haut niveau permettant de contrôler efficacement les mouvements (cf section 3.2.3).

3.2.8 Projet Praxitèle

Participants : Bruno Arnaldi, Stéphane Donikian, Rémi Cozot

Nous intervenons dans le projet Praxitèle, pour lequel plusieurs projets Inria sont impliqués ainsi que plusieurs partenaires industriels (CGEA, Renault, EDF) et l'Inrets.

Notre contribution à ce projet consiste à créer un environnement de simulation permettant de simuler physiquement un train de véhicules tout en permettant à l'utilisateur de simuler ses algorithmes de contrôle dont les points d'entrée sont les informations provenant de capteurs virtuels (ex : caméra embarquée).

Le flot de circulation automobile constitue un des éléments de l'environnement à simuler. Le flot de circulation consiste en un ensemble de véhicules évoluant sur un réseau routier muni d'une signalisation. À des fins d'expérimentation, un premier réseau routier a été modélisé. Cet exemple est constitué d'une scène tridimensionnelle composée d'un terrain sur lequel se trouve une route en forme de huit et des véhicules (un piloté par l'utilisateur et deux en conduite automatique). Le carrefour est muni de feux de signalisation permettant de gérer son fonctionnement. Par souci de simplification, nous ne traiterons pas complètement la vision humaine : nous la remplacerons par une connaissance a priori de la géométrie de la scène 3D, et les capteurs n'ont à fournir que des informations qualitatives sur les objets visibles à partir d'un point de vue (position du pilote) dans un cône de vision défini par un angle d'ouverture, une distance maximale et une direction de vue.

Un modèle de pilote de véhicule, issu des travaux sur l'animation comportementale, a été spécifié et des premières validations ont été effectuées dans cet environnement de simulation relativement simple. Plusieurs extensions vont être effectuées afin d'améliorer l'environnement de simu-

lation. Tout d'abord, un modèleur d'environnements urbains est en cours de réalisation qui doit permettre de générer la base de données géométriques et le réseau de trajectoires, mais aussi une base de connaissances sémantiques sur la scène, indispensable pour un contrôle de haut-niveau de la simulation. Des modèles simplifiés d'humanoïdes, ainsi que différents modèles de véhicules (camion, bicyclette, etc), viendront eux aussi enrichir l'environnement de simulation.

3.2.9 Projet Téléopération

Participants : Guy André, Cyril Thibout

L'Irisa a une longue expérience de collaboration fructueuse avec le CEA sur le thème Téléopération Assistée par Ordinateur (TAO). Les techniques d'animation, de simulation et de synthèse d'image sont directement concernées sur plusieurs aspects : modélisation interactive d'environnement, utilisation d'un simulateur graphique hors ligne et en ligne, combinaison des retours d'informations (imagerie synthétique réaliste ou symbolique, retour d'effort, ...). On peut citer de plus, le concept de téléprésence qui représente une application idéale des technologies de *réalités virtuelles*. Nos études se concentrent plus particulièrement sur l'analyse d'interactions réelles ou simulées dans l'espace de représentation de l'environnement d'une part, et les fonctions de commande interactive entre l'opérateur et le système d'autre part. Ce dernier point inclut l'interface avec la représentation de la tâche, et la génération de retours d'informations synthétiques. Enfin, de manière originale, l'Irisa met l'accent sur le développement de fonctions à retour d'effort comme extension spécifique d'un système de *réalités virtuelles*. Les activités de Cyril Thibout, qui bénéficie d'une bourse de thèse CEA, ont porté sur l'étude et la mise en œuvre d'algorithmes d'interaction temps réel, en particulier basés sur le calcul de distance entre solides polyédriques, de manière complémentaire à certains algorithmes fondés sur le lancer de rayon sélectif ou les champs de potentiel. Cette fonction d'interaction sert de base pour la synthèse d'un retour d'effort, utilisable pour différentes fonctions d'assistance par exemple l'anticollision et la simulation de contact. Ces travaux donnent lieu à une démonstration sur site de téléopération. La seconde partie des activités s'oriente vers la programmation de tâche en TAO, par programmation graphique interactive.

3.3 Algorithmique parallèle

Participants : Kadi Bouatouch, Bruno Arnaldi, Thierry Priol

Les travaux sur la parallélisation des algorithmes de simulation d'éclairage sont effectués en étroite collaboration avec T. Priol du projet Caps. Les objectifs principaux de ces études sont d'une part de diminuer le temps de calcul des simulations d'éclairage et d'autre part de considérer des bases de données plus importantes en exploitant la ressource mémoire des architectures MIMD. Après avoir étudié la parallélisation de l'algorithme de lancer de rayon, nous abordons maintenant l'étude de la parallélisation de l'algorithme de radiosité.

Cette année, nous avons particulièrement travaillé sur l'expression de la localité lors de la distribution des données et des calculs. Nous avons développé une version parallèle de l'algorithme de radiosité fonctionnant sur la Paragon XPS de l'Irisa. À partir d'une répartition statique de la scène à synthétiser, cet algorithme est fondé sur le principe d'un échange de source lumineuse entre les processeurs. Chaque processeur traite uniquement sa base de données locale compte tenu des sources qu'il possède et des sources qui lui sont communiquées par les régions voisines.

4 Actions industrielles

4.1 Coopération avec le CSTB

Les travaux menés en collaboration avec le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment à Nantes) concernent la simulation d'éclairage. La matérialisation directe de cette coopération est le financement d'une nouvelle bourse de thèse. L'objectif de cette thèse est de poursuivre les travaux de validation de nos algorithmes de simulation. En effet, le CSTB dispose des moyens matériels spécialisés dans la mesure des données physiques concernant l'éclairage (salle reproduisant l'éclairage naturel, vidéo luminance-mètre, spectro-photomètre, etc.). Grâce à cet équipement, nous avons commencé une campagne de validation de nos modèles dans laquelle les résultats de simulation peuvent être comparés à des mesures sur maquette (luminances).

Ces études communes aboutissent maintenant à un logiciel capable d'effectuer des simulations d'éclairage dans le domaine du bâtiment (éclairage intérieur ou extérieur). Une étude de marché est en cours pour évaluer l'opportunité d'industrialiser ce produit.

4.2 Coopération avec la société Cril

La société CRIL INGENIERIE, dont une agence est située à Rennes, a évalué notre logiciel ADRA (ADaptative RADiosity) dans le cadre d'une application à la simulation du rayonnement infra-rouge. En effet, ADRA traite le rayonnement visible mais peut servir de base à une étude concernant la simulation du rayonnement infra-rouge. Cette collaboration doit déboucher sur un partenariat permettant la réalisation d'un produit industriel.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

Participation au groupe de travail français sur l'Animation et la simulation» (G. Hégron). Ce groupe de travail a pour objectif de réunir la communauté scientifique française étudiant l'animation par ordinateur, d'organiser périodiquement des séminaires thématiques (troisième séminaire à Lille en octobre 1994).

Animation du groupe de travail français sur les techniques de rendu (co-responsable K. Bouatouch). Ce groupe de travail a les mêmes objectifs que celui sur l'animation : réunir et organiser des séminaires.

Collaboration Bretagne Image : animation du thème Logiciels et matériels pour la production de séquences d'images animées» (B. Arnaldi). La CBI est une structure regroupant tous les centres de recherche publics et les industriels travaillant sur l'image numérique en Bretagne. Son rôle est de provoquer des rencontres débouchant sur des projets d'étude regroupant plusieurs partenaires.

Participation à la création d'une association (association française d'informatique graphique AFIG – secrétaire de l'association : B. Arnaldi).

Participation au projet PIR VILLE sur le thème : *éclairage urbain*. Nos partenaires dans ce projet sont : le Crin (Nancy), le projet Inria Imagis (Grenoble), l'Institut National de Recherche sur la Sécurité (Nancy), le

CRAI (Nancy) ainsi que le service Éclairage Public d'EDF. L'objectif de ce projet est de travailler sur l'illumination des monuments, édifices, places et ouvrages d'art urbains. En effet, le principal problème rencontré par les éclairagistes est l'impossibilité de représenter de manière réaliste (au sens physique du terme) leur projet d'éclairage. Ce projet vise donc à doter les éclairagistes d'outils permettant d'effectuer des simulations de l'éclairage de ces sites. Un des problèmes soulevé par cette étude provient du fait que les bases de données géométriques de ces sites urbains sont généralement très volumineuses.

Participation au groupe de travail sur les réalités virtuelles (GTRV), créé en 1994, dans le cadre du GDR PRC-CHM (communication homme-machine) du CNRS : représentation Irisa et coordination Siames-Temis par G.André.

5.2 Actions internationales

Projet Esprit-Bra Charm.

Animation du groupe de travail ERCIM (Computer Graphics Network - Task 3) consacré à l'étude des algorithmes parallèles pour la visualisation (B. Arnaldi).

Animation du groupe de travail Eurographics Animation et simulation (G. Hégron, coprésident).

Coopération franco-algérienne avec l'université de Sétif sur l'informatique graphique (K. Bouatouch).

6 Diffusion des résultats

Enseignement

DHC-INC : Diplôme d'ingénieur de l'Ifsic (K. Bouatouch, G. Hégron, É. Maisel) option image.

DHC LSI & INC Ifsic : cours sur les interfaces homme-machine (A. Chauffaut, S. Donikian).

Magistère de mathématiques, université de Rennes 1 : cours sur la modélisation géométrique et la synthèse d'image (B. Arnaldi).

DESS ISA Ifsic, Insa 5^e année, DEA STIR et DEA d'informatique Ifsic : synthèse d'image et animation (K. Bouatouch, G. Hégron).

Enssat Lannion : cours sur la synthèse d'image (B. Arnaldi, K. Bouatouch, S. Pattanaik).

École des Mines de Sophia-Antipolis (ISIA), cours de synthèse d'image et d'animation (K. Bouatouch, B. Arnaldi).

ENS Cachan, antenne de Kerlann : cours sur la modélisation géométrique (S. Donikian).

Co-responsabilité de l'organisation du DEA d'informatique de l'université de Rennes 1 (B. Arnaldi), responsabilité de la filière *Image* du DEA.

7 Bibliographie du projet

Thèses

- [1] B. ARNALDI, *Animation de systèmes physiques*, mémoire d'habilitation à diriger les recherches, université de Rennes 1, février 1994.
- [2] E. LANGUÉNOU, *Radiosité hiérarchique et transfert radiatif dans les milieux semi-transparents*, thèse de doctorat, université de Rennes 1, octobre 1994.
- [3] C. LECERF, *Contrôle du mouvement de systèmes mécaniques en animation*, thèse de doctorat, université de Rennes 1, juin 1994.

Articles et chapitres de livre

- [4] G. ANDRÉ, *Traité de Robotique (Encyclopédie Techniques de l'Ingénieur)*, 1994, ch. "Capteurs d'environnement en robotique".
- [5] D. BADOUEL, K. BOUATOUCH, T. PRIOL, «Distributed data and control for ray tracing in parallel», *IEEE Computer Graphics and Applications* 14, 4, juillet 1994, p. 69-77.
- [6] K. BOUATOUCH, T. PRIOL, «Radiosity Using a Shared Virtual Memory», à paraître dans *Computer Aided Design*, 1994.
- [7] S. DONIKIAN, «Les modèles comportementaux pour la génération du mouvement d'objets dans une scène», *Revue Internationale de CFAO et d'Infographie, numéro spécial AFIG-GROPLAN (à paraître)* 9, 6, 1994.
- [8] S. PATTANAİK, «Adjoint Equations and Random Walks for Illumination Computation», à paraître dans *ACM Transactions On Graphics*, 1994.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [9] G. ANDRÉ, «Simulation robotique : principes génériques et algorithmes pour l'animation», *in: Troisième séminaire du groupe de travail Animation et Simulation*, ENIC, Villeneuve d'Ascq, octobre 1994.
- [10] B. ARNALDI, R. COZOT, G. ANDRÉ, S. DONIKIAN, C. LECERF, «Plateforme générique pour l'animation et la simulation de scènes complexes», *in: Troisième séminaire du groupe de travail Animation et Simulation*, ENIC, Villeneuve d'Ascq, octobre 1994.
- [11] B. ARNALDI, B. EDIBE, «Automated Simulation of Bond Graph Models», *in: IMACS symposium on Mathematical Modelisation, MathMod, Vienna*, février 1994.
- [12] B. ARNALDI, B. EDIBE, «Automation of the bond graph modeling of multibody systems», *in: IMACS World Congress, Atlanta*, juillet 1994.
- [13] R. COZOT, S. DONIKIAN, «Simulation d'un flot de circulation urbain dans le cadre du projet Praxitèle», *in: Troisième séminaire du groupe de travail Animation et Simulation*, ENIC, Villeneuve d'Ascq, octobre 1994.
- [14] S. DONIKIAN, B. ARNALDI, «Complexity and Concurrency for Behavioral Animation and Simulation», *in: Fifth Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, G. Hégron, O. Fahlender (éd.), Oslo, Norvège, septembre 1994.
- [15] S. DONIKIAN, B. ARNALDI, «Un système multi-agent temps réel pour l'animation comportementale», *in: Deuxième Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée & Systèmes Multi-Agents*, Grenoble, mai 1994.
- [16] S. DONIKIAN, «Un modèle dynamique de description de scènes architecturales», *in: RFIA '94*, Paris, janvier 1994.
- [17] E. LANGÉNOU, K. BOUATOUCH, M. CHELLE, «Global Illumination In Presence of Participating Media With General Properties», *in: Fith Eurographics Workshop on Rendering Proceedings*, Eurographics, Darmstadt, juin 1994.
- [18] E. MAISEL, «Interpolation adaptative de séquences d'images synthétiques», *in: Troisième séminaire du groupe de travail Animation et Simulation*, ENIC, Villeneuve d'Ascq, octobre 1994.
- [19] J. L. NOUGARET, B. ARNALDI, R. COZOT, «Optimal motion control using a wavelet network as a tunable deformation controller», *in: Eurographics 94 workshop on animation and simulation*, Oslo, Norvège, octobre 1994.
- [20] S. PATTANAIK, K. BOUATOUCH, «Fast Wavelet Radiosity Method», *in: Eurographics '94 Conference Proceedings*, Eurographics, Oslo, septembre 1994.

- [21] S. PATTANAİK, K. BOUATOUCH, «Haar Wavelet : A Solution to Global Illumination With General Surface Properties», *in : Fifth Eurographics Workshop on Rendering Proceedings*, Eurographics, Darmstadt, juin 1994.

Rapports de recherche et publications internes

- [22] M. BOURGES-SÉVENIER, «Réalisation d'une bibliothèque C de fonctions ondelettes», *publication interne n° 834*, Irisa, octobre 1994.
- [23] E. LANGUÉNOU, M. CHELLE, K. BOUATOUCH, «Simulation d'éclairage dans un environnement contenant des milieux semi-transparents», *publication interne n° 800*, Irisa, mars 1994.
- [24] M. SAUVÉE, E. LANGUÉNOU, «Localisation des discontinuités en vue d'un maillage optimal pour la radiosité», *publication interne n° 861*, Irisa, octobre 1994.

Œuvres audiovisuelles

- [25] C. BLONZ, J. L. NOUGARET, *Deformation tuning with a wavelet network*, 4', octobre 1994.

8 Abstract

Our research activity is concerned with three main topics: lighting simulation: high quality results and images are obtained with the use of physically based lighting models; physical models simulation: we particularly investigate the computation schemes of the equations driving the physical systems; parallel algorithms: besides the researches aiming at reducing the complexity of sequential algorithms we also are investigating parallel implementation schemes for these algorithms.

Scientific Context:

- Computer graphics
- Lighting simulation (sequential and parallel algorithms)
- Physical model simulation

Developments:

- Realistic lighting simulation
- Mechanical system simulation and animation of deformable surfaces

- Parallel ray tracer (VM_pRay)

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation générale et objectifs	2
3	Actions de recherche	3
3.1	Synthèse d'image et simulation de rayonnement	3
3.1.1	Méthode de Galerkin utilisant les ondelettes	4
3.1.2	Environnements complexes	6
3.1.3	Milieux semi-transparentes (MST)	6
3.1.4	Interfaces utilisateurs	7
3.2	Animation et simulation	7
3.2.1	Intégration des modèles physiques pour l'animation	7
3.2.2	Génération des équations du mouvement	8
3.2.3	Contrôle du mouvement	10
3.2.4	Structure de commande interactive pour animation- simulation	11
3.2.5	Animation comportementale	14
3.2.6	Plate-forme de simulation	15
3.2.7	Projet Esprit-Bra Charm	17
3.2.8	Projet Praxitèle	18
3.2.9	Projet Téléopération	19
3.3	Algorithmique parallèle	20
4	Actions industrielles	20
4.1	Coopération avec le CSTB	20
4.2	Coopération avec la société Cril	21
5	Actions nationales et internationales	21
5.1	Actions nationales	21
5.2	Actions internationales	22

Rapport d'activité INRIA 1994 — Annexe technique

6	Diffusion des résultats	22
7	Bibliographie du projet	23
8	Abstract	25