

*Équipe Mirages**Manipulations d'objets 3D dans les  
séquences d'Images pour la Réalité  
Augmentée et la Génération d'Effets  
Spéciaux**Rocquencourt*

THÈME 3A

*R* *apport*  
*d'Activité*

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>1</b>
2.1. Introduction	1
2.2. Premier domaine d'activité : analyse 3D vidéo	1
2.3. Deuxième domaine d'activité : modélisation textile	2
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>2</b>
3.1. Calibration de caméra	2
3.2. Poursuite d'indices dans une séquence d'images	2
3.3. Suivi de mouvement	3
3.4. Modélisation de scènes et de mouvements structurés	3
3.5. Photo-Réalisme	4
3.6. Modélisation mécanique de tissus	4
3.6.1. Simulation dynamique	4
3.6.2. Domaines d'application	4
3.6.3. Résultats nouveaux	5
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>5</b>
4.1. La production et post-production audiovisuelles	5
4.2. La confection	5
4.3. L'industrie du divertissement	6
4.4. Etude du mouvement sportif	6
4.5. Commerce électronique	6
<b>5. Logiciels</b>	<b>6</b>
5.1. Logiciel FROGPLUS	6
5.2. Etude de Logiciels permettant la Gradation de Patrons	7
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>9</b>
6.1. Suivi d'objets rigides	9
6.2. Suivi d'objets Articulés : Projet GOLF-STREAM	10
6.2.1. Tracking 3D	10
6.2.2. Résumé du projet	10
6.2.3. Modélisation d'une marionnette de synthèse	10
6.2.4. Renormalisation et pré-positionnement d'une marionnette de synthèse	10
6.2.5. Processus de tracking	11
6.2.6. Tournage Trophée Lancôme	12
6.2.7. Filtrage de capture de mouvements	12
6.3. Adaptation morphologique de modèle 3D de visage à partir d'images	12
6.4. Prépositionnement automatique de patrons 2D sur un mannequin numérique 3D	15
6.5. Simulation dynamique de vêtements	17
6.5.1. Intégration des modèles non linéaires hystérétiques	17
6.5.1.1. Modèles non linéaires hystérétiques	17
6.5.2. Intégration formelle	17
6.5.2.1. Symétrie du système obtenu	17
6.5.2.2. Positivité du système	17
6.6. Modélisation du cisaillement par Kawabata	18
6.6.1. Motivations	18
6.6.2. Equations	18
6.7. Validation du modèle	19
6.7.1. Modélisation du cisaillement	20

6.7.2.	Modélisation de la tension	21
6.7.3.	Modélisation de la flexion	21
6.8.	Modèles d'auto-collisions masses-facettes	24
6.8.1.	Motivation	24
6.8.2.	Auto-collisions masses-facettes	24
6.8.2.1.	Détection	24
6.8.3.	Gestion de la contrainte	24
6.8.3.1.	Vitesse de groupe	24
6.8.3.2.	Feedback du gradient conjugué	24
6.8.3.3.	Suppression	25
6.8.4.	Auto-collisions segments-segments	25
6.8.4.1.	Détection	25
6.8.4.2.	Traitement	25
<b>7.</b>	<b>Contrats industriels</b>	<b>26</b>
7.1.	Contrat du CNC VIP3D	26
7.2.	Contrats du CNC : Golf-STREAM	26
<b>8.</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>26</b>
8.1.	Actions nationales	26
8.2.	Actions financées par la communauté européenne	26
8.2.1.	Contrat EUREKA COMEDIA	26
8.3.	Actions bilatérales internationales	26
8.4.	Accueil de chercheurs étrangers	27
<b>9.</b>	<b>Diffusion des résultats</b>	<b>27</b>
9.1.	Animation de la Communauté Scientifique	27
9.2.	Comité éditoriaux de Conférences	27
9.3.	Enseignement	27
9.4.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	27
<b>10.</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>28</b>

# 1. Composition de l'équipe

**Responsable scientifique**

André Gagalowicz [DR]

**Assistante de projet**

Christiane Demars [AI]

**Ingénieurs experts**

Anabelle Le Hyaric

Philippe Gérard

**Ingénieur associé**

David Reversat [Ingénieur associé]

**Doctorants**

Hatem Charfi [boursier Inria]

Jérémy Denise [boursier Inria]

Wei Du [post-doc Inria]

Richard Roussel [boursier Inria]

Franck Thomas [boursier MENRT, Université Paris 6]

## 2. Présentation et objectifs généraux

### 2.1. Introduction

La thématique scientifique de MIRAGES est la manipulation d'objets dans des séquences d'images et le domaine d'applications choisi est celui de services nouveaux (relatifs à ces objets) qui apparaîtront dans les réseaux de communications de demain. Nous déclinons cette thématique selon deux axes :

### 2.2. Premier domaine d'activité : analyse 3D vidéo

Nos activités dans le domaine de la manipulation du contenu des images concernent l'analyse tridimensionnelle et en particulier la restitution des propriétés 3D (structure/mouvement/ photométrie) d'objets à partir de séquences vidéo. Notre approche diffère des méthodes traditionnelles de traitements d'images, et privilégie l'utilisation d'information disponible a priori pour guider l'algorithme.

Les principaux problèmes posés sont :

- la poursuite d'objets 3D dans une séquence, objets dont la géométrie est connue mais le mouvement inconnu,
- ajustement anthropométrique à partir d'un modèle 3D et d'images,
- tracking facial et de mouvements humains,
- la calibration interactive de séquences : dans ce cas on pallie au manque de connaissances sur l'environnement par la spécification par un utilisateur de contraintes (structures 3D et relations spatiales entre ces structures).
- le rendu inverse (analyse photométrique pour l'aspect vision par ordinateur). Dans cette approche, nous nous intéressons au contenu photométrique des images. Nous disposons d'un modèle géométrique de la scène et d'une image unique de cette scène. Le but est de calculer les caractéristiques photométriques de tous les objets de cette scène qui sont visibles sur l'image, de manière à pouvoir synthétiser cette image (mais également d'autres images correspondant à des points de vue différents ou à d'autres conditions d'illumination).

Le premier applicatif visé est la création d'outils avancés pour la création audiovisuelle (films publicitaires, institutionnels ou artistiques). Le contrat NEMESIS a touché à sa fin, mais trouve sa continuité dans le

contrat VIP3D (financement PRIAMM) qui a débuté en avril 2001. Avec VIP3D, on aborde la poursuite de personnages humains et en particulier de leurs visages.

Au travers du contrat GOLF-STREAM, signé en juin 2002, on étudie plus particulièrement le problème de la poursuite d'êtres humains (ici des golfeurs professionnels) dans des séquences d'images pour l'analyse, l'amélioration de leurs mouvements, ainsi que l'enrichissement des commentaires de commentateurs sportifs.

A terme, nous espérons étendre ces activités vers d'autres applicatifs parmi lesquels la vidéo-surveillance, la télé-conférence, la réalisation de jeux vidéo 3D mêlant images réelles et de synthèse, l'animation, ainsi que la création de contenu multimédia dans des logiciels grand public.

### 2.3. Deuxième domaine d'activité : modélisation textile

Le deuxième domaine d'activité concerne la création et la déformation de modèles 3D d'objets pour permettre leur manipulation. Nous nous penchons en particulier sur la modélisation de vêtements. Les vêtements sont positionnés sur un modèle 3D humain. Pour une modélisation réaliste, nous investiguons une technique qui effectue la construction avec conservation de la masse totale en faisant l'hypothèse (approximative) que le corps humain est rigide. Nous posons les briques pour cette nouvelle méthode. Les applications potentielles ont fait l'objet :

- du contrat européen INCO-DC MtoM3D dont la problématique a été de construire un simulateur de vêtements et de permettre, en particulier, à des personnes fortes de s'habiller « mode », ce qui est loin d'être le cas aujourd'hui, et ce qui permettra à l'industrie du textile de développer un nouveau segment du marché ; particulièrement important en Amérique du Nord. Nous étions le contractant principal sur ce projet, avec l'aide précieuse de l'ERCIM pour l'aspect administratif. Ce projet s'est terminé il y a deux ans.
- du contrat Euréka COMEDIA, dont le contractant principal est LECTRA SYSTEMES, pose la problématique de la production d'un défilé de mode numérique ainsi que la création d'un outil de simulation pour les créatifs de la mode. Ce contrat s'est terminé en fin 2002.

## 3. Fondements scientifiques

### 3.1. Calibration de caméra

**Mots clés :** *projection perspective, calibration.*

La calibration de caméra consiste à déterminer la projection de monde 3D dans une caméra perspective. Des mises en correspondance entre la géométrie 3D et les pixels de l'image correspondant à la projection de cette structure géométrique permet de résoudre les paramètres de projection caméra. Plusieurs méthodes sont investiguées (appariement de points, projection inverse de droites, contraintes épipolaires) pour déterminer la calibration la plus robuste possible et imposant le moins de contraintes possibles au moment du tournage. Les méthodes envisagées sont très dépendantes de l'application visée d'une part et des résultats de détection, appariement, poursuite, qui constituent les premières étapes possibles d'extraction de l'information contenue dans les images.

### 3.2. Poursuite d'indices dans une séquence d'images

**Mots clés :** *positionnement de primitives, poursuite.*

Différents indices ou primitives peuvent être obtenus à partir d'une image et illustrer certaines de ses propriétés. Pour une séquence d'images, ces indices doivent être extraits et suivis dans le temps. Les méthodes réalisant cette poursuite nécessitent généralement la définition ou l'extraction des primitives, la prédiction de leur mouvement et le recalage ou la mise en correspondance image par image des primitives. Les résultats de la poursuite peuvent fournir des données d'entrée pour d'autres traitements, en particulier la calibration de caméra et la reconstruction d'objets tridimensionnels.

### 3.3. Suivi de mouvement

**Mots clés :** *poursuite à base de modèles, effet spéciaux, apprentissage de texture, modèle dynamique, optimisation multi-résolution, recuit simulé.*

Il existe un nombre important de travaux de recherche concernant la poursuite et la reconnaissance d'objets à partir d'une séquence vidéo et faisant appel à des traitements de l'image tels que la détection de contours, de régions mobiles, de texture ...

Notre approche, contrairement aux autres travaux utilisant des modèles 3D, [5] ne fait pas d'extraction explicite de caractéristiques d'images : les modèles 3D que nous utilisons peuvent être de simples approximations géométriques des objets réels à poursuivre, et être composés d'un nombre réduit de faces, ce qui simplifie considérablement le travail de modélisation. Au moment de la première image de la séquence vidéo, on réalise une calibration interactive et la texture de l'objet y est apprise. Les valeurs des degrés de liberté du modèle sont alors calculées et servent à l'initialisation du processus de tracking fondé sur un algorithme de recuit simulé. Ce dernier va alors modifier les valeurs initiales des degrés de liberté en vue de minimiser une erreur d'appariement entre la projection d'un modèle texturé et l'image réelle. La fonction d'erreur est, pour l'instant, une simple moyenne de la différence de valeurs RGB (ou HSV) des pixels de l'image synthétique et des pixels de l'image réelle. Plusieurs modèles dynamiques ont été testés afin de prédire au mieux les valeurs d'initialisation à fournir à l'optimiseur pour chaque nouvelle image traitée.

Dans les applications de vision par ordinateur que nous devons traiter, nous avons dû résoudre le calcul de l'optimum global d'une fonction de coût paramétrique non explicite, discrète, bruitée et dont la distribution sur l'ensemble des paramètres est complexe. Puisque les dérivées ne sont pas simplement calculables, et que les minima locaux sont nombreux, des méthodes d'optimisation de type « descente de gradient » ou Levenberg-Marquardt sont inexploitable. Les algorithmes du type des recuits simulés sont plus appropriés. Cependant dans nos applications, il s'avère que l'on obtient toujours des convergences de l'algorithme vers des minima locaux. C'est pourquoi nous avons développé un système hybride utilisant une recherche multi-résolution et un ensemble de recuit simulés.

Dans le monde de l'animation et de l'entraînement sportif, il est courant d'utiliser des systèmes de capture de mouvements pour mesurer, enregistrer et analyser ou reproduire des mouvements effectués par des acteurs ou des athlètes. Le système le plus utilisé consiste à déterminer, par triangulation, l'évolution de la position 3D d'un ensemble de marqueurs ultra-réfléchissants, placés sur le corps d'un acteur. Les capteurs de mesures sont des caméras noir et blanc rapides (120Hz) montées d'une source lumineuse stroboscopique synchronisée avec leur fréquence d'ouverture. Ce système, bien que très précis, présente tout de même certains inconvénients d'utilisation tels que le confinement du studio dans lequel les sportifs ou acteurs doivent évoluer (les athlètes ne peuvent pas réaliser des mouvements exactement comme sur un stade ou un terrain de golf), ou encore, la gêne occasionnée par le port de vêtements spécifiques lors de la prise de mesure. Nous considérons que le corps humain est un modèle 3D articulé et légèrement déformable. Aussi, disposant d'une « Marionnette » 3d de synthèse anthropométrique, nous allons généraliser notre méthode de tracking dans un espace de paramètres plus important. Notre objectif est de proposer un système de « motion capture » sans marqueur et transportable en extérieur. Dans un premier temps la morphologie de la « marionnette générique » est adaptée à celle du personnage filmé, à partir de la mise en correspondance de sa silhouette dans plusieurs vues du personnage en position « de Vinci » (debout, bras et jambes écartés). Puis, un ensemble de contraintes sont ajoutées pour limiter l'espace de recherche lors de l'optimisation de l'ensemble des degrés de liberté. Un ensemble de captures de mouvements de cinq champions de golfs nous ont fourni une base d'informations a-priori sur le mouvement de swing que l'on va désormais tenter de poursuivre dans des images de caméras vidéo traditionnelles.

### 3.4. Modélisation de scènes et de mouvements structurés

**Mots clés :** *modèles géométriques, sélection de modèles.*

Les scènes tridimensionnelle observées dans les images sont généralement complexes, mais souvent composés de primitives simples (segments de droite, éléments plans, etc.) organisées de façon structurée. De même, le

mouvement de caméra est rarement arbitraire. Il est donc important de chercher des modèles appropriés, qui vont décrire au mieux la scène ou la caméra de manière à la fois réaliste et utile pour les algorithmes. Lorsque différents modèles sont a priori envisageables, on peut recourir à des techniques statistiques de sélection de modèles qui vont déterminer le modèle optimal pour les données traitées.

### 3.5. Photo-Réalisme

**Mots clés :** *synthèse d'images, radiosité, lancer de rayons, simulation de l'éclairage, rendu réaliste, rendu inverse.*

Une des préoccupations majeures de Mirages est de pouvoir générer des images de synthèse aussi proches que possible de la réalité. Un des premiers problèmes posé par de cette direction de recherche est qu'elle nécessite un logiciel de calcul d'images de synthèse évolué puissant et très rapide. En effet la méthode de comparaison de l'image de synthèse que nous créons à la véritable image naturelle, implique le recalcul permanent de celle-ci par une technique itérative qui représente l'essence même des travaux développés ici. Nous nous intéressons donc à des techniques nouvelles pour la régénération d'images de synthèse aussi proches que possible d'images réelles prises depuis une caméra.

### 3.6. Modélisation mécanique de tissus

**Mots clés :** *mécanique des milieux continus, systèmes masses-ressorts, intégration numérique, cohérence spatiale, phénomènes de contact.*

Simuler des pièces de tissu nécessite une connaissance précise du comportement de celui-ci, bien au-delà de considérations géométriques : il s'agit de mettre en évidence des relations qui lient les contraintes (forces) appliquées aux déformations engendrées. On établit alors, pour un type de déformation donné, une fonction de transfert, souvent exprimée sous forme différentielle. Le système de mesure de référence dans l'industrie textile est celui de Kawabata [Kaw80], qui permet d'obtenir de telles informations pour des déformations en traction, cisaillement, et flexion d'un échantillon de tissu.

Pour pouvoir ensuite exploiter ces modèles sous forme numérique, soit on opère en effectuant une discrétisation spatiale des équations continues (modèles à éléments finis ou à différences finies), soit en partant d'un modèle a priori discret (système de particules) dotés de caractéristiques calquées sur le comportement que l'on souhaite simuler.

#### 3.6.1. Simulation dynamique

Une fois un modèle de tissu établi, on cherche à en prédire l'évolution au cours du temps. Pour simuler des tissus, cela passe par l'intégration de l'équation fondamentale de la dynamique. Bien que plusieurs familles de méthodes existent pour résoudre des équations différentielles, l'élaboration de méthodes adaptées à des types particuliers d'équations différentielles du second ordre reste un domaine ouvert, le but étant d'obtenir le meilleur rapport stabilité/temps de calcul. L'autre problème rencontré lors de la simulation dynamique d'objets déformables concerne le maintien de la cohérence spatiale, par modélisation des phénomènes de contact (glissement, frottement) entre le tissu et les objets de la scène d'une part, et entre différentes zones du tissu lui-même (autocollisions) d'autre part, ainsi que leurs effets sur les objets impliqués (déplacements, déformations). La détection de ces collisions est de loin la partie la plus gourmande en temps de calculs, et la plus propice à diverses optimisations.

#### 3.6.2. Domaines d'application

- La confection  
La simulation dynamique de tissus, appliquée aux vêtements, permet d'offrir des outils de prototypage virtuel aux industriels de la confection, avec pour effet la réduction des coûteux cycles de mise au point par réalisation de prototypes réels. Une première démonstration en a été faite dans le cadre du contrat MtoM3D.



- Industrie du divertissement  
La possibilité d'habiller des personnages réels ou synthétiques avec des vêtements correctement simulés trouve naturellement sa place dans le domaine des jeux vidéos, et de la production audiovisuelle.
- Commerce électronique  
La possibilité pour un client d'avoir un aperçu d'un vêtement tel qu'il le porterait lui permet d'en essayer virtuellement un nombre bien plus grand que ce qui est envisageable dans la réalité, et donc de mieux cibler l'essayage réel (amélioration de l'achat en boutique). Concernant la vente par correspondance, une telle approche réduit considérablement les risques d'erreur de commande, aussi bien du point de vue du style que des mensurations ; ceci constitue un apport notable au développement de l'achat en ligne.

### 3.6.3. Résultats nouveaux

- Intégration du modèle hystérique  
Les courbes de transfert issues des mesures de Kawabata (traction, cisaillement, flexion) avait précédemment fait l'objet d'une modélisation différentielle, ainsi que la mise au point d'un programme permettant l'identification des paramètres de ces modèles. Ces modèles ont été intégrés dans le simulateur, qui ne disposait jusqu'alors que d'un modèle élastique.
- Validation  
Afin de valider le modèle dans un cadre réaliste, les expériences de Kawabata ont été simulées sur des éprouvettes virtuelles (systèmes masses/ressorts), avec le simulateur ainsi enrichi, et comparées avec les courbes réelles. Nous avons constaté une très bonne adéquation entre les courbes réelles et simulées ce qui prouve la qualité de notre modèle dynamique de tissu.

## 4. Domaines d'application

### 4.1. La production et post-production audiovisuelles

L'application principale visé par les travaux en suivi de mouvement et en calibration interactive est la création d'outils avancés pour la création audiovisuelle (films publicitaires, institutionnels ou artistiques). C'est l'objet du contrat RIAM, Golf-STREAM qui correspond à la suite du contrat européen NEMESIS. D'autre part, le projet PRIAMM VIP3D qui a débuté en avril de l'année dernière traite de la renormalisation du visage et du tracking facial.

La post-production audiovisuelle intègre maintenant des animations 3D, des compositions ou des effets pour lesquels le mouvement de la caméra doit être connu. A moins de disposer de systèmes complexes de caméra sur rails et de mesure de l'environnement, ce mouvement ne peut être obtenu que par calibration à partir des images filmées. Dans ce cadre, des algorithmes rapides, robustes, interactifs et simples à manipuler sont devenus un besoin croissant des sociétés de post-production. Nos algorithmes de poursuite et de calibration sont donc développés pour ces applications, avec le maximum d'adéquation possible aux réalités de la post-production.

En production audiovisuelle, il est de plus en plus courant d'utiliser de la réalité augmentée pour enrichir le contenu de l'image diffusée à l'antenne, c'est pourquoi, au travers du projet Golf-STREAM, les chaînes françaises offriront au téléspectateur, un contenu plus pédagogique lors de la retransmission de tournois de golf. Cette recherche pourra s'étendre à l'ensemble des sports en extérieur et pourra également fournir des informations analytiques aux professionnels sportifs.

### 4.2. La confection

La simulation dynamique de tissus, appliquée aux vêtements, permet d'offrir des outils de prototypage virtuel aux industriels de la confection, avec pour effet la réduction des cycles coûteux de mise au point par réalisation

de prototypes réels. Une première réalisation a été effectuée dans le cadre du contrat européen Esprit INCO-DC : MtoM3D ; elle s'est poursuivie dans le cadre du projet EUREKA COMEDIA.

### 4.3. L'industrie du divertissement

La possibilité d'habiller des personnages réels ou synthétiques avec des vêtements correctement simulés trouve naturellement sa place dans le domaine des jeux vidéos (aucun jeu ne présente à ce jour de personnages habillés de façon réaliste) et de la production audiovisuelle.

Un contrat de collaboration entre le projet MIRAGES et la société ATTITUDE STUDIOa pour but d'étudier la création d'outils plus performants dans ce domaine.

### 4.4. Etude du mouvement sportif

Comme nous l'avons énoncé, un système capable de mesurer les mouvements d'athlètes, en temps réel, permet de capturer un geste plus réaliste. Il sera, par exemple, possible d'analyser le mouvement de swing exécuté par un golfeur amateur et le comparer au même mouvement effectué par un professionnel issu de notre base de données. Après l'étape de tracking, il est possible de représenter les erreurs de mouvements de l'amateur à partir d'éléments graphiques ajoutés à l'image originale. Les applications sportives d'une telle technique sont nombreuses ; on pourrait grandement simplifier l'acquisition des données pour l'étude des mouvements d'athlétisme que réalise l'INSEP.

### 4.5. Commerce électronique

La possibilité pour le client d'avoir un aperçu d'un vêtement tel qu'il le porterait réduit considérablement les risques d'erreur de commande, aussi bien du point de vue du style que des mensurations ; ceci constitue un apport notable au développement de l'achat en ligne de vêtements qui devrait voir le jour prochainement.

## 5. Logiciels

### 5.1. Logiciel FROGPLUS

**Participants :** Jean-Marc Vézien [correspondant], Philippe Gérard [projet Mirages], André Gagalowicz [projet Mirages].

**Mots clés :** *Nemesis, plug-in, After-Effect, WindowsNT, post-production.*

Le logiciel Frogplugs est l'aboutissement du travail en recherche et développement réalisé dans le contrat Européen ESPRIT Nemesis par les partenaires scientifiques : INRIA, HHI et ICS-Forth (Grèce), ainsi que l'industriel Thales et la société de post-production MIKROS Image. Ce logiciel regroupe un ensemble de fonctionnalités d'analyse d'images 2D et 3D permettant d'effectuer des tâches de post-production (rotoscopie, génération de mosaïques, recalage 3D) de façon plus rapide et plus efficace.

Le logiciel Frogplugs constitue la livraison principale du contrat Européen ESPRIT Nemesis, et regroupe le travail en recherche et développement réalisé par les partenaires scientifiques : INRIA (équipes MIRAGES et TEMICS), institut HHI (Allemagne) et ICS-Forth (Grèce), ainsi que par l'industriel Thomson Optronique (pour l'aspect d'intégration) et la société de post-production MIKROS Image (pour l'interface utilisateur). Ce logiciel regroupe un ensemble de fonctionnalités d'analyse d'images 2D et 3D permettant d'effectuer des tâches de post-production de façon plus rapide et plus efficace. Parmi ces tâches, citons la rotoscopie (retouche d'une séquence vidéo image par image), la réalisation de mosaïques, et en ce qui concerne spécifiquement MIRAGES, le recalage dynamique 3D (poursuite) ou le calcul de trajectoire de caméra (voir sections 3.1, 3.2, et 3.3).

Ce logiciel est réalisé initialement comme un plug-in du progiciel « After-Effect » de la société ADOBE, et fonctionne sous l'OS WindowsNT (voir figure : 1).



Figure 1. Interface graphique du module de tracking 3D dans le plug-in Frogplugs

Le développement logiciel est réalisé en C/C++. Il est désormais commercialisé par la société Thales depuis sa première présentation à IBC (International Broadcasting Conference) à Amsterdam, en Septembre dernier. en construction (site web : <http://www.frogplugs.com>)

Le développement d'un plug-in pour MAYA du tracking 3D a été sponsorisé par la société Alias-wavefront qui a concédé un ensemble de licences Maya 4.0 pour un montant d'environ 95000 euros.

## 5.2. Etude de Logiciels permettant la Gradation de Patrons

**Participants :** Anabelle Le Hyaric, André Gagalowicz.

**Mots clés :** gradation de patrons, logiciels de CAO et FAO.

En termes généralistes, la gradation est la loi de progression d'une série par degrés successifs. Ces degrés sont notés par divers unités et signes conventionnels. On parle couramment de gradation de pointures, de longueurs ou de grosseurs. En fait, la gradation s'emploie dans de nombreuses industries, par exemple celles de la chaussure, du graphisme, de l'imprimerie et en particulier celle de la confection.

La gradation de patrons se définit comme l'établissement de patrons types, pour une fabrication en série correspondant à des tailles normalisées. Ceci se fait d'après un patron de base. Traditionnellement, la gradation de patrons s'effectue de façon manuelle. Aujourd'hui toutefois, des logiciels permettant d'automatiser cette tâche sont utilisés par l'industrie textile. En effet, depuis de nombreuses années, une collaboration certaine a lieu entre les professionnels des mondes de l'habillement et de l'informatique. Les outils permettant de mécaniser et de perfectionner les tâches manuelles traditionnelles sont devenus très prisés sur le marché de l'habillement et du textile. Grâce notamment aux logiciels de CAO et FAO (conception et fabrication assistées par ordinateur), l'écran d'ordinateur tend à devenir un outil de base des créateurs, fabricants et distributeurs. On distingue en particulier parmi ces logiciels ceux réalisant une gradation automatique de patrons donnés.

Comme est décrit dans cette section, nous mettons actuellement au point dans notre équipe un logiciel simulant le tombé d'un vêtement sur un mannequin virtuel. Ce simulateur se compose en fait de deux parties distinctes. La première permet le prépositionnement automatique du vêtement autour du mannequin. La deuxième reproduit de façon virtuelle le tombé du vêtement. On visualise alors le vêtement se relaxant depuis sa position à la surface du mannequin jusqu'à sa position d'équilibre. Nous nous sommes ainsi intéressés aux logiciels de gradation automatique de patrons en vue de compléter cet outil de simulation de vêtements. Dans un premier temps, notre but a été d'identifier et de recenser ces logiciels. Une étude plus approfondie nous a permis d'étudier leur mode de fonctionnement et leur disponibilité. Le choix final d'un de ces logiciels se fera bien sûr selon plusieurs critères. Le coût et la qualité du produit en font naturellement partie. Il est aussi très important que le logiciel s'insère le plus aisément possible dans notre simulateur. Nous souhaitons également que le logiciel choisi soit le plus « automatisé » possible et qu'il demande peu d'interactions avec l'utilisateur. Les logiciels de gradation de patrons étudiés sont les suivants :

- **Modaris Prograder** créé par la compagnie Lectra, Cholet, France.

- <http://www.lectra.com>
- **AccuMark** créé par la compagnie Gerber Technology, Tolland, CT, E.U.  
<http://www.gerbertechnology.com>
- **GRAFIS** créé par la compagnie Gertsch Consulting & Mode Vision, Zofingen, Suisse.  
<http://www.grafis.ch>
- **Richpeace Garment Grading System** créé par la compagnie Richpeace Technology Limited, Kwai Chung, N.T. Hong Kong.  
<http://www.richpeace.com>
- **Optitex** créé par la compagnie SGS, Philadelphie, PA, E.U.  
<http://www.optitex.com>
- **Fashion CAD - Pattern Grading Module** créé par la compagnie Cad Cam Solutions Australia Pty. Ltd., Subiaco, Australie.  
<http://www.cadcam.solutionsaustralia.com.au>
- **Vetigraph** créé par la compagnie JPS Informatique - vetigraph, Paris, France.  
<http://www.vetigraph.com>
- **Polygon software** créé par la compagnie Polygon Software & Technology, Richmond, Virginie, E.U.  
<http://www.polygonusa.com>
- **TUKAgrade** créé par la compagnie Tukatech, Los Angeles, CA, E.U.  
<http://www.tukatech.com>
- **PWstudio** créé par la compagnie Pattern Works International, Grand Rapids, MI, E.U.  
<http://www.patternworks-intl.com>

A titre d'illustration, les figures 2 et 3 reproduisent des menus d'utilisation provenant de deux des logiciels cités ci-dessus : Optitex et TUKAgrade. La figure 2 correspond au logiciel Optitex et la figure 3 au logiciel TUKAgrade.

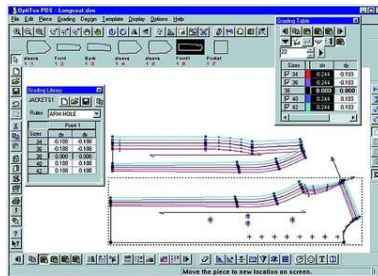


Figure 2. Exemple d'utilisation du logiciel Optitex

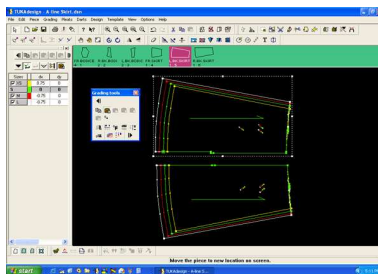


Figure 3. Exemple d'utilisation du logiciel TUKAgrade

Les résultats de cette étude sont en cours d'analyse. Celle-ci devrait prochainement permettre d'agrémenter notre logiciel de simulation de vêtements d'une unité effectuant automatiquement la gradation d'un patron donné.

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Suivi d'objets rigides

**Participants :** Philippe Gérard, André Gagalowicz.

**Mots clés :** *tracking à base de modèles, effets spéciaux, apprentissage de texture, modèle dynamique.*

Au sein du projet NEMESIS, nous avons abordé d'une manière originale le suivi d'objets au sein d'une séquence vidéo en n'extrayant pas de manière explicite des informations obtenues à partir de traitements d'images. Notre méthode fait appel, de manière intensive, à la prédiction et comparaison d'images prédites (synthétiques) et réelles en utilisant des outils 3D de synthèse d'images, où un modèle d'objet est texturé à partir des images de la séquence. Ci-dessous, nous présentons des résultats de suivi d'objets auxquels ont été associés des modèles dynamiques de prédiction. D'autres modèles dynamiques, à base de filtres de Kalman, de décomposition en valeurs singulières et de filtres à réponse impulsionnelle infinie ont été testés.

Nos tests ont été effectués à partir de plusieurs séquences vidéo : l'arche de la Défense filmée par une caméra mobile à bord d'un hélicoptère, une séquence de voiture présentant un mouvement conjugué de la caméra et de l'objet lui-même, un minitel soumis à un fort mouvement de rotation. Les images des figures 4, 5 représentent la qualité de tracking obtenue. La position optimale du modèle est utilisée pour projeter le modèle dans l'image réelle, sous la forme d'une représentation « fil de fer » réalisée à l'aide d'un algorithme de Z-buffer.



Figure 4. Poursuite de l'Arche de la Défense (a) Image 0 (b) Image 70 (c) Image 100.



Figure 5. Poursuite d'une voiture blanche (a) Image 0 (b) Image 82 (c) Image 154.

Puisque le traitement des séquences d'images n'est pas nécessairement chronologique dans le monde de la post-production, notre algorithme permet désormais de définir plusieurs images clefs (image de calibration) et de lancer simultanément plusieurs processus de tracking avant et arrière à partir de ces images clefs. Ceci permet de retrouver le mouvement d'un objet subissant de très fortes rotations (supérieures à 200 degrés). Cependant puisque ces processus sont indépendants les uns des autres, des discontinuités apparaissent lors du raccord entre les processus avant et arrière issus de deux images clefs consécutives. Pour cela nous avons développé un outil de post-traitement corrigeant ces discontinuités à partir d'un lissage des trajectoires, dans

le plan image, des sommets situés sur les extrémités du maillage du modèle 3D. Le lissage des trajectoires s'effectue à l'aide de l'adaptation d'un polynôme à chaque courbe 2D. Cette procédure présente le double avantage d'éliminer les discontinuités spatiales mais également temporelles (saut de la vitesse et/ou de l'accélération).

## 6.2. Suivi d'objets Articulés : Projet GOLF-STREAM

**Participants :** Philippe Gérard, André Gagalowicz.

**Mots clés :** *tracking 3D d'objets articulés, animation, motion capture, mouvements humains, optimisation contrainte, analyse du Swing, .*

Après l'obtention de résultats de tracking satisfaisants au cours du projet européen Némésis, où l'on a effectué un tracking d'objets 3D rigides à partir d'une approche analyse/synthèse et en connaissant a priori le modèle polyédrique de l'objet à poursuivre dans une séquence vidéo, nous avons commencé à généraliser notre méthode en l'appliquant à la poursuite d'objets 3D articulés et semi-déformables.

### 6.2.1. Tracking 3D

Nous avons proposé un projet RIAM : Golf-STREAM (Système d'analyse technique à base de réalité augmentée multi-caméras), qui a été retenu au mois de juin par le CNC et le ministère de l'industrie. Golf-STREAM associe l'INRIA, à la société Symah Vision, la Fédération Française de Golf (FFG) et l'association des golfeurs professionnels (PGA) pour une durée de 33 mois à compter du mois de juin 2002.

### 6.2.2. Résumé du projet

Le projet GOLF-STREAM consiste à capturer les mouvements de swing d'athlètes lors de la couverture médiatique d'un championnat de golf. Lors du tournage, des méta-données sont enregistrées en même temps que les images (informations d'experts du golf, force du vent, trajectoires de balle). Un tracking du corps humain à base d'un modèle 3D anthropométrique à deux couches (squelette + peau) permet de retrouver les valeurs des différents degrés de liberté du corps du champion filmé. Ce modèle 3D n'est autre qu'une marionnette de synthèse qui tente de mimer le mouvement réel et les résultats de tracking permettront de représenter des données techniques sous forme d'éléments synthétiques ajoutés à la vidéo originale. On utilisera une technique de réalité augmentée dans le but de favoriser la compréhension du téléspectateur, d'apporter des éléments d'information aux commentateurs sportifs et des résultats d'analyse de swing aux professionnels pédagogiques du golf. Une reconstruction 3D de l'action capturée permettra également d'élargir la retransmission d'un championnat de golf sur Internet en 3D et de fournir des éléments pédagogiques interactifs. Grâce à notre étroite collaboration avec les professionnels du golf, nous allons construire une base de données de mouvements des meilleurs joueurs européens et français et déterminer les mesures pertinentes à effectuer en vue de les présenter aux commentateurs, téléspectateurs, internautes et golfeurs professionnels. La qualité de ces informations techniques sera tributaire de la précision avec laquelle le tracking sera effectué, ce qui explique l'importance de ce point de recherche dans notre étude.

### 6.2.3. Modélisation d'une marionnette de synthèse

Une marionnette de synthèse est utilisée pour mimer les mouvements de champions de golf. Sa qualité de modélisation est un compromis entre la complexité du nombre de degrés de liberté à déterminer et sa capacité à mimer fidèlement les mouvements de swing. Les valeurs des degrés de liberté de chaque os sont limitées pour que la marionnette de synthèse soit dotée de fonctions de gestion de positions réalistes et de son équilibre. Chaque os exerce une influence sur l'enveloppe corporelle afin de la déformer lorsque la posture de la marionnette est modifiée.

### 6.2.4. Renormalisation et pré-positionnement d'une marionnette de synthèse

Cette marionnette générique est ensuite ajustée à la morphologie des champions filmés. L'ajustement du squelette et de l'enveloppe corporelle se fait semi-automatiquement à partir des images vidéos. La marionnette est ensuite positionnée interactivement sur la première image des séquences vidéos à analyser.



Figure 6. Marionnette de synthèse anthropométrique

### 6.2.5. Processus de tracking

A partir de cette position d'initialisation, la marionnette de synthèse découpe sa texture dans la première image des différents points de vues et un algorithme d'optimisation à base de recuit simulé détermine, pour chaque image vidéo, l'ensemble des degrés de liberté du squelette de la marionnette afin qu'elle mime au mieux le mouvement de swing effectué par un golfeur.

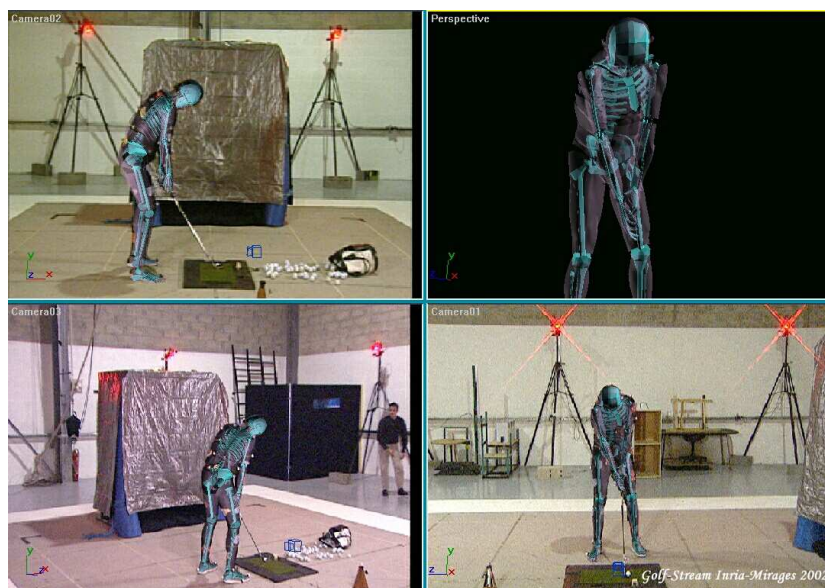


Figure 7. Résultats de tracking

Le processus de tracking minimise une erreur d'appariement entre l'apparence de la marionnette de synthèse et les images vidéos, en respectant la hiérarchie du squelette : A un instant donné, le tronc de la marionnette est d'abord recalé sur les images, avant de procéder au recalage des vertèbres dorsales, des clavicules, du cou ... Chaque essai d'appariement correspond au calcul d'un rendu 3D et d'une comparaison, pixel à pixel, entre l'image de synthèse ainsi générée et les images réelles. Ce processus de tracking continue ainsi, image par image, jusqu'à la fin de la séquence à analyser dans le but de mesurer le mouvement du champion par mimétisme. (cf. résultat de tracking figure 7)

### 6.2.6. *Tournage Trophée Lancôme*

Au début du mois d'octobre, un car régie avec 7 caméras a été placé sur une zone de départ du parcours du golf de Saint Nom La Bretèche dans le but de filmer des swings effectués par les premiers joueurs français.

Nous avons capturé une trentaine de swings par champion, ainsi que des commentaires techniques et les distances parcourues par les balles. Les cinq champions filmés ont également participé à une série de mesures anthropométriques afin de normaliser une marionnette de synthèse de manière semi-automatique. Les caméras ont été calibrés à l'aide d'une mire 3D métallique.



Figure 8. *Tournage Golf-Stream au Trophée Lancôme*

### 6.2.7. *Filtrage de capture de mouvements*

**Participants :** Philippe Gérard, André Gagalowicz.

Afin d'améliorer la productivité du nettoyage des données brutes de motion capture, nous avons développé un module de filtrage adaptatif, à base d'ondelettes, permettant de corriger automatiquement les bruits propres aux systèmes de capture de mouvements optiques. Ce filtre a été implémenté par la société Ex Machina pour sa chaîne de production d'animations de personnages.

## 6.3. *Adaptation morphologique de modèle 3D de visage à partir d'images*

**Participants :** Richard Roussel, André Gagalowicz.

**Mots clés :** *calibration, déformation et interpolation, RBF, modèle 3D, tracking.*

Dans le contexte de l'importance grandissante de la crédibilité des trucages et effets spéciaux dans les média audiovisuels, nous réalisons la première étape d'un processus de suivi automatique de visage à base de modèle 3D dans une séquence vidéo. La technique développée permet de réaliser une adaptation morphologique d'un modèle 3D générique de tête à partir d'une série d'images dépourvues de marqueurs, en l'absence de mire de calibration. Cette étape de création d'un modèle spécifique de visage est motivée par le fait que la poursuite de visage par modèle 3D sera d'autant meilleure que le modèle sera proche des données réelles. La déformation du modèle 3D s'effectue en utilisant des fonctions à base radiale (RBF), dans un système de caméras calibré et initialement sans autre apport que la spécification de correspondances entre des points du modèle 3D et leurs projections dans les images.



En guise d'initialisation du système, un ensemble de plusieurs caméras est calibré, afin de retrouver la pose de chacune des caméras, dans l'espace, par rapport au modèle 3D et conformément aux images, et ceci pour un ensemble d'images significatives de la séquence. On entend par images significatives, des images dont le contenu s'avère utile pour l'adaptation, par exemple, une image de face et une autre de profil. Cette calibration se réalise en effectuant des associations entre des points du modèle 3D et leur projection dans les images. L'algorithme de calibration, place ensuite, la caméra de façon à minimiser la distance entre chaque projection réelle de points 3D du modèle (fournie par l'utilisateur) et la projection de ces mêmes points par rapport à la position estimée de la caméra.

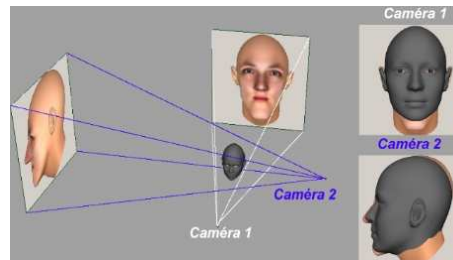


Figure 9.

Une fois le système de caméras calibré, nous pouvons reconstruire, grâce aux multiples vues que nous avons autour du modèle, les positions dans l'espace d'un ensemble de points caractéristiques tels que les commissures des lèvres, le bout du nez ou les coins des yeux. Ces points forment un ensemble discret de points dans l'espace qui appartiennent au modèle spécifique de visage de la personne filmée, car les positions dans l'espace de ces points proviennent d'informations issues des images. En faisant des associations, ensuite, entre ces points 3D reconstruits appartenant au modèle spécifique et leur correspondant du modèle générique de visage, nous pouvons définir des vecteurs de déformation. La déformation du maillage du modèle générique de visage se réalise alors en deux étapes. La première consiste à envoyer chaque sommet 3D du modèle générique sur son correspondant reconstruit. La deuxième étape interpole alors sur l'ensemble des points restants les déformations obtenues grâce aux points reconstruits. L'interpolation de la déformation est un algorithme utilisant les fonctions à base radiales (RBF) en 3D, suivant les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Cette déformation permet d'obtenir un visage très proche du visage spécifique de la personne filmée dans le sens où les éléments principaux du visage tels que la bouche, les yeux ou le nez ont été reconstruits et déformés en 3D de façon à se superposer avec les images. Mais, comme indiqué sur la figure 10, les limitations de la méthode de reconstruction à base de points ont été atteintes.

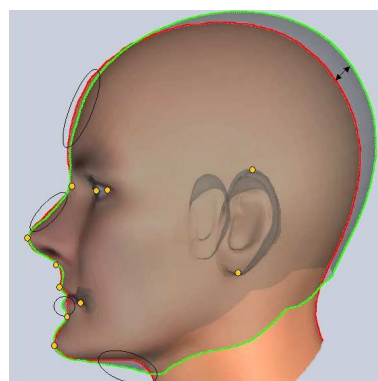


Figure 10.

En effet, les courbures ne peuvent être retrouvées par un tel algorithme. C'est pourquoi, nous avons développé une nouvelle méthode s'ajoutant à la précédente, permettant d'adapter de façon automatique le contour extérieur du visage, sur une ou plusieurs courbes données par l'utilisateur. Ce dernier n'aura qu'à spécifier dans l'image, pour chaque vue qui lui semblera pertinente, des portions de courbe représentant le bord extérieur du visage (les limbes), (voir figure 11).

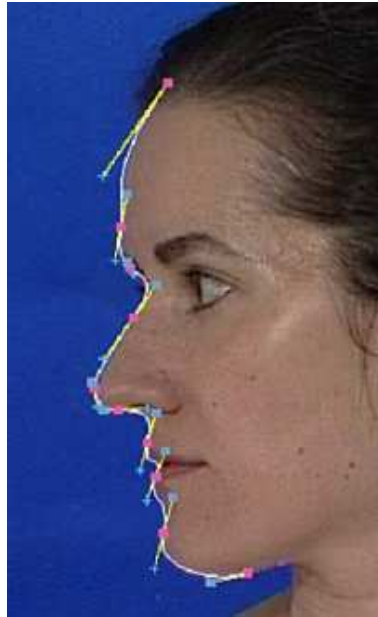


Figure 11.

Notre algorithme va alors calculer, pour chaque vue  $V$ , la liste des arrêtes du modèle 3D qui appartiennent visuellement, par rapport à la vue  $V$ , au contour extérieur du modèle, (voir figure 12). Les arrêtes 3D appartenant à la ligne de limbe du modèle 3D vont alors se déformer afin que leur projection dans les images viennent se superposer sur le contour réel du visage, défini par l'utilisateur. L'idée de l'algorithme est de calculer en 2D, pour chaque image, les déformations qui feront passer la projection de la ligne de limbe 3D sur le contour réel correspondant. Chaque déformation est alors passée au modèle 3D et ajoutée à celles déjà obtenues lors de la reconstruction à base de points caractéristiques. Il suffira alors de relancer la procédure de déformation et d'interpolation basée sur les RBF. Nous obtenons, à la suite de cette procédure des résultats d'une étonnante réalité.

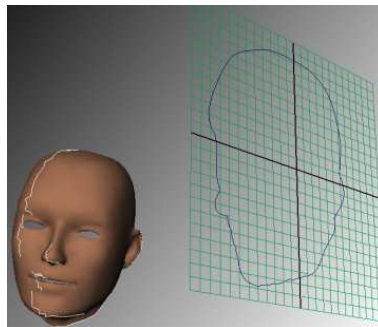


Figure 12.

Afin de finaliser la reconstruction du visage, nous avons complété cet outil d'adaptation géométrique par un outil de texturation qui permet de découper les textures réelles des images et de les plaquer sur le maillage 3D du modèle spécifique. De plus, les éclairages pouvant varier d'une image à l'autre, (voir figure 13), nous avons élaboré un algorithme qui permet de déduire, à partir des images et de la géométrie du modèle 3D, une texture normalisée et uniformisée réduisant considérablement les effets indésirables dus aux changements d'éclairage (voir figure 14).



Figure 13.



Figure 14.

## 6.4. Prépositionnement automatique de patrons 2D sur un mannequin numérique 3D

**Participants :** Franck Thomas, André Gagalowicz.

**Mots clés :** *prépositionnement automatique, patrons 2D, simulation de vêtements.*

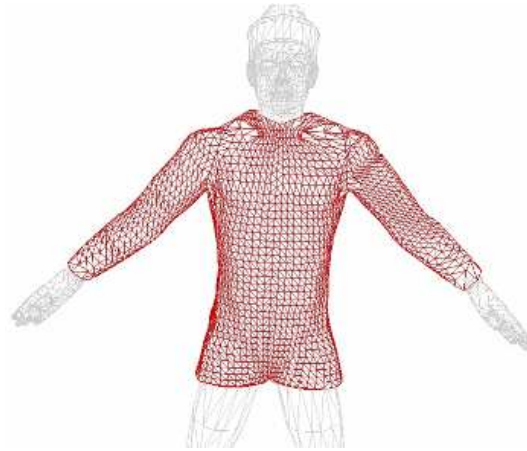
Les vêtements que nous cherchons à simuler sur un personnage numérique 3D sont initialement fournis sous forme de patrons 2D qu'il faut assembler. Il est nécessaire d'utiliser un outil qui prépositionne automatiquement les patrons 2D sur le corps numérique 3D à des fins d'assemblage et de couture puis de simulation mécanique du comportement du vêtement. Notre méthode consiste :

- à trouver, de manière automatique, les points du corps sur lesquels viennent se positionner les points caractéristiques des patrons 2D (sommets d'un polyèdre).
- établir les correspondances entre les ensembles de points,
- effectuer le prépositionnement des patrons.

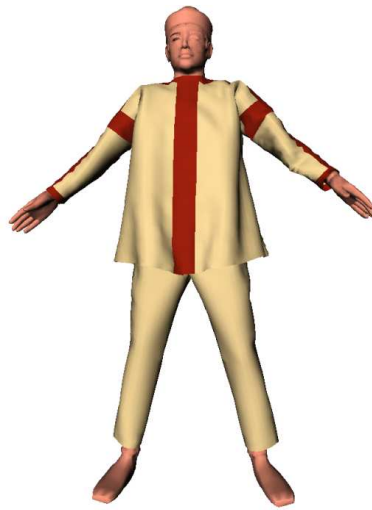
Après le prépositionnement automatique, reste à lancer la simulation mécanique pour le faire retomber sur le corps. Cette dernière étape fait appel au simulateur mécanique développé par Jérémy Denise.

La figure 15 montre un exemple de prépositionnement automatique d'une tunique chinoise ancienne sur un mannequin 3D. Des morceaux de cette tunique ont été découverts dans le désert du Taklamakan lors de recherches archéologiques. La simulation numérique permet de donner une reconstitution du vêtement original.

La figure 16 montre le résultat de son tombé après simulation mécanique.



*Figure 15. Prépositionnement automatique d'une tunique chinoise archéologique sur un mannequin numérique 3D.*



*Figure 16. Tombé d'une tunique chinoise ancienne après son prépositionnement automatique.*

## 6.5. Simulation dynamique de vêtements

**Participants :** Jeremy Denise, David Reversat, André Gagalowicz.

**Mots clés :** *simulation virtuelle de vêtements, courbes de Kawabata, hystérésis, modélisation.*

### 6.5.1. Intégration des modèles non linéaires hystérétiques

Les différents modèles proposés par Jeremy Denise ont été intégrés dans le système de simulation pour le calcul des forces générées par les ressorts de structure, de cisaillement et les ressorts angulaires. Un soin particulier a été apporté pour vérifier que l'ajout de ces modèles non linéaires, ayant un comportement hystérétique, ne mettait pas en défaut l'utilisation d'un schéma d'intégration numérique implicite.

#### 6.5.1.1. Modèles non linéaires hystérétiques

La force  $F(r)$  appliquée au ressort  $r$  est modélisée en 2 termes distincts : dépendant de la déformation  $\varepsilon_r$  du ressort :

$$F(r) = Fe(\varepsilon_r) + \sigma(\varepsilon_r, \text{historique}(r))$$

La composante élastique est définie par un polynôme de degré  $n_e$  qui a le même signe que  $\varepsilon_r$  (courbe symétrique) :

$$Fe(\varepsilon_r) = \sum_{i=1}^{n_e} Ke_i |\varepsilon_r^{i-1}| \varepsilon_r$$

La composante plastique (hystérétique) est définie par une équation différentielle avec polynôme de degré  $n_p$  :

$$\begin{aligned} dS &= |d\varepsilon_r|, & h &= \frac{1}{2} (\varepsilon_r - |\varepsilon_r| \frac{d\varepsilon_r}{dS}) \\ \frac{d\sigma}{dS} &= -Kp_1\sigma + Kp_2 \frac{d\varepsilon_r}{dS} + \sum_{i=1}^{n_p} Kp_{i+2} |h^{i-1}| h \end{aligned}$$

### 6.5.2. Intégration formelle

Le calcul de la composante élastique ne posant aucun problème, il est ici juste question du calcul de  $\sigma$ . On suppose connaître la déformation courante du ressort  $\varepsilon_r = \varepsilon_r(t)$  ainsi que sont historique  $\varepsilon_{prec} = \varepsilon_r(t - \Delta t)$  et  $\sigma_{prec} = \sigma(t - \Delta t)$ . On peut poser :  $\frac{d\varepsilon_r}{dS} = \text{sign}(\varepsilon_r - \varepsilon_{prec})$  et supposer qu'il a été constant entre  $t - \Delta t$  et  $t$ .

On peut donc obtenir une expression formelle de  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon_r} = \frac{d\sigma}{dS} \frac{dS}{d\varepsilon_r}$  qui peut être formellement intégrée pour un  $dS = (\pm d\varepsilon_r)$  et un  $\frac{d\varepsilon_r}{dS} = (\pm 1)$  fixé.

$$\sigma(\varepsilon_r) = (\sigma_{prec} - \text{poly}(\varepsilon_{prec})) e^{-Kp_1(\varepsilon_r - \varepsilon_{prec}) \frac{d\varepsilon_r}{dS}} + \text{poly}(\varepsilon_r)$$

Avec  $\text{poly}(\varepsilon)$  un polynôme en  $h$  dont les coefficients sont dépendants des  $Kp_i$ .

#### 6.5.2.1. Symétrie du système obtenu

L'intégration numérique utilisée dans le simulateur fait appel à une méthode dite du gradient conjugué inverse une matrice symétrique. La matrice est calculée par blocs à partir des dérivées des forces associées aux ressorts. Nous avons démontré que la matrice des dérivées obtenues à partir des lois définies ci-dessus était bien symétrique.

#### 6.5.2.2. Positivité du système

La méthode de gradient conjugué est prévue pour inverser une matrice définie positive. La défini-positivité du système obtenu n'a pas été pour l'instant démontrée formellement ; cependant des tests ont montré qu'en ne prenant pas un pas de temps trop grand, le système était numériquement défini positif.

## 6.6. Modélisation du cisaillement par Kawabata

**Participants :** David Reversat, André Gagalowicz.

**Mots clés :** simulation virtuelle de vêtements, courbes de Kawabata, hystérésis, cisaillement.

### 6.6.1. Motivations

Les courbes modèles de comportement du cisaillement nous donnent la force en fonction de l'angle de cisaillement d'une éprouvette de tissu ; cependant le simulateur actuel est basé sur des ressorts linéiques pour modéliser le cisaillement. Pour pouvoir utiliser les informations de ces modèles, il faut trouver un moyen de transférer les informations angulaires en élongation. Une fonction de transfert a été proposée puis validée pour passer d'un modèle force/angle à un modèle force/déformation.

### 6.6.2. Equations

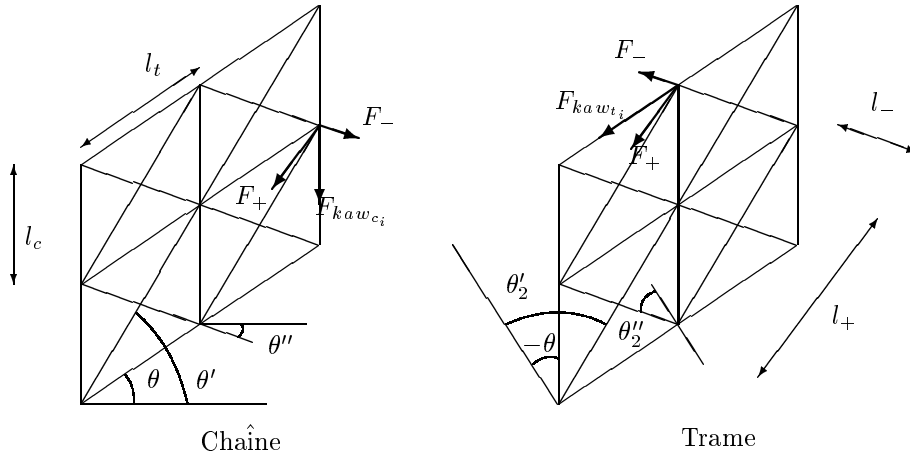


Figure 17. géométrie du cisaillement pur

La figure 17 montre un échantillon de tissu cisillé en chaîne et en trame. Connaissant pour un angle  $\theta$  donné la résultante sur la masse  $i$  des forces  $F_{kawti}$  et  $F_{kawci}$  (provenant des courbes modèles de Kawabata), la force à exercer sur les ressorts de cisaillement  $F_+$  et  $F_-$  pouvait se mettre sous la forme :

$$F_+ = \frac{1}{2} \left( \frac{F_{kawci}}{l_c} + \frac{F_{kawti}}{l_t} \right) \frac{l_c \sin \theta'' - l_t \sin \theta'}{\Delta} + \frac{1}{2} \left( \frac{F_{kawci}}{l_c} - \frac{F_{kawti}}{l_t} \right) \frac{l_c \sin \theta'' + l_t \sin \theta'}{\Delta} \quad (1)$$

$$F_- = \frac{1}{2} \left( \frac{F_{kawci}}{l_c} + \frac{F_{kawti}}{l_t} \right) \frac{l_c \sin \theta' - l_t \sin \theta''}{\Delta} + \frac{1}{2} \left( \frac{F_{kawci}}{l_c} - \frac{F_{kawti}}{l_t} \right) \frac{l_c \sin \theta' + l_t \sin \theta''}{\Delta} \quad (2)$$

tré que l'on pouvait faire les approximations suivan

Nous avons montré la validité des approximations suivantes pour  $F_+(\theta) = -F_-(-\theta)$ , considérant que les courbes de données de Kawabat  $F_{Kawc}$  et  $F_{Kawt}$  étaient identiques et antisymétriques.

$$F_+(\theta) = F_{Kaw}(\theta) \frac{l_c \sin \theta'' - l_t \sin \theta''}{\Delta}$$

La déformation du ressort correspondant à un angle donné est :

$$\varepsilon_+(\theta) = \frac{l_+}{\sqrt{l_c^2 + l_t^2}} - 1 = \sqrt{1 + 2 \frac{l_c l_t}{l_c^2 + l_t^2} \sin \theta} - 1$$

La fonction de transfert du ressort de cisaillement est donc  $(\varepsilon_+, F_+)$ , c'est elle qui a été appliquée pour obtenir la mesure de la figure 18

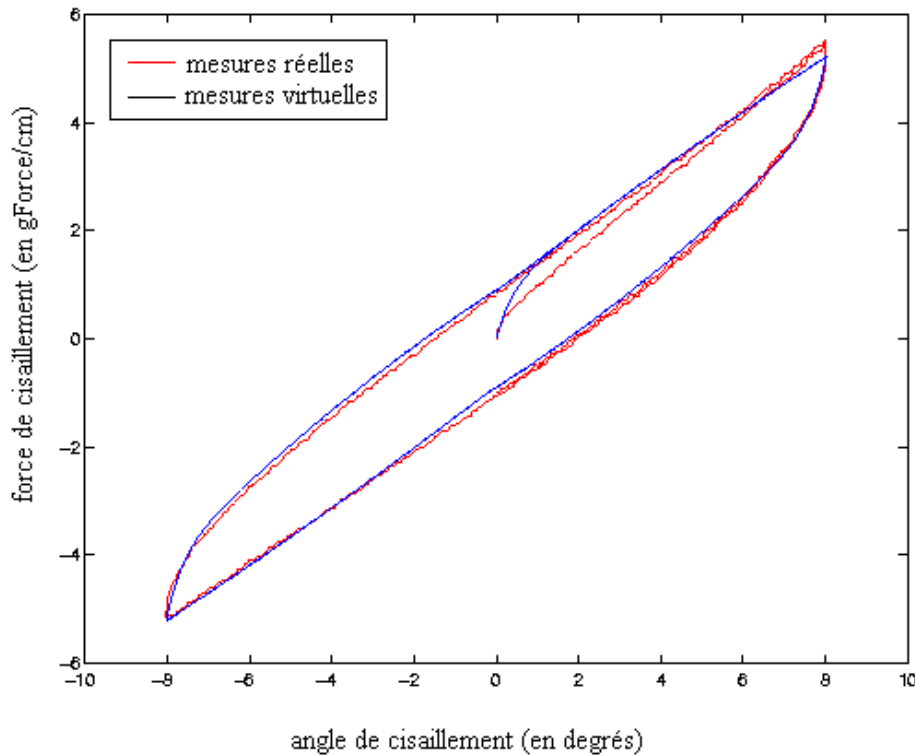


Figure 18. force mesurée en fonction de l'angle de cisaillement

## 6.7. Validation du modèle

**Participants :** David Reversat, Hatem Charfi, André Gagalowicz.

**Mots clés :** simulation virtuelle de vêtements, courbes de Kawabata, hystérésis, intégration numérique.

Les expériences de Kawabata permettent de caractériser d'une façon unique un tissu donné.

La validation du simulateur consiste donc à prouver qu'il produit les mêmes courbes que celles obtenues par les machines de Kawabata pour un même tissu.

On modélise alors les tests réels pour obtenir les mêmes mouvements aux mêmes vitesses et on calcule les forces obtenues dans les 3 cas : Tension, Cisaillement et Flexion.

Dans les trois cas, on considère un morceau de tissu rectangulaire qu'on discrétise en chaîne et en trame comme exposé plus haut. Le contrôle s'effectue donc sur les nœuds du maillage.

### 6.7.1. Modélisation du cisaillement

#### a) Introduction

Les courbes modèles de comportement du cisaillement fournies par Kawabata nous donnent la force par unité de longueur en fonction de l'angle de cisaillement d'une éprouvette de tissu. Cependant, notre simulateur nous fournit seulement les forces aux points massiques. De plus, le cisaillement est modélisé par des ressorts linéiques. Le problème est de savoir si cette modélisation est valide.

Pour pouvoir utiliser les informations fournies par Kawabata, il faut trouver un moyen de transférer les informations recueillies (mesures des forces en certains points) en informations angulaires par unité de longueur. Une fonction de transfert a été proposée puis validée pour passer des mesures de forces aux points de contrôle (cf figure 19) à l'expression de la force de cisaillement par unité de longueur et en fonction de l'angle de cisaillement.

#### b) Modélisation du cisaillement

Virtuellement, l'expérience de Kawabata se schématise ainsi :

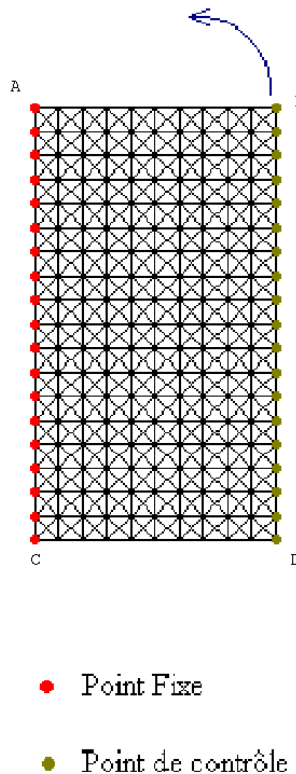


Figure 19. Test de cisaillement virtuel

Toutes les masses du segment BD sont tirées dans la direction de BD. Comme les ressorts de structure ne doivent pas être sollicités théoriquement, B (ainsi que les autres masses de BD) décrit un arc de cercle de centre A.

#### c) Conditions expérimentales

Les expériences de Kawabata se font à une vitesse quasi nulle afin de rendre négligeable l'effet de l'inertie du tissu et avoir ainsi un cisaillement pur. C'est pourquoi il est important de réaliser l'expérience virtuelle de cisaillement à la même vitesse que celle de l'expérience réelle.



#### d) Résultats

On obtient La courbe de mesures virtuelles de la figure 17, à comparer avec les courbes de l'expérience réelle de Kawabata : Le mouvement de cisaillement virtuel est donc bien conforme au cisaillement réel.

### 6.7.2. Modélisation de la tension

Virtuellement, l'expérience de traction de Kawabata se schématise comme l'indique la figure 20.

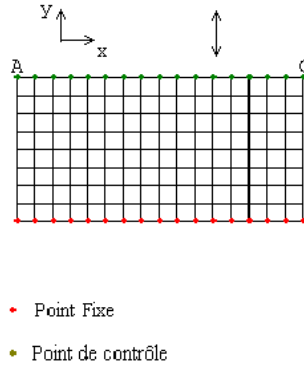


Figure 20. Test de traction virtuel

#### a) Conditions expérimentales

Dans le cadre de notre modèle, on impose un déplacement, dans la direction  $y$  (voir figure 20), à toutes les masses le long de la longueur  $AC$ .

La force de Kawabata est calculée à chaque instant, à partir des forces appliquées à chaque masse. Le déplacement se fait à vitesse constante jusqu'à ce que la force appliquée sur le segment  $AC$  atteigne la valeur de 500 gF/cm. Ensuite, on impose un mouvement dans l'autre sens jusqu'à ce que la force appliquée sur  $AC$  s'annule.

#### b) Résultats

Nous sommes parvenus à une courbe de mesures virtuelles superposable sur la courbe de l'expérience réelle de Kawabata (figure 21) : le test de traction est validé.

### 6.7.3. Modélisation de la flexion

#### a) Description de l'expérience virtuelle

Dans l'expérience de Kawabata, pour une courbure  $K$ , l'extrémité du tissu est positionnée ainsi :

$$\begin{cases} X = \frac{\sin LK}{K} (= 0, & \text{si } K = 0) \\ Z = \frac{1 - \cos LK}{K} (= L, & \text{si } K = 0) \\ Y = cste \end{cases} \quad (3)$$

Comme nous travaillons en discret, l'arc de cercle est, en fait, approximé par une ligne brisée inscrite dans la courbe décrite par 3 dans le plan  $(X,Z)$ . La longueur totale de cette ligne est égale à 1 cm (en conformité avec l'expérience de Kawabata). Cette situation est illustrée par la figure 22.

#### b) Adaptation de l'équation du mouvement

Afin de pouvoir réaliser une flexion « pure », il faut que la ligne brisée ait une longueur constante  $L_{ini} = n \cdot l_s$ . Il faut alors imposer que  $l_s = cste$ .

Or, d'après la figure 22, nous avons :

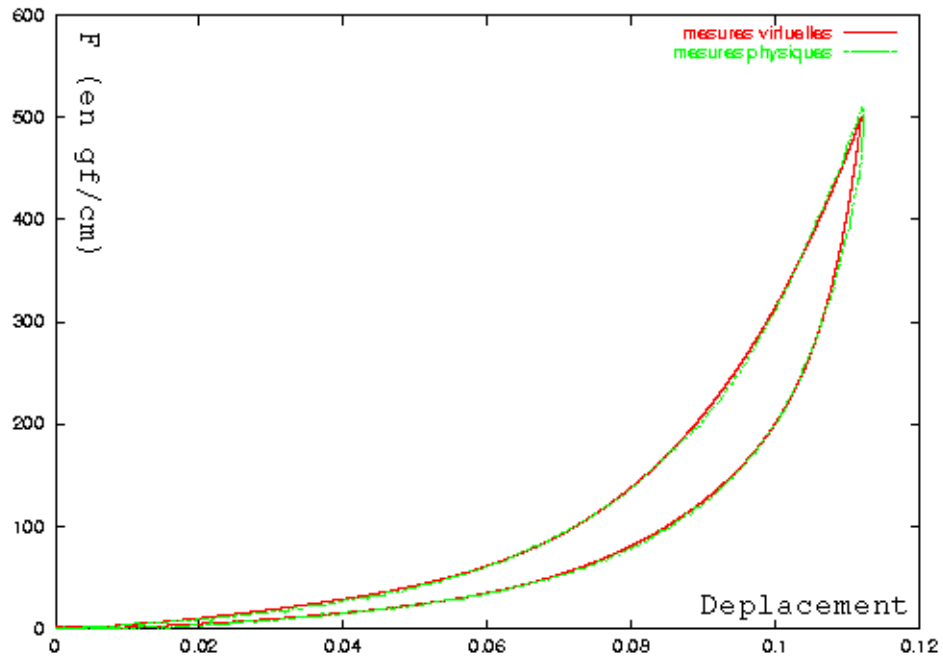


Figure 21. Traction : force mesurée en fonction de la déformation du tissu

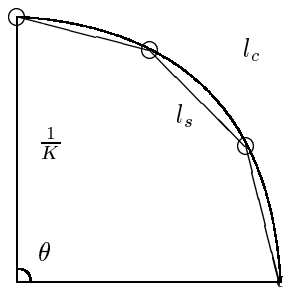


Figure 22. Essai de flexion dans le cas discret

$$\begin{aligned}
 l_c &= \frac{\theta}{n \cdot K} \\
 l_s &= \frac{2 \sin \frac{\theta}{2n}}{K} \\
 \frac{l_s}{l_c} &= \frac{2n \sin \frac{\theta}{2n}}{\theta} \\
 &= \frac{2 \sin \frac{K \cdot l_c}{2}}{K \cdot l_c}
 \end{aligned}$$

Ainsi, il faut donc que l'arc de cercle associé ait pour longueur :

$$l_c = \frac{\theta}{nK} = \frac{2 \arcsin \frac{K \cdot l_s}{2}}{K}$$

Les lois de mouvement s'écrivent alors :

$$\alpha = 2n \arcsin \frac{K \cdot L}{2n}$$

$$X = \frac{\sin \alpha}{K} \quad (= 0, \quad \text{si } K = 0)$$

$$Y = \text{cste}$$

$$Z = \frac{1 - \cos \alpha}{K} \quad (= 1, \quad \text{si } K = 0)$$

### c) Résultats

Finalement, on arrive à une courbe de mesures virtuelles superposable à la courbe de l'expérience réelle de Kawabata (figure 23) : le test de flexion est validé.

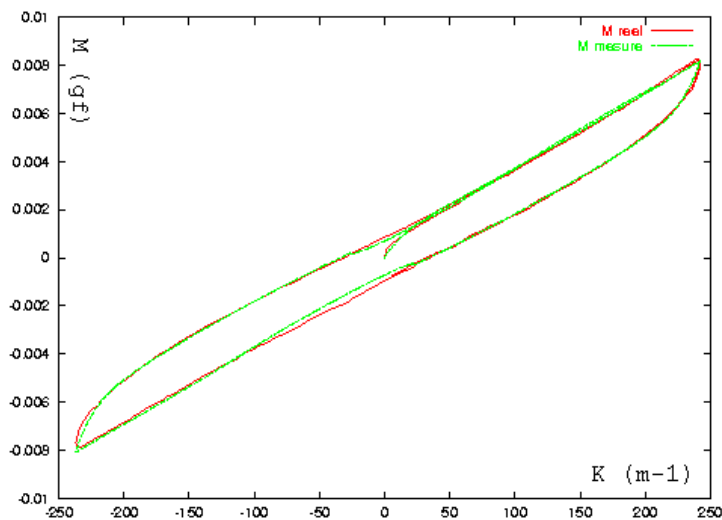


Figure 23. Flexion : moment mesuré en fonction de la courbure moyenne du tissu

Les résultats des expériences de Kawabata en tension, cisaillement et flexion montrent que nous sommes parvenus à modéliser de manière réaliste un tissu (tissé en chaîne et en trame). Ceci est dû au choix d'un modèle hybride ressorts binaires - ressorts angulaires, non linéaire et hystérétique.

## 6.8. Modèles d'auto-collisions masses-facettes

**Participant :** David Reversat.

**Mots clés :** *simulation virtuelle de vêtements, contraintes, auto-collisions.*

### 6.8.1. Motivation

Nous avons tenté d'étendre la gestion des collisions telle que le faisait Baraf, pour traiter les auto-collision. Le but est de fournir à son algorithme de gestion de contraintes, un ensemble de directions et de vitesses permettant de résoudre tous les types de collisions.

### 6.8.2. Auto-collisions masses-facettes

#### 6.8.2.1. Détection

Nous considérons une collision entre une facette  $f$  de masses  $A$ ,  $B$  et  $C$  et la masse  $P$  entre les instant  $t_0$  et  $t_0 + dt$ . Nous cherchons dans cet intervalle le premier instant de collision, c'est à dire le premier instant où la distance entre la masse  $P$  et la facette est égale à  $\delta$ .

$$\begin{aligned} \overrightarrow{N}(t) &= \overrightarrow{AB}(t) \wedge \overrightarrow{AC}(t) \\ \overrightarrow{N}(t) \cdot \overrightarrow{AP}(t) &= \pm \delta \|\overrightarrow{N}(t)\| \end{aligned}$$

L'introduction de  $\|\overrightarrow{N}(t)\|$  fait que l'on ne peut pas résoudre le système. Nous avons fait l'approximation suivante :  $\|\overrightarrow{N}(t)\| \approx \|\overrightarrow{N}(t_0)\|$ .

On a finalement :

$$\overrightarrow{N}(t) \cdot \overrightarrow{AP}(t) = \pm \delta \|\overrightarrow{N}(t_0)\|$$

On regarde ensuite pour tous les  $t_i$  solution si la projection de la masse  $P$  est bien dans le triangle en calculant les coordonnées intrinsèque  $u$  et  $v$  de  $P$  sur  $A B C$  :  $\overrightarrow{AP}(t_i) = u\overrightarrow{AB}(t_i) + v\overrightarrow{AC}(t_i)$  et en vérifiant ensuite que  $u \geq 0$ ,  $v \geq 0$  et  $u + v \leq 1$  modulo une certaine tolérance. Nous gardons ensuite le plus petit des  $t_i$  vérifiant les conditions ci-dessus.

### 6.8.3. Gestion de la contrainte

#### 6.8.3.1. Vitesse de groupe

La containte porte sur les masses  $P$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . La direction  $\overrightarrow{D}$  de la contrainte est la normale à la facette a l'instant  $t_0$  multipliée par  $\pm 1$  pour qu'elle pointe toujours dans la direction où  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ne doivent pas aller et où  $P$  doit aller. La contrainte a pour but d'empêcher la collision, pour cela, elle fait en sorte que les projection des vitesses des différentes masses selon  $\overrightarrow{D}$  soit toutes égale.

Soit  $masse_{inter}$  et  $\overrightarrow{Vit}_{inter}$  respectivement les masses et vitesses interpolées au point de collision de la facette. Une vitesse de groupe est calculée selon  $\overrightarrow{D}$  :

$$Vg = \frac{(mass(M) \cdot \overrightarrow{Vit}(M) + masse_{inter} \cdot \overrightarrow{Vit}_{inter}) \cdot \overrightarrow{D}}{mass(M) + masse_{inter}}$$

#### 6.8.3.2. Feedback du gradient conjugué

Le résidu du gradient conjugué  $r = A \cdot \Delta v - b$  contient pour chaque masse, la « force équivalente » qu'il a fallu imposer pour imposer la contrainte. L'idée est d'utiliser cette « force » pour modifier la vitesse de groupe définie ci-dessus. Soit  $\overrightarrow{Res}_{inter}$  le residu interpolate a l'endroit de la collision, la force totale que l'on a appliqué pour empêcher la collision est :

$$\overrightarrow{F}_{tot} = \frac{\overrightarrow{Res}(M) + \overrightarrow{Res}_{inter}}{dt}$$

Si on rajoute une contribution d'accélération  $A_{res}$  à la vitesse contrainte, on rajoute à notre système de 4 masses une force :  $mass(ABCP) * A_{res}$ . Si on veut que cette accélération contrebalance  $F_{tot}$  définie précédemment, il faut définir  $A_{res}$  de cette manière :

$$\begin{aligned} A_{res} &= \frac{dVg}{dt} = \frac{1}{dt} \frac{(\overrightarrow{Res(M)} + \overrightarrow{Res_{inter}}) \cdot \overrightarrow{D}}{mass(M) + mass(A) + mass(B) + mass(C)} \\ Vg &= Vg + dVg \end{aligned}$$

### 6.8.3.3. Suppression

La contrainte disparaît quand une des conditions  $u \geq 0, v \geq 0$  ou  $u + v \leq 1$  n'est plus vérifiée, ou quand les « forces » au niveau de la collision ont tendance à se repousser :

$$si \frac{\overrightarrow{Res(M)} \cdot \overrightarrow{D}}{mass(M)} \cdot sensN < \frac{\overrightarrow{Res_{inter}} \cdot \overrightarrow{D}}{masse_{inter}} \cdot sensN$$

## 6.8.4. Auto-collisions segments-segments

### 6.8.4.1. Détection

Nous considérons la collision entre le segment  $s1$  (reliant  $A$  et  $B$ ) et le segment  $s2$  (reliant  $C$  et  $D$ ). La détection recherche  $t, u$  et  $v$  tq

$$P(t) = A(t) + u \cdot AB(t) = C(t) + v \cdot CD(t) = Q(t) \quad (4)$$

- Les 4 points sont toujours coplanaires : On cherche un alignement des ensemble de point suivant :  $ABC, ABD, ACD$  et  $BCD$ , qui correspond à un « début » de collision. Pour cela on résout :  $(\overrightarrow{IJ}(t_i) \wedge \overrightarrow{IK}(t_i)) = \overrightarrow{0}$  selon toutes les composantes. On détermine ensuite facilement  $u$  et  $v$  par produits scalaires.
- Les 4 points ne sont pas toujours coplanaires : On recherche  $t_i$  tq  $(\overrightarrow{AB}(t_i) \wedge \overrightarrow{CD}(t_i)) \cdot \overrightarrow{AC}(t_i) = 0$ , on résout ensuite  $u$  et  $v$  par projection de 4 selon  $\overrightarrow{AB}(t_i)$  et  $\overrightarrow{CD}(t_i)$ .

### 6.8.4.2. Traitement

Dans sa globalité le traitement est fait de la même manière que pour les auto-collisions masse-facette : calcul d'une accélération de groupe à partir du résidu et d'une vitesse de groupe avec la moyenne. Le seul problème réside dans le choix de la direction  $\overrightarrow{D}$  de contrainte. Soient  $P$  et  $Q$  les points les plus proches des segments  $s1$  et  $s2$  définis par les coordonnées  $u$  et  $v$  à  $t_0$ . Quatre cas se présentent alors :

- $u \in [0 - 1]$  et  $v \in [0 - 1]$  : Pour que les segments glissent sur des plans parallèles, on peut prendre

$$\overrightarrow{D} = \overrightarrow{PQ} = -u \cdot \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC} + v \cdot \overrightarrow{CD}$$

- $u \notin [0 - 1]$  et  $v \in [0 - 1]$  :  $\overrightarrow{D}$  doit être orthogonal à  $\overrightarrow{CD}$  : ainsi le segment  $CD$  glissera dans un plan dont  $AB$  ne se rapprochera jamais.

$$\overrightarrow{D} = (\overrightarrow{CD} \wedge (\overrightarrow{AC} + \overrightarrow{BD})) \wedge \overrightarrow{CD}$$

- $u \in [0 - 1]$  et  $v \notin [0 - 1]$  : Cas symétrique

$$\overrightarrow{D} = (\overrightarrow{AB} \wedge (\overrightarrow{AC} + \overrightarrow{BD})) \wedge \overrightarrow{AB}$$

- $u \notin [0 - 1]$  et  $v \notin [0 - 1]$  : On peut prendre l'une ou l'autre des 2 configurations précédentes.

## 7. Contrats industriels

### 7.1. Contrat du CNC VIP3D

**Participants :** Richard Roussel, Philippe Gérard, André Gagalowicz.

Contrat CNC en collaboration avec MIKROS Image sur la poursuite d'êtres humains (corps et visages) dans les séquences monoculaires pour la post-production vidéo. Ce contrat fait suite aux deux contrats ESPRIT Multimédia et NEMESIS I et NEMESIS II. Le but est de généraliser les techniques mises au point dans le cadre d'objets rigides dans NEMESIS, au cas d'objets articulés et déformables.

### 7.2. Contrats du CNC : Golf-STREAM

**Participants :** Wei Du, Philippe Gérard, André Gagalowicz.

Contrat CNC en collaboration avec Symah Vision, PGA France et FFG pour la poursuite du mouvement humain lors de l'exécution de swings de golf. Ce contrat fait suite aux deux contrats ESPRIT : NEMESIS 1 et NEMESIS 2. Le but est de généraliser les techniques mises au point dans le cadre d'objets rigides dans NEMESIS, au cas d'objets articulés et déformables.

## 8. Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1. Actions nationales

- Collaboration avec le projet MERLIN à Rocquencourt autour du contrat EUREKA COMEDIA avec LECTRA SYSTEMES comme coordinateur.  
Le contrat COMEDIA a pour but d'une part, de créer un logiciel 3D dynamique adapté au monde de la confection (stylistes, modélisation) pour concevoir de nouveaux vêtements, et d'autre part, de fournir une simulation de défilé de mode numérique. Ce contrat a été labellisé en juin 1998 et a démarré en janvier 2000 pour une durée de 3 ans.
- Collaboration avec la société ATTITUDE STUDIO pour l'étude de l'habillage d'un avatar humain (cf EVA SOLAL conçu par ATTITUDE STUDIO) avec un simulateur réaliste de vêtements à mettre au point par MIRAGES.  
Un pose d'accueil a été attribué par l'INRIA à David Reversat pour qu'il puisse travailler sur ce domaine (participants : Jeremy Denise, Franck Thomas, David Reversat, André Gagalowicz).

### 8.2. Actions financées par la communauté européenne

#### 8.2.1. Contrat EUREKA COMEDIA

**Participants :** Jérémy Denise, André Gagalowicz, Anabelle Le Hyaric, Franck Thomas.

Ce contrat, signé début 2000 a démarré officiellement le 1er avril 2000. C'est un contrat dont le coordinateur principal est Lectra Systèmes. Quasiment tous les partenaires étrangers sur ce contrat ont disparu pour des raisons diverses et variées. Il ne reste qu'un utilisateur final GFT (italien). Les autres membres sont le projet MERLIN et l'action MIRAGES de l'INRIA-Rocquencourt. Ce projet a été signé pour une durée de trois ans. Sa thématique est la production d'un défilé de mode numérique ainsi que la création d'un outil de simulation de vêtements pour les créatifs de la mode (stylistes et modélistes).

### 8.3. Actions bilatérales internationales

- Collaboration entre le KRDL (Institut de recherche de Singapour) et le projet MIRAGES sur des problèmes de poursuite de visages et de simulation de vêtements. André Gagalowicz s'est rendu au KRDL de juillet à octobre 2000 au titre de cette collaboration.
- Collaboration dans le même domaine avec NTU (Nanyang Technological University de Singapour) où André Gagalowicz travaille actuellement.

## 8.4. Accueil de chercheurs étrangers

Le Dr. Wei Du effectue un séjour de deux ans depuis début octobre 2002 dans Mirages et y travaille sur la poursuite d'objets dans des séquences d'images.

# 9. Diffusion des résultats

## 9.1. Animation de la Communauté Scientifique

André Gagalowicz est :

- Conseiller scientifique à l'INSA de Lyon,
- Conseiller scientifique à l'Université de Bordeaux I,
- Membre des comités de lecture de la revue « Machine, Graphics and Vision », de la revue du LCPC, de la revue « Computer Graphics and Geometry ».

## 9.2. Comité éditoriaux de Conférences

André Gagalowicz a été membre du comité de programme de :

- SMI2002 à Barnff (Canada)
- du Workshop sur les Textures à ECCV'2002
- IVCNZ'2002 à Auckland, Nouvelle Zélande
- ACVIS'2002 à Gand (Belgique)
- ICCVG2002 à Zakopane (Pologne).

## 9.3. Enseignement

- André Gagalowicz a enseigné le traitement des images à l'ESIEA en dernière année de cycle ingénieur.
- André Gagalowicz a assuré le cours d'infographie commun pour les élèves de dernière année de l'ENSTA.
- André Gagalowicz a assuré un cours de 6h sur la collaboration analyse/synthèse d'images à l'INT (Evry), pour les élèves de dernière année.

## 9.4. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- Richard Roussel a participé en tant qu'auditeur à la conférence AMDO (Majorque, novembre 2002).
- Philippe Gérard a participé en tant qu'auditeur à la conférence AMDO (Majorque, novembre 2002).
- Philippe Gérard a présenté un article scientifique à l'INSEP aux Journées Internationales du Sport de Compétition (Paris, octobre 2002).
- André Gagalowicz a présenté une conférence invitée :
  - à IVCNZ2002, Auckland (Nouvelle Zélande) du 26 au 28 novembre 2002,
  - à ICCVG2002 a Zakopane (Pologne) du 25 au 29 septembre 2002,
  - à ACVIS2002 à Gand (Belgique) du 9 au 11 septembre 2002,
  - à VRIC2002 à Laval (France) du 18 au 20 juin 2002,
  - à la conférence SSAA à Clermont-Ferrand (France) du 30 au 31 juin 2002,
  - à SMI2002 à Barnff (Canada) du 21 au 22 mai 2002.

- André Gagalowicz a été invité à la réunion Hitachi à Budapest (Hongrie) du 24 au 26 mai 2002,
- André Gagalowicz a organisé la réunion Iliatech du 4 avril 2002 sur la simulation d'objets mous à l'INRIA Rocquencourt,
- André Gagalowicz a été membre du comité scientifique du Workshop sur les Textures de ECCV2002 et a participé à ECCV2002 à Kopenhague (Danemark) du 31 mai au 1er juin 2002.

## 10. Bibliographie

### Bibliographie de référence

- [1] D. BARAFF, A. WITKIN. *Large steps in cloth simulation*. in « Proceedings of SIGGRAPH'98, pages 43-54 », Juillet 1998.
- [2] P.-A. BLIMAN, M. SORINE. *Easy-to-use realistic dry friction models for automatic control*. in « Proceedings of 3rd European Control Conference », 1995.
- [3] J.-C. GILBERT. *Optimisation : Théorie et Algorithmes*. in « INRIA Rocquencourt », 1998.
- [4] S. KAWABATA. *The Standardisation and analysis of hand evaluation*. in « The Textile Machinery Society of Japan », 1980.
- [5] D. KOLLER, K. DANIILIDIS, H. NAGEL. *"Model-Based Object Tracking in Monocular Image Sequences of Road Traffic Scenes"*. in « International Journal of Computer Vision », numéro 3, volume 10, 1993, pages 257-281.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [6] A. GAGALOWICZ. *3D Realistic Simulation of Garments*. in « Proceedings of IVCNZ2002 Conference », Auckland, november, 2002.
- [7] A. GAGALOWICZ. *Applications of Virtual Reality and Simulation*. in « Proceedings of the VRIC2002 Conference », Laval, June, 2002.
- [8] A. GAGALOWICZ. *Control of the Mechanical Properties of Textile*. in « Proceedings of the ACVIS2002 Conference », Gand, september, 2002.
- [9] A. GAGALOWICZ. *Modélisation d'objets mous : applications à la simulation de textiles tissés*. in « Présentation Iliatech », Rocquencourt, avril, 2002.
- [10] A. GAGALOWICZ. *Modélisation de Textures définies sur des Surfaces 3D*. in « Proceedings de la Conférence SSAA2002 », Clermont-Ferrand, juin, 2002.
- [11] A. GAGALOWICZ. *Morphological Object Modeling*. in « Proceedings of the SMI2002 Conference », Barnff, mai, 2002.
- [12] A. GAGALOWICZ. *Simulation of Garments*. in « Proceedings of the ICCVG2002 Conference », Zakopane, september, 2002.