

L'humain virtuel

thème 1 : modélisation

S.	Akkouche	LIRIS - UCB Lyon
A.	Barbier	LIRIS - UCB Lyon
F.	Bertails	EVASION/GRAVIR - INPG
M.P.	Cani	EVASION/GRAVIR - INRIA RA
D.	Gillard	LERI-Reims
C.	Larboulette	EVASION/GRAVIR - INRIA RA
F.	Multon	LPBEM Rennes 2
A.	Perrin	IMA Grenoble
L.	Reveret	EVASION/GRAVIR - INRIA-RA

13 décembre 2004

Table des matières

1	Introduction	7
2	Le point de vue anatomique et biomécanique	9
2.1	Le point de vue anatomique	9
2.1.1	Définitions	9
2.1.1.1	Muscles	9
2.1.1.2	Peau	10
2.1.2	Propriétés mécaniques	11
2.1.2.1	Muscles	11
2.1.2.2	Peau	11
2.2	Le point de vue biomécanique	11
2.2.1	Système de coordonnées	11
3	Modélisation du corps humain	13
3.1	Habillage géométrique surfacique et ses déformations	13
3.1.1	Interpolation de formes clefs	13
3.1.1.1	Principe	13
3.1.1.2	Pose Space Deformation (Lewis)	14
3.1.2	Déformations dans les sous-espaces du squelette ou skinning	14
3.1.2.1	Principe	14
3.1.2.2	Utilisation de l'axe médian pour automatiser le calcul des paramètres (bloomenthal)	15
3.1.2.3	EigenSkin (kry)	16
3.1.3	Cas des modèles paramétriques	17
3.1.3.1	B-splines hiérarchiques (forsey)	17
3.1.4	Utilisation des FFD (Singh)	19
3.2	Modèles en couches	19
3.2.1	Muscles pour des déformations cinématiques	19
3.2.1.1	Modèles géométriques	19
3.2.1.2	Modèles physiques	25
3.2.2	Muscles dynamiques	27
3.2.2.1	Surface polygonale + ressorts (aubel)	27
3.2.2.2	Représentation de la ligne d'action du muscle	27
3.2.2.3	Animation	27
3.2.3	Tissus cinématiques	28
3.2.3.1	Éléments finis non temps-réel (Gourret)	28
3.2.3.2	Éléments finis temps réel (Cotin)	29

	3.2.3.3	Élasticité linéaire	29
	3.2.3.4	Élasticité non-linéaire	30
	3.2.3.5	Vers le temps-réel	31
3.2.4		Tissus Dynamiques	33
	3.2.4.1	Masses ressorts (Chadwick)	33
	3.2.4.2	Éléments finis	33
	3.2.4.3	Éléments finis hiérarchiques - temps réel (debonne)	34
	3.2.4.4	Dynamic Response Texture - temps réel (james)	34
	3.2.4.5	Stiffness Warping : élasticité non linéaire, temps réel (Müller)	35
3.2.5		Peau élastique	35
	3.2.5.1	Surfaces triangulées (Wilhelms)	35
	3.2.5.2	Surfaces implicites (scheepers)	37
3.3		Plis de la peau et/ou de vêtements	37
	3.3.1	Bosselage ou bump mapping et displacement mapping	37
	3.3.2	Déformations géométriques du maillage	39
	3.3.2.1	Rides créées à partir de splines	39
	3.3.2.2	Textures de dilatation	39
	3.3.2.3	Préservation de contraintes	39
	3.3.3	Conclusion	40
4		Le visage	41
4.1		Présentation de l'animation faciale	41
	4.1.1	Origine	41
	4.1.2	Objectifs	41
	4.1.3	Contraintes	42
	4.1.4	Motivations	42
	4.1.5	Techniques	43
4.2		L'expression faciale par la géométrie	44
	4.2.1	Interpolations	44
	4.2.1.1	Problématique	44
	4.2.1.2	Interpolation de paramètres	44
	4.2.1.3	Positions-clés ("keyframing")	44
	4.2.1.4	Formes de mélange ("blend shapes")	45
	4.2.1.5	Avantages et Limitations	45
	4.2.2	Simulations physiques de muscles	46
	4.2.2.1	Problématique	46
	4.2.2.2	Modélisation des muscles par un système masse-ressort	47
	4.2.2.3	Modélisation des muscles par un champ vectoriel	47
	4.2.2.4	Réseaux de ressorts, modèle en couches	48
	4.2.2.5	Avantages et Limitations	49
	4.2.3	Pseudo-muscles	49
	4.2.3.1	Problématique	49
	4.2.3.2	Modélisation de pseudo-muscles par des déformations de formes libres	50
	4.2.3.3	Modélisation de pseudo-muscles par des splines	51
	4.2.3.4	Avantages et Limitations	52
	4.2.4	Méthode des éléments finis	52
4.3		L'expression faciale par les images	52
	4.3.1	Métamorphose (morphing)	52

4.3.1.1	Problématique	52
4.3.1.2	Métamorphose d'images (Morphing 2D)	52
4.3.1.3	"View Morphing"	53
4.3.1.4	Métamorphose 3D	54
4.3.1.5	Morphing spécifique à l'animation faciale	55
4.3.1.6	Avantages et Limitations	56
4.4	Techniques liées à la morphologie	56
4.4.1	Mise en correspondance géométrique	56
4.4.1.1	Problématique	56
4.4.1.2	Clonage d'expression	56
4.4.1.3	Avantages et Limitations	57
4.4.2	Extraction et resynthèse de paramètres	58
4.4.2.1	Problématique	58
4.4.2.2	Extraction et synthèse à partir de modèles-clef	58
4.4.2.3	Avantages et Limitations	58
4.4.3	Marquage anatomique	59
4.4.3.1	Problématique	59
4.4.3.2	Marquage adapté à un modèle d'animation musculaire	59
4.4.3.3	Avantages et Limitations	60
4.5	Perspectives	60
5	Les cheveux	61
5.1	Représentation géométrique d'une chevelure	61
5.1.1	Représentation linéique	61
5.1.2	Représentations surfaciques et volumiques	62
5.2	Animation d'une chevelure	62
5.2.1	Animation par positions clefs	63
5.2.2	Animation de chaînes articulées	63
5.2.3	Animation de systèmes masse-ressort	64
5.2.4	Animation d'un milieu continu	65
5.3	Gestion de la complexité	65
5.3.1	Interactions entre la chevelure et le corps	66
5.3.2	Interactions entre cheveux	66
5.3.3	Animation de cheveux individuels	66
5.3.4	La chevelure vue comme un milieu continu	67
5.3.4.1	Modélisation du volume de la chevelure	67
5.3.4.2	Interpolation de la chevelure autour de quelques cheveux directeurs	67
5.3.4.3	Chevelure simulée physiquement comme un milieu continu	68
5.3.5	Regroupement des cheveux en mèches	68
5.3.6	Méthodes adaptatives	69
5.4	Conclusion	70
6	modélisation biomécanique du genou	71
6.1	Le modèle cinématique	72
6.2	Le modèle statique	73
6.3	Le modèle dynamique	74
6.4	Extraction des données réelles	74
6.5	Le calcul de l'animation	75

7	Données anthropométriques	77
7.1	Paramètres mécaniques des segments corporels	77
7.1.1	Etudes sur des populations et définition de tables anthropométriques . . .	77
7.2	Particularisation des données anthropométriques par des formules de régression .	80
7.3	Discussions sur les tables anthropométriques	80
8	Conclusion et perspectives	83

Chapitre 1

Introduction

Cette partie se propose de faire un état de l'art sur la modélisation d'humains virtuels dont les premiers travaux remontent au tout début de l'informatique graphique. Vers la fin des années 70 déjà, un certain nombre de méthodes ont été proposées par des chercheurs comme Herbison-Evans [15] ou Badler [1] pour représenter et animer des personnages. Bien avant ces travaux, Parke [2] avait proposé une méthode de représentation et d'animation de visages humains.

Depuis, plusieurs équipes de recherche se sont attaquées à ce problème et de nombreuses solutions ont été proposées. Les applications motivant ces recherches sont de différents ordres et peuvent être classées en trois catégories :

- la production de film
- les applications temps-réel
- la simulation

Malgré le grand nombre de publications scientifiques et les progrès technologiques importants réalisés, la modélisation d'humanoïdes reste un problème largement ouvert. Il existe à cela deux raisons principales :

- Tout d'abord, le corps humain nous est si familier, que le moindre détail qui viendrait à manquer serait détecté par notre cerveau.
- La seconde raison réside dans la grande complexité du corps humain composé de plusieurs couches en interactions dont les effets sont visibles au niveau de la peau. La prise en compte simultanément de toutes ces couches n'est pas une chose aisée. Le squelette à lui seul compte 206 os et une centaine d'articulations possédant chacune ses contraintes et ses limites spécifiques.

Actuellement, il n'existe aucun modèle global permettant une représentation réaliste de l'être humain fixe ou animé. La modélisation de l'humain est généralement divisée en trois parties qui traitent de la modélisation du visage, la modélisation du corps et la modélisation de la main. Cette séparation est essentiellement due aux fonctions spécifiques associées à chacune des parties. Les déformations du visage véhiculent des expressions ou des émotions dont l'interprétation est quasi inconsciente chez tous les humains. De la même manière, la main est un organe d'une grande complexité neurophysiologique qui permet plusieurs types d'articulations et de manipulations plus ou moins sophistiquées.

Les premiers modèles ont représenté les humanoïdes à l'aide d'une structure simplifiée composée d'un ensemble d'articulations et recouverte d'un maillage sur lequel opèrent les transformations réalisant l'animation et les déformations associées. Bien que peu réalistes, ces modèles continuent à être utilisés et de nombreuses méthodes sont proposées pour accélérer les calculs et améliorer le réalisme.

Plus récemment, des modèles tenant compte aussi bien des différentes couches anatomiques que des données biomécaniques et anthropométriques ont été développés. La biomécanique traite de l'action des muscles sur les différentes articulations pour produire le mouvement. Les modèles proposés dans ce domaine sont encore loin d'être aboutis et contrairement à la réalité, en informatique graphique, ce sont les mouvements du squelette qui induisent les déformations des muscles. L'introduction des données anthropométriques devrait permettre un plus grand réalisme dans la création d'humains virtuels. Bien que les résultats soient qualitativement meilleurs, ces méthodes sont beaucoup plus complexes et plus difficiles à mettre en oeuvre.

Dans le chapitre qui suit, nous présentons tout d'abord quelques notions simples d'anatomie sur lesquelles s'appuient les différents modèles exposés dans les autres chapitres. Une présentation des différents repères utilisés pour l'animation des articulations est effectuée en deuxième partie de ce chapitre.

Le chapitre 3 traite des différentes techniques de modélisation du corps humain. Les travaux relatifs aux deux grandes familles de méthodes qui sont les modèles surfaciques et les modèles en couche y sont présentés. Les modèles surfaciques définissent l'humain comme une enveloppe articulée par un système hiérarchique de repères représentant le squelette. Nous présentons les principales méthodes de déformations de cette enveloppe qui ont été développées ces dernières années. Bien que performantes, ces méthodes souffrent d'un manque de réalisme évident.

Pour pallier ce manque de réalisme, les modèles en couches, dont l'intérêt est de rester plus proche de l'anatomie, ont été développés. Quelque soit le modèle utilisé, on peut classer les méthodes de déformations en deux catégories. D'une part les modèles qui se fondent sur la cinématique dont les déformations ne sont fonctions que des modifications de paramètres géométriques. Les modèles dynamiques d'autre part, prennent en compte d'autres paramètres comme la vitesse d'exécution d'un mouvement par exemple. Dans les deux cas, les modèles peuvent être purement géométrique ou bien s'appuient sur des lois physiques.

Le chapitre 4 présente un état de l'art des méthodes d'animation faciale. Généralement, ces méthodes sont des combinaisons de méthodes de base pouvant être utilisées dans différents contextes. On peut regrouper ces méthodes selon les objectifs fixés et qui sont classés en trois catégories : L'animation de parties spécifiques, l'expression faciale et la morphologie. Ce chapitre met l'accent sur les techniques relatives à l'expression faciale et à la morphologie.

Dans le chapitre 5, un état de l'art des travaux relatifs à l'animation des cheveux est présenté. Les diverses interactions entre cheveux eux même ou entre les cheveux et le corps du personnage jouent un rôle important dans le réalisme de la chevelure. Seuls les travaux concernant la modélisation et les interactions des longs cheveux y sont présentés. Les travaux portant spécifiquement sur la modélisation de coiffure ou sur le rendu de cheveux ne sont pas abordés. Le chapitre 6 illustre un cas concret, celui du genou, de modélisation en biomécanique. Enfin le dernier chapitre traite des données anthropométriques.

Chapitre 2

Le point de vue anatomique et biomécanique

2.1 Le point de vue anatomique

Certains modèles de personnages de synthèse (humanoïdes, animaux) se basent sur l'anatomie pour rester plus proches de la réalité et ainsi obtenir des résultats plus réalistes. Cette introduction sur l'anatomie va nous permettre de mieux comprendre certains modèles physiques et de définir quelques termes techniques utiles pour la description de ces modèles.

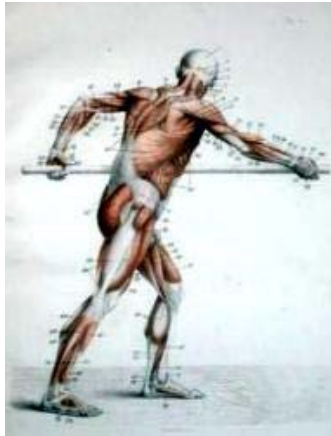


FIG. 2.1 – Musculature réelle

2.1.1 Définitions

2.1.1.1 Muscles

On désigne par le terme *skeletal muscles* [28, 22, 23, 24, 2] les muscles servant à faire bouger les os. Ces muscles sont composés d'une partie contractile, le *ventre* ou *chef* du muscle, et de deux extrémités, les tendons, qui sont les *insertions* du muscle sur les os. Cependant, les deux insertions

sont souvent différenciées. Celle qui est la plus proche de la colonne vertébrale est désignée par *insertion proximale* ou *origine* (généralement le point d'attache qui ne bouge pas) et celle qui est la plus éloignée sera appelée *insertion distale* ou tout simplement *insertion* (l'extrémité qui bouge le plus).

D'autre part, les anatomistes considèrent deux types de contraction :

- la contraction *isométrique* (même longueur) : dans ce cas, le muscle se contracte, le ventre change de forme mais ne change pas de longueur et ne produit pas de mouvement.
- la contraction *isotonique* (même tonicité) : dans ce cas, le ventre du muscle change de forme, la longueur du muscle change, ce qui induit un mouvement des os.

En général, les efforts musculaires font intervenir les deux types de contraction. Cependant, nous verrons dans la suite que le plus souvent, seule la contraction isotonique est présente dans les modèles d'animation car c'est la seule contraction qui induit un mouvement du squelette.

2.1.1.2 Peau

La peau est composée de 3 couches schématisées sur la figure 2.2 : l'épiderme (1), le derme (2) et l'hypoderme (3).

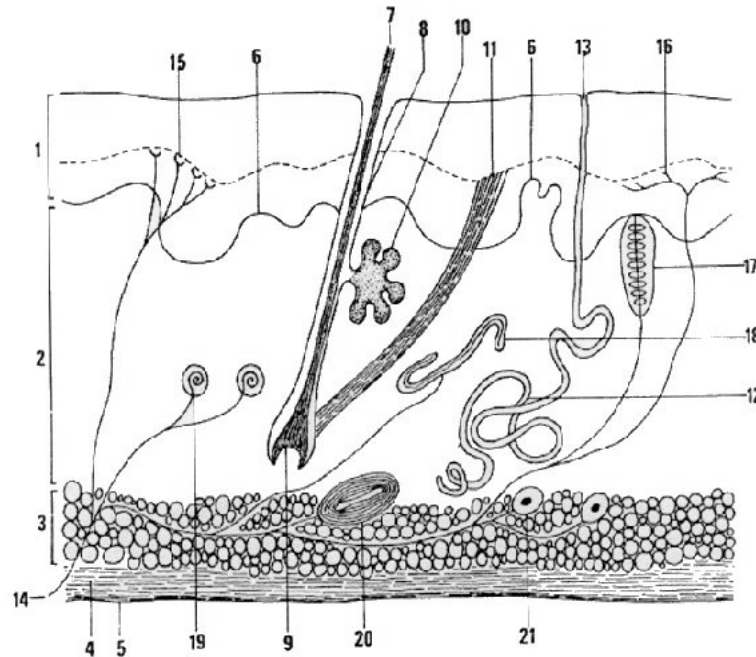


FIG. 2.2 – Composition de la peau : (1)-épiderme; (2)-derme, (3)-hypoderme.

Le derme, composé de collagène et d'élastine, est la couche principale de la peau. Le collagène lui confère ses propriétés de résistance à l'étirement, l'élastine est responsable de l'élasticité de la peau.

L'épiderme recouvre le derme et est la couche superficielle de la peau. C'est cette couche qui comporte des irrégularités que l'on peut appeler *rides de petite échelle*.

Enfin, on trouve l'hypoderme en dessous du derme. Il est responsable de la jonction entre le derme et les couches sous-cutanées (muscles, os). Il se compose principalement de tissus graisseux et d'une couche contenant des vaisseaux sanguins et des nerfs qui permet à la peau de glisser sur les structures sous-cutanées.

2.1.2 Propriétés mécaniques

2.1.2.1 Muscles

Dans la littérature, on retrouve les deux propriétés mécaniques suivantes :

– Élasticité :

L'élongation élastique est la capacité du muscle à revenir à sa position initiale après contraction. Mécaniquement, cela s'exprime de la manière suivante : lorsque l'on tire sur un muscle de longueur initiale L , de section A et de raideur k avec une force F , il en résulte une élongation E définie par l'équation [7] :

$$E = (F * L * k) / A \quad (2.1)$$

– Contractibilité :

C'est la capacité d'un muscle à raccourcir par stimuli nerveux. C'est un processus actif, contrairement à l'élongation élastique. Une relation constante existe entre la longueur naturelle du muscle, la longueur variable du muscle contracté et le degré de rotation à l'articulation. Soit R , l'unité de rétrécissement et θ , l'angle de rotation de l'articulation :

$$R = \theta * k \quad (2.2)$$

Les tendons aussi sont flexibles et élastiques. Cependant, étant donné qu'ils le sont à un autre ordre de grandeur par rapport aux muscles, on fait souvent l'hypothèse que leur longueur ne change pas pendant le mouvement.

2.1.2.2 Peau

La peau est essentiellement élastique et quasi-incompressible (plis). Elle est aussi plastique puisqu'au cours du temps, elle subit aussi des déformations irréversibles (rides).

2.2 Le point de vue biomécanique

2.2.1 Système de coordonnées

Le positionnement des différents éléments nécessite la définition d'un système de coordonnées dans l'espace. Les systèmes les plus couramment utilisés sont :

- les angles projetés,
- les angles d'Euler,
- les angles de Cardan et Bryant,
- les quaternions,
- les angles duaux.

Le système des angles projetés est l'approche adoptée par Sutherland et al. [146] dans l'étude qu'ils ont effectuée sur la marche. Cette technique consiste à projeter les segments représentant les angles locaux sur les plans XY, YZ et ZX d'un repère global fixe, afin d'obtenir les angles dans un ensemble de référence. Cette méthode est simple et facile à mettre en place, mais la cinématique 3D obtenue est instable et approximative, et se révèle erronée dans le cas d'une

rotation supérieur à 5° .

Les angles d'Euler ainsi que les angles de Cardan et Bryant permettent de paramétrer le mouvement de rotation en fonction des axes d'un repère orthogonal, i , j et k . Les angles d'Euler sont définis par la rotation autour de la séquence d'axes kjk [126, 123, 127, 104, 151, 114, 103, 119, 102, 143, 122, 98, 153, 106, 141]. Alors que les axes de Cardan et Bryant sont définis par la séquence de rotation ijk [109, 134] Les résultats obtenus dépendent évidemment de la séquence, mais les variations restent faibles dans le cas de rotations de petites amplitudes.

Le principal défaut de ces méthodes, appelé "gimbal lock", est la singularité qui fait que de petites variations dans la matrice de rotation provoquent de grandes variations dans la rotation finale lorsque la rotation autour de j approche $\Pi/2$, ainsi qu'un blocage complet des rotations lorsque j atteint $\Pi/2$. Les autres cas se partagent en deux groupes, connus sous le nom de "Codman's Paradox" [133].

L'utilisation des quaternions permet de se soustraire à ces limitations. Ceux-ci permettent de caractériser des rotations de l'espace autour d'un axe quelconque [144, 138] et sont définis comme une extension de l'ensemble des nombres complexes, l'espace des quaternions étant composé d'une direction réelle et de trois directions imaginaires indépendantes. L'ajout d'un paramètre supplémentaire permet de résoudre le problème de "gimbal lock", en offrant une interpolation exacte de deux rotations quelconques, ce qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de l'animation. Les angles duaux quant à eux, [154, 155] partent du même principe que les quaternions en ajoutant une composante supplémentaire à chaque rotation. Ainsi, une translation est liée à chaque rotation afin de pouvoir caractériser efficacement des rotations de l'espace autour d'un axe quelconque, tout en gardant un formalisme naturel.

Chapitre 3

Modélisation du corps humain

3.1 Habillage géométrique surfacique et ses déformations

Cette section décrit les techniques utilisées pour animer des modèles surfaciques. Dans l'industrie, il en existe trois principales qui sont appliquées sur des maillages polygonaux : l'interpolation de formes clefs, le skinning et les déformations de forme libre. De nombreux travaux de recherche cherchent néanmoins à améliorer et à automatiser l'une ou l'autre de ces approches.

3.1.1 Interpolation de formes clefs

3.1.1.1 Principe

Cette technique est sans doute la plus utilisée en animation faciale, car elle peut s'appliquer à un maillage sans squelette interne. Dans ce cas, les déformations ne sont donc pas dues au mouvement d'un squelette mais à des expressions de visage que l'on cherche à reproduire.

L'utilisateur doit fournir des formes clefs correspondant à différentes expressions : la tristesse, la joie, la colère. Ensuite, la position des sommets du maillage est obtenue par combinaison linéaire de la position des sommets dans les maillages représentant les expressions extrêmes. Par exemple, si le personnage est à moitié en colère, la position des sommets du maillage sera donnée par la moitié de la position du sommet dans le maillage neutre plus la moitié de la position du sommet dans la position *en colère*. La même technique peut bien-sûr être utilisée pour l'animation des muscles [19] : un graphiste crée des formes extrêmes pour différentes positions articulaires. Ces formes sont ensuite combinées pour obtenir la forme finale pour les positions intermédiaires.

Mathématiquement, si n est le nombre de formes clefs, S_i la forme clef représentant la i ème expression et w_i , le poids de l'expression S_i , la forme finale S_f est égale à

$$S_f = \sum_{i=0}^n w_i S_i$$

Les problèmes liés à cette approche sont divers. Tout d'abord, les différentes formes clefs ne sont pas indépendantes : l'artiste doit dessiner des formes qui n'entrent pas en conflit l'une avec l'autre. En effet, les formes sont ajoutées les unes aux autres, et rien ne garantit que l'effet de l'une ne soit effacé par l'autre, ou, au contraire, trop renforcé, surtout dans le cas où plus de deux formes clefs entrent en jeu dans le calcul de la forme courante. Ensuite, dessiner un certain nombre de formes pour différentes poses est une tâche fastidieuse pour l'artiste, mais d'un autre côté, il reste totalement maître du résultat.

3.1.1.2 Pose Space Deformation (Lewis)

Pose Space Deformation est une technique de déformation de maillage introduite par Lewis [20] qui généralise l'interpolation de formes clefs. Cette approche se place totalement du côté du graphiste qui doit sculpter son personnage dans différentes poses, les formes clefs. Ces formes clefs possèdent différents contrôles qui peuvent être de nature très différente : articulations d'un squelette, expression d'un visage (joie, tristesse). Il peut y avoir un nombre non limité de contrôles pour chaque point du maillage. Lors de l'animation, la surface déformée est définie par $p + \vec{\delta}$, p étant la position du point entraîné rigidement par le squelette et $\vec{\delta}$, la différence entre la position obtenue et la position de la pose associée. L'algorithme fonctionne de la manière suivante :

1. L'artiste positionne des contrôles et dessine une enveloppe.
2. Pour chaque pose, on cherche les points qui ont bougé par rapport à la position de repos et on calcule le $\vec{\delta}$ correspondant pour chaque point. Par définition, $\vec{\delta} = 0$ dans le cas d'une transformation rigide.
3. Pour chaque vertex, on a donc un ou plusieurs $\vec{\delta}$.
4. Lors de l'animation, on doit déterminer la position de chaque vertex pour la pose courante. Elle est égale à la concaténation des degrés de libertés relatifs des contrôles interprétés comme des dimensions indépendantes. Un $\vec{\delta}$ est interpolé par une fonction à base radiale de la forme :

$$\hat{d}(x) = \sum_k^N w_k \Phi(\|(x - x_k)\|)$$

C'est une technique entièrement cinématique qui a pour avantage de pouvoir synthétiser un modèle en temps réel mais pour lequel le résultat de l'animation dépend surtout de l'animateur et pas de la simulation. De même, en contrepartie de la liberté de modélisation laissée à l'animateur, l'effort et le temps de modélisation des différentes poses peut s'averer rébarbatif.

3.1.2 Déformations dans les sous-espaces du squelette ou skinning

3.1.2.1 Principe

Le *skinning* ou *Skeleton Subspace Deformation* [20] (SSD) est une technique d'animation pour laquelle les sommets de la surface d'un objet sont déplacés en réponse au mouvement d'un squelette interne. Le squelette¹ est composé d'os individuels connectés aux articulations et est recouvert d'un maillage appelé la peau. Les articulations sont bougées, soit à la main par l'animateur, soit par cinématique inverse, pour produire le mouvement, les os entraînant les sommets de la peau. Le plus simple serait de faire subir aux sommets de la peau les mêmes transformations rigides qu'au squelette. Le problème dans ce cas se situe au niveau des articulations, quand un point est influencé par plusieurs os. Le *skinning* résoud ce problème en affectant une somme pondérée des transformées des os à la position de chaque sommet, selon l'influence qu'il subit de tel ou tel os. Chaque terme de la somme est calculé en utilisant un repère associé à l'os animé correspondant. La position finale d'un point de la surface déformable d'un objet articulé se trouve donc dans le sous-espace défini par les transformations rigides de ce point par un certain nombre de repères.

Soit \mathbb{B} l'ensemble des indices des os. Soit B_i , le sous ensemble de \mathbb{B} contenant l'ensemble des os affectant le sommet i . Pour une configuration du squelette, la position p_i du sommet i après

¹Le squelette n'est pas forcément modélisé. Il faut le voir ici et dans la suite comme une hiérarchie de repères, les os pouvant être des repères entre les articulations ou plus simplement, le sous-ensemble du maillage compris entre deux articulations.

skinning est :

$$p_i = \left(\sum_{b \in B_i} w_{ib} T_b \right) \nu_i$$

ν_i est la position du sommet i avant transformation (position neutre),

T_b est la transformée de l'os b ,

w_{ib} pondère la combinaison linéaire des transformées des os pour le sommet i (i.e. transformation pour passer du repère au repos au repère de la pose courante).

Les poids w_{ib} des points dans chaque repère os jouent un rôle important. Dans une approche classique ils sont calculés en fonction des distances os/sommet dans la position de repos. Par exemple, le poids w_{ib} du sommet i dans le repère b sera $w_{ib} = \frac{1}{d_i^2}$, d_i représentant la distance entre le sommet i et le repère b (suivi d'une normalisation). L'avantage est que cela donne des poids raisonnables qui varient sans discontinuités le long du maillage mais il est possible de trouver des poids mieux adaptés [5].

Cette technique souffre de plusieurs problèmes. Tout d'abord, la déformation est restreinte au sous-espace associé. C'est à dire que les sommets ne peuvent pas toujours se retrouver où l'on voudrait qu'ils soient. En particulier, cette technique se retrouve inadaptée pour le coude ou l'épaule pour lesquels la déformation recherchée ne se trouve pas dans le sous-espace. En pratique, cela se traduit par un plat qui apparait là où l'os du coude devrait se trouver (voir figure 3.1 (a)). D'autre part, en comparaison avec l'interpolation de formes clefs, cette technique ne permet pas les manipulations directes. En effet, pour chaque point de la surface, il y a un poids par repère du squelette qui l'affecte. Il faut donc éditer le maillage des poids w_{ib} pour corriger une déformation manuellement, un travail fastidieux qui ne permet pas toujours d'obtenir le résultat voulu.

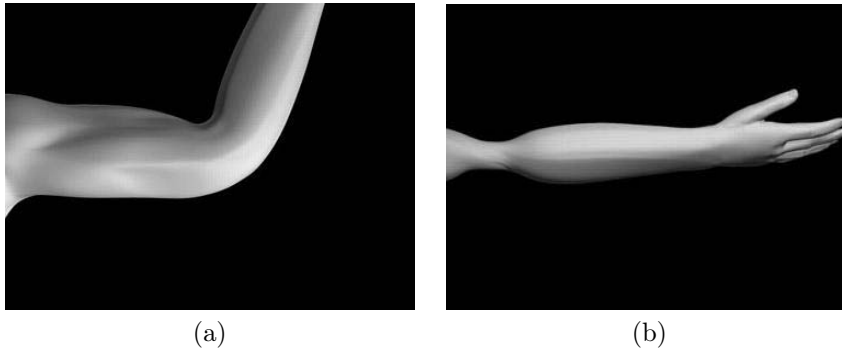


FIG. 3.1 – (a) Applatissement au niveau du coude ; (b) Amincissement au niveau de l'articulation car le bras est vrillé.

Cependant, si dans certains cas il n'est pas possible d'obtenir une animation correcte, il est néanmoins possible d'améliorer ces poids automatiquement et d'ajouter des repères pour obtenir une forme plus précise [5].

3.1.2.2 Utilisation de l'axe médian pour automatiser le calcul des paramètres (bloomenthal)

Pour remédier aux problèmes classiques du skinning, Bloomenthal [5] utilise l'axe médian de l'objet pour calculer des repères de skinning intermédiaires et les poids associés. Il se base sur l'observation que le problème de rétrécissement d'une articulation (voir figure 3.1 (b)) lors d'un mouvement de rotation peut être diminué, voire évité si l'on rajoute suffisamment de repères de

skinning entre les repères déjà existants. Ensuite, pour obtenir des résultats réalistes, il faut que les poids associés aux repères soient correctement calculés.

Dans l'approche de Bloomenthal, l'axe médian de l'objet est représenté par des triangles pour les surfaces $2D$ et par des segments pour les arcs. Ce sont les *primitives* P_i . Un champ de convolution est produit autour de l'axe médian en convoluant un filtre cubique $3D$ avec cet axe. À chaque primitive P_i , on associe un repère de skinning F_i (par exemple, pour un triangle, il pourra correspondre au repère formé par la normale et un des côtés du triangle). Un point du maillage dépend de ce repère si la valeur de convolution est non nulle en ce point. Son poids w_i est alors la largeur du filtre de convolution (qui dépend du rayon de l'axe médian).

Une fois cette étape de précalculs effectuée (calcul de l'axe médian pour trouver les repères de skinning et calcul de la convolution pour obtenir les poids), il ne reste plus qu'à animer le modèle. L'animation se fait classiquement à partir d'un squelette interne. Par simple skinning, on recalcule la position des primitives du médial en fonction de l'influence des os (au lieu de calculer directement la position finale des sommets), ce qui donne une nouvelle position des repères intermédiaires F_i . Ensuite, on effectue un skinning classique pour calculer la position des sommets du maillage à partir des F_i et w_i correspondants.

Cette technique simple permet, grâce à un précalcul lourd, de rajouter un niveau d'abstraction qui crée des repères de skinning intermédiaires. Les résultats sont de très bonne qualité pour les zones à problèmes. Le point négatif de cette méthode se situe au niveau du calcul du médial, qui, bien qu'il existe toujours et de façon unique, peut parfois être long et difficile à calculer.

3.1.2.3 EigenSkin (kry)

Kry et al. [18] présentent une technique qui permet d'obtenir des déformations non linéaires, quasi-statiques, de personnages articulés. Ceci est fait en composant un champ de déplacements calculé en temps-réel (*EigenSkin*) à un skinning classique, l'idée étant de déformer de façon réaliste et rapide le maillage de l'objet avant d'appliquer le skinning. Pour calculer le champ de déplacements, l'objet doit être simulé de façon réaliste dans au moins 6 poses différentes pour chaque degré de liberté. Pour cela, les auteurs utilisent un modèle d'éléments finis de la main avec un squelette interne. Ils pourraient aussi bien utiliser un autre modèle de simulation réaliste coûteux. Cela permet d'obtenir des positions ν_i^p des sommets observés dans la pose p_i .

Soit \mathbb{P} , l'ensemble des indices p des poses observées. p_0 représente la position de repos et ν_i^0 , la position du sommet i dans la position de repos. ν_i^p représente la position du sommet observé dans la pose p_i . Le déplacement u_i^p , i.e. la différence entre la position du sommet que l'on aurait obtenue en appliquant un skinning classique et la position de la pose observée, s'exprime dans la position de repos par :

$$u_i^p = \left(\sum_{b \in B_i} w_{ib} T_b^p \right)^{-1} \nu_i^p - \nu_i^0$$

Concrètement, cela revient à appliquer la transformation inverse du skinning au point observé, ce qui nous donne un objet déformé pour lequel on peut calculer, pour chaque sommet, une différence par rapport à la position de repos. En stockant ces déplacements par rapport à la position de repos, il est possible de modifier le maillage avant d'appliquer le skinning pour retrouver la position correcte de chaque sommet.

Ces déplacements sont donc calculés pour chaque sommet, pour chaque degré de liberté de l'articulation qui l'influence (ceci est déterminé en faisant bouger chaque articulation indépendamment, et en cherchant les points influencés (il ne sont évidemment pas les mêmes que l'ensemble des points attachés à l'articulation et ces ensemble peuvent se recouvrir)). Cet ensemble de point est appelé le *support* de l'articulation. Pour chaque point du support, on fait

une analyse en composantes principales de ses déplacements. La méthode permet aussi bien de corriger la position des sommets du maillage que les normales utilisées pour le shading.

Une fois ces précalculs effectués, le modèle peut-être animé en temps réel. Il suffit, pour chaque nouvelle pose, de calculer la correction à appliquer au maillage (il est possible d'utiliser de 1 à 10 valeurs propres, 5 si on applique aussi une correction des normales), suivit d'un skinning classique. Cette technique a été implémentée sur une carte graphique (en utilisant l'extension vertex program) et a permis de réaliser ces déformations en temps-réel.

3.1.3 Cas des modèles paramétriques

Très agréables pour modéliser, les surfaces B-splines posent néanmoins des problèmes lors de leur utilisation. Le principal inconvénient est que lorsque l'on veut rajouter des détails au modèle, il faut rajouter des points de contrôle là où l'on veut des détails. Mais, pour des raisons de continuité, il faut alors obligatoirement découper le carreau selon chaque domaine paramétrique. Concrètement, cela se traduit par le découpage d'une ligne entière de carreaux ou d'une colonne entière. De ce fait, de nombreux points de contrôle sont rajoutés et ils sont le plus souvent inutiles en dehors du carreau où l'on souhaitait mettre des détails. Le modèle se retrouve donc trop détaillé à certains endroits et l'animation s'en trouve alourdie.

3.1.3.1 B-splines hiérarchiques (forsey)

L'idée de Forsey introduite dans [12] et étendue à l'animation dans [11], est de ne subdiviser que les carreaux de B-splines où cela est nécessaire, sans subdiviser les carreaux des lignes et colonnes adjacentes. Pour cela, lorsqu'un carreau est subdivisé, il est défini localement comme un déplacement ou *overlay* par rapport au carreau non-divisé sous jacent. L'exemple de la figure 3.2 montre le gain qui est fait en prenant un exemple où il aurait fallu, avec des carreaux de B-spline classiques, diviser entièrement la surface en carreaux plus fins afin de pouvoir modéliser les pics. Grâce aux B-spline hiérarchiques, on ne divise que les carreaux de la diagonale.

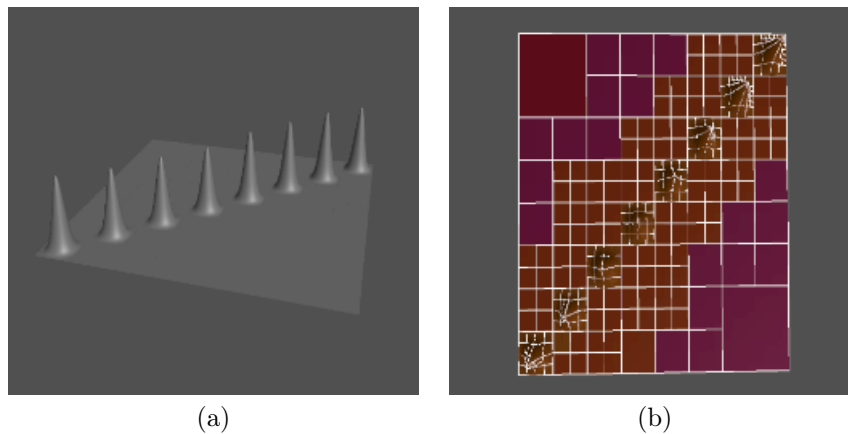


FIG. 3.2 – (a) Surface plate avec une série de bosses sur la diagonales; (b) Figure (a) construite avec des B-splines hiérarchiques

Une surface B-splines hiérarchique est créée par l'application successive d'un raffinement local d'une surface B-spline initiale (un plan, un cylindre ou un tore). Par exemple, la tête du dragon

figure 3.3 a été construite à partir d'un tore. La figure montre 8 niveaux dans la hiérarchie, en commençant par le tore. On obtient finalement une figure très détaillée à un faible coût.



FIG. 3.3 – (a) modèle de tête : les 8 morceaux (b) suite

Pour l'animation, le modèle est constitué d'un squelette interne et de la peau qui est une surface B-spline hiérarchique. L'utilisateur se charge de relier les points de contrôle, à n'importe quel niveau, aux différents os du squelette qui doivent influencer le bout de surface. Ensuite, le mouvement du squelette entraîne, de manière rigide, les points de contrôle. Le dragon de la figure 3.4 est animé en bougeant un squelette interne auquel est attaché la "peau". L'avantage est que les détails suivent le changement de forme de la surface. Si les détails ne changent pas, ils n'ont pas besoin d'être animés, ils restent identiques et suivent le niveau le plus grossier qui bouge.

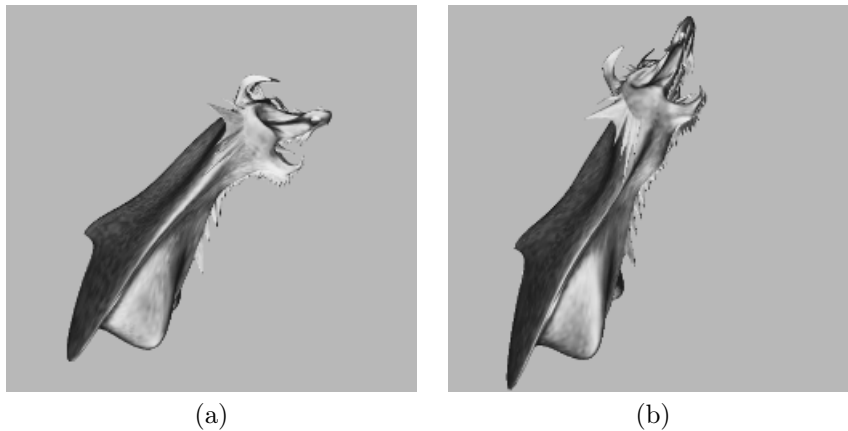


FIG. 3.4 – (a) Animation pos0; (b) Animation pos1

3.1.4 Utilisation des FFD (Singh)

Singh [29] propose des FFDs surfaciques où l'espace déformé par la surface de contrôle est défini par une fonction de distance autour de cette dernière. Les surfaces de contrôle ressemblent beaucoup à la géométrie qu'elles déforment et peuvent donc être construites automatiquement à partir de la géométrie déformable.

3.2 Modèles en couches intégrant muscles, tissus adipeux et peau élastique

Pour pallier le manque de réalisme du skinning, l'informatique graphique a vu naître les modèles en couches. L'intérêt de ces modèles est de rester plus proche de l'anatomie en modélisant, une par une, les couches constituant un être vivant. Ainsi, un modèle 3D n'est plus simplement une surface géométrique animée par son squelette, mais il se compose, en plus du squelette, d'une couche musculaire où les muscles sont modélisés un à un, éventuellement d'une couche de tissus adipeux, et d'une couche de peau élastique pour recouvrir l'ensemble. Les étapes de modélisation, puis d'animation des différentes couches sont donc plus complexes, plus longues, pour des résultats souvent meilleurs qualitativement.

3.2.1 Muscles pour des déformations cinématiques

Cette section présente les différents modèles de muscles créés pour simuler la cinématique de muscles réels. Dans ces modèles, la déformation du muscle dans une position donnée ne dépend que de la position de ses extrémités, et ne prend pas en compte les déformations dynamiques qui peuvent survenir lors d'un mouvement sec et rapide. On peut regrouper ces différents modèles en deux catégories : les modèles géométriques et les modèles physiques.

3.2.1.1 Modèles géométriques

Cette catégorie regroupe les modèles qui ne servent qu'à calculer des déformations cinématiques et qui ne se basent que sur la géométrie de l'objet, c'est à dire que les déformations ne dépendent pas de lois physiques. En particulier, ce sont des modèles qui modélisent des muscles un par un pour composer un humanoïde. Ils sont généralement greffés sur un modèle en couches dont le squelette est la couche inférieure et la peau la couche supérieure. Le principe de l'algorithme reste ensuite à peu près le même : les os bougent et entraînent un gonflement des muscles qui permet d'obtenir une déformation réaliste de la peau. Les différences d'un modèle à l'autre se retrouvent au niveau du type de surface et de la technique de déformation utilisées.

3.2.1.1.1 Free Form Deformations (muscle de Chadwick)

En 1989, Chadwick [7] introduit pour la première fois la notion de modèle en couches. Son modèle est simple et ne se compose que de deux couches : une couche contenant plusieurs muscles et la peau, fusionnée avec la couche externe des muscles réunis.

Représentation d'un muscle

Un muscle individuel est représenté par un maillage polygonal enfermé dans une paire de Free Form Deformations (FFD) comme on peut le voir sur la figure 3.5.

Cela donne 7 plans perpendiculaires à l'axe de l'articulation (4 plans pour chaque FFD dont un plan commun pour les deux). Les deux plans situés à chaque bout sont les "adjoining planes" et servent à préserver la continuité entre deux morceaux de muscles adjacents. Les trois plans du

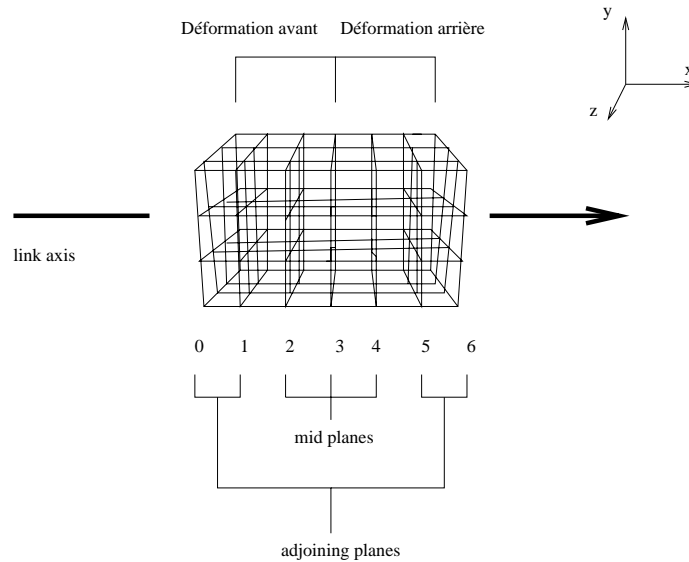


FIG. 3.5 – Paire de FFDs, image inspirée de [7]

milieu, "mid planes", servent à modéliser le comportement du muscle, en réponse à la cinématique du squelette. Ce modèle de muscle est utilisé pour les déformations cinématiques des bras et des jambes (tendons + muscles) d'un humanoïde. Le principe de l'algorithme est le suivant : le squelette bouge et crée automatiquement la flexion appropriée des muscles. D'autre part, au niveau du modèle lui-même, on remarquera que s'il est bien adapté pour modéliser des muscles fusiformes, il l'est beaucoup moins pour des muscles plus plats ou en triangle tels ceux du dos.

Déformation lors de l'animation

Les déformations cinématiques du muscle sont calculées à partir des propriétés physiques réelles d'élasticité et de contractibilité. Le premier modèle de Chadwick [7] permet de modéliser les flexions-extensions d'un muscle, c'est à dire un muscle simple qui rétrécit ou s'agrandit suivant le rapprochement ou l'éloignement de ses extrémités.

L'algorithme se déroule de la façon suivante :

1. Calcul du rétrécissement du muscle à partir de l'angle de l'articulation.
2. Propagation de ce rétrécissement à travers chaque plan de contrôle du muscle. Pour chaque mid plane, le rétrécissement imposé sur x est compensé par un agrandissement du muscle le long des axes y et z . Dans le cas général, cet agrandissement est le même dans toutes les directions pour chacun des trois mid planes. Mais si l'un des côtés est fixe, l'allongement ne pouvant se faire dans cette direction, on double l'allongement qui se produit dans la direction opposée. C'est ce qui se passe quand un muscle est collé à un os. Le rapport des rayons détermine les facteurs d'échelle des deux mid planes extérieurs (2 et 4). Le mid-plane central (3) est déformé de telle sorte que la continuité soit maintenue sur toute la surface contractée.
3. Les adjoining planes sont légèrement déformés pour maintenir la continuité avec les autres muscles actifs, ou bien, ils restent non déformés en dehors du raccourcissement sur x .

Pour modéliser les muscles ou les morceaux de peau qui traversent une articulation, Chadwick utilise l'algorithme de déformation des tendons. Cette fois, il s'agit d'un phénomène passif d'élongation qui se retrouve sur de courtes régions couvrant une articulation (le dessous du coude par exemple).

1. Détermination de l'angle de bissection de l'articulation (avec utilisation d'un seuil), ie, $angle = angle/2$. Pour les articulations à plusieurs degrés de liberté, il faut connaître l'axe de rotation résultant (utilisation des quaternions).
2. Faire tourner les mid-planes 2 et 3 par l'angle de bissection autour de leur axe z et le plan 4 par l'opposé.
3. Éviter les problèmes d'intersection en bougeant des points de contrôle si c'est nécessaire.
4. Éloigner les plans 0 et 1 de 2 et les plans 5 et 6 de 4.
5. Faire une rotation de l'ensemble des plans 4, 5 et 6.
6. Maintenir une continuité C1 entre les différents points de contrôle tout en évitant les intersections entre les différents plans.
7. Utiliser le poids des points de contrôle pour maintenir le volume du muscle ou de la chair.

Un point positif de ce modèle est tout d'abord la continuité entre les muscles qui est facilement assurée grâce aux adjoining planes qui ne se déforment pas ou peu. Par contre, on peut noter un inconvénient au niveau de la peau. En effet, elle n'est pas flexiblement attachée aux structures du dessous mais elle est fusionnée avec elles, ce qui fait qu'elle subit les mêmes déformations que le muscle alors qu'elle devrait pouvoir glisser sur les muscles.

3.2.1.1.2 Surfaces Implicites (ellipsoïdes, scheepers et wilhelms)

Les modèles de muscles présentés dans le papier de scheepers et al. [28] se greffent sur un squelette implémenté en AL (langage procédural pour la modélisation et l'animation). Le squelette est constitué d'os rigides individuels construits par des primitives géométriques (plusieurs qualités sont disponibles) et les articulations sont modélisées par des fonctions. Dans le papier de Wilhelms [32], les os et tissus autres que les muscles sont représentés par des ellipsoïdes qui ne sont pas déformés au cours du temps. Par exemple, un os pourra être constitué de trois ellipsoïdes : une étirée et deux sphères dans les bouts. Dans les deux cas, il est possible d'imposer un mouvement aux articulations, ce qui engendre un mouvement des os qui, à son tour, doit provoquer une modification des muscles qui y sont attachés.

Représentation

Pour représenter le muscle (sans les tendons), Scheepers et al. [28] et Wilhelms [32] utilisent des ellipsoïdes. Une ellipsoïde est une surface implicite définie par une fonction f de la forme :

$$f(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} + cste.$$

L'intérêt des ellipsoïdes est la facilité à pouvoir préserver un volume constant du muscle dans le cas d'une contraction isotonique, en contrôlant le rapport hauteur sur largeur de l'ellipse. Biologiquement, on constate deux cas possibles de contraction musculaire : la contraction isotonique et la contraction isométrique. Le modèle [28] est capable de traiter ces deux cas alors que celui de Wilhelms ne traite que le premier.

Les trois modèles de muscles présentés dans la suite 3.6 utilisent des ellipsoïdes, dont les points d'attache aux os sont de nature différente :

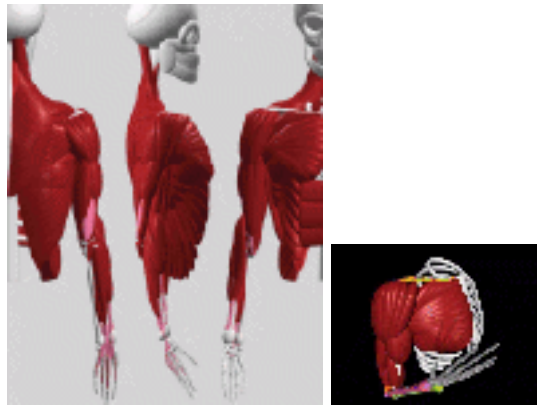


FIG. 3.6 – Muscles à base d'ellipsoïdes de Scheepers

- Fusiform muscle model [28, 32]
C'est le modèle le plus simple. Il est composé d'une seule ellipsoïde et est attaché aux os par les deux bouts (origine, insertion). Il est défini par son volume v , son rapport r , sa position et son orientation. Il peut être muni de tendons auquel cas, soit deux nouvelles extrémités sont définies [28] (origine-belly et insertion-belly), soit deux petites ellipsoïdes sont ajoutées à chaque bout [32]. Dans le premier cas, la longueur du tendon ne varie pas pendant le mouvement.
- Multi-belly muscle model [28]
Certains muscles sont composés de plusieurs muscles fusiformes. Au lieu de le contruire "à la main" en mettant côte à côte des muscles fusiformes, on peut utiliser le *multi-belly muscle model* qui fait la même chose mais de manière automatique, quelque soit le nombre de bellies à positionner. Le muscle est alors composé de n origines et de n insertions. Une courbe spline pour l'origine et une courbe spline pour l'insertion sont utilisées et échantillonnées pour obtenir les origines et insertions des différents bellies. Pour ce type de muscle, on parle donc de courbe origine et courbe insertion. Ensuite pour définir l'orientation de chaque belly, on se sert de l'origine o_j et de l'insertion i_j correspondante. La "up-direction" est alors la normale au plan formé par i_j et par les origines du voisin de gauche o_{j-1} et du voisin de droite o_{j+1} s'ils existent, o_j sinon.
- General muscle model [28]
Les deux modèles précédents ne permettent pas de représenter des muscles tordus. En effet, il sont adaptés pour des muscles fusiformes et des muscles plats. Les auteurs ont donc introduit le *general muscle model*. Il s'agit de découper le muscle en trois zones : origin-section, mid-section et insertion-section. Les différentes sections sont délimitées par des points de contrôle : o_v pour séparer origine et mid sections et i_v pour séparer insertion et mid sections. Le muscle est constitué d'un ensemble de carreaux de surface formés à l'aide d'ellipses construites le long d'une courbe de Bézier cubique et de deux "chapeaux" (hémisphères elliptiques) mis à chaque bout pour "fermer" le muscle, mais dont le volume n'est pas pris en compte dans les calculs car négligeable par rapport au reste du muscle. Soient o_1, o_2 , les deux origines du muscle, i_1 et i_2 , les deux insertions, o_c et i_c , respectivement les milieux de o_1o_2 et i_1i_2 et o_v et i_v , pour définir l'orientation du muscle. La courbe de Bézier est définie par les points de contrôles o_c, o_v, i_v et i_c . En o_c , l'ellipse a pour axes principaux : $a_0 = o_c - o_1$, et $b_0 = (o_v - o_c)/2$. De même, en i_c , l'ellipse a pour axes $i_c - i_1$

et $\frac{(i_v - i_c)}{2}$. En o_v et i_v , les axes de l'ellipse sont calculés à partir de v et de r pour préserver le volume et le rapport hauteur largeur du muscle. Ainsi, si les extrémités se rapprochent, le muscle gonfle et inversement si elles s'éloignent.

Déformation du muscle

Les trois modèles de muscles de skeepers [28] sont capables de simuler les contractions isotoniques et les contractions isométriques alors que le modèle de Wilhelms, plus limité, ne simule que les contractions isotoniques sur des muscles fusiformes (voir figure 3.7) :

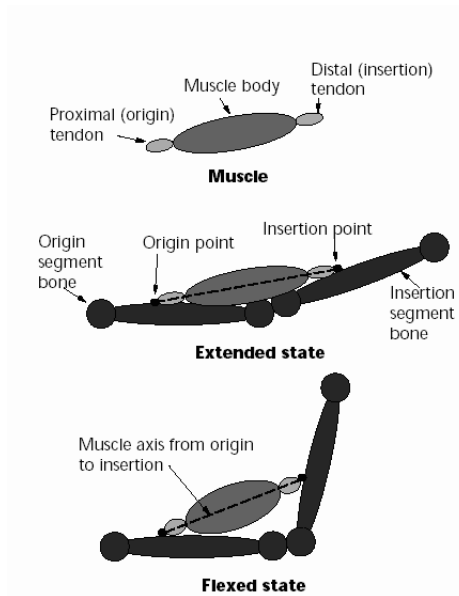


FIG. 3.7 – Illustration de la contraction sur le modèle de muscle de Wilhelms [32]. On peut noter que le muscle est constitué de 3 ellipsoïdes : une centrale qui représente le muscle et une à chaque extrémité qui joue le rôle de tendon.

- Cas d'une contraction isotonique [28, 32] :

Lorsque les os bougent (se rapprochent ou s'éloignent), la longueur l du muscle change. Soit $l = 2c$, la longueur de l'ellipsoïde, $2a$ et $2b$ les longueurs des deux autres axes principaux. Soit v , le volume que l'on veut garder constant : $v = (4 * \pi * a * b * c) / 3$. Soit r , le rapport $\frac{a}{b}$ que l'on souhaite aussi garder constant. En effet, lorsque le muscle gonfle, on souhaite le voir gonfler de la même manière dans toutes les directions. On a alors $b^2 = \frac{3v}{4\pi * r * c}$. Ainsi, si l change, on a une nouvelle valeur de c et il est aisé de trouver la nouvelle valeur de b (donc de a) traduisant la contraction.

- Cas d'une contraction isométrique [28] :

Dans ce cas, les os ne bougent pas. Seul le muscle devient plus "tendu". Skeepers introduit donc un nouveau paramètre, la tension t , pour ajuster le rapport r , qui, cette fois, n'est plus constant.

Ces modèles ont été utilisés pour réaliser un torse et un bras d'humanoïde. Le modèle général a été utilisé avec succès pour modéliser de larges muscles tels que les trapèzes ou le latissimus dorsi. Mais, si ce modèle simple est adapté pour les muscles fusiformes, et quelques muscles plats,

il reste insuffisant pour beaucoup de muscles.

3.2.1.1.3 Cylindre déformé (wilhelms)

Dans sa première approche, Wilhelms [32] utilise des ellipsoïdes pour simuler les muscles. Ce modèle simple étant inadapté dans bien des cas, elle propose un second modèle [33] basé sur un cylindre déformé, essayant de fournir un bon compromis entre temps de calcul et réalisme.

Représentation

Le muscle est généré à partir d'un cylindre (voir figure 3.8) qui possède deux origines et deux insertions. Ces 4 points sont décrits par une position $3D$ sur des os spécifiques et paramétrés par la taille de la boîte englobante de l'os pour des raisons de réutilisation. Chaque muscle est un cylindre discrétisé et déformé : l'axe du cylindre est une courbe qui part du milieu des deux origines et aboutit au milieu des deux insertions. Ensuite, le cylindre est généralement découpé en 7 tranches transversales à l'aide de 8 ellipses (les deux ellipses des bouts englobent respectivement les origines et les insertions, et les 6 autres ellipses définissent la forme et l'axe longitudinal du muscle). Il n'y a pas de tendons. Ensuite, chaque ellipse transversale est discrétisée en points espacés régulièrement et formant un polygone plan. Il suffit de connecter ces points avec leurs 4 voisins (deux sur la même ellipse, un sur l'ellipse précédente et un sur l'ellipse suivante) par des ressorts pour obtenir un maillage qui servira d'ancrage pour la peau (voir figure 3.9). Les seuls paramètres sont donc les deux origines et les deux insertions.

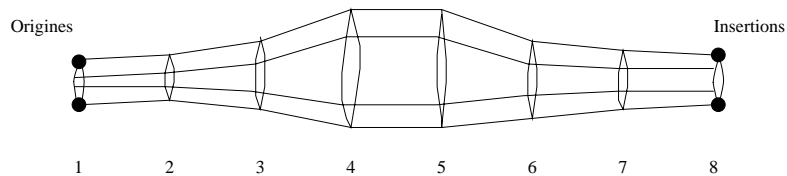


FIG. 3.8 – Deformed Cylinder Model de Wilhelms

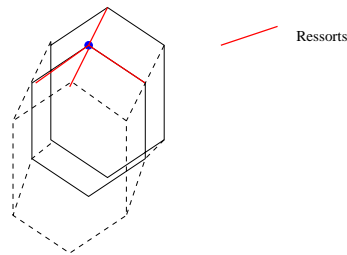


FIG. 3.9 – Deux tranches du Deformed Cylinder Model de Wilhelms

L'enveloppe par défaut est créée automatiquement à partir des points origines et insertions et peut ensuite être modifiée interactivement par l'utilisateur en déplaçant des tranches (translation, rotation) ou en changeant la taille du muscle. L'utilisateur peut aussi ajouter un pivot. Dans ce cas, le muscle ne va pas des origines aux insertions, mais des origines au pivot puis du pivot aux insertions. Cela permet d'éviter des interpénétrations de matière (comme décrit dans la thèse

de Nedel [22]) et de simuler des muscles comme ceux de la cuisse qui passent sur le genou (le pivot est alors sur la rotule). Ce pivot peut-être utilisé quel que soit le mouvement pour un muscle donné, ou bien seulement ponctuellement, pour quelques mouvements plus compliqués. Pour résumer, l'utilisateur peut contrôler les paramètres suivants : les origines, les insertions, le facteur d'échelle de l'enveloppe du muscle, la translation et la rotation de chaque tranche du muscle, l'existence ou non d'un pivot, son emplacement et son orientation.

Un avantage non négligeable de ce modèle est que tout est paramétré, donc, réutilisable. Par exemple, si on modélise un humain, il est possible de réutiliser le même modèle pour un autre humain différent pour lequel on aura rallongé les bras, raccourcis les jambes. Le modèle est le même, seul le fichier de paramètres doit être modifié.

Animation

L'animation du muscle implique le calcul automatique de sa nouvelle enveloppe chaque fois qu'une articulation positionnée entre les origines et les insertions du muscle bouge. Le mouvement de l'articulation implique un changement de position relative des origines et des insertions. Un nouveau muscle est donc recalculé en utilisant les mêmes paramètres utilisateur que l'ancien, puis, pour préserver un volume à peu près constant, la largeur et l'épaisseur du muscle sont ajustés. Soit la *longueur au repos*, la distance entre le milieu des origines, le pivot s'il existe et le milieu des insertions lorsque le muscle est au repos. Soit la *longueur courante*, la même distance calculée lorsque le muscle est dans la position courante. La largeur et l'épaisseur du muscle sont alors agrandis par $\sqrt{\frac{\text{longueur au repos}}{\text{longueur courante}}}$. Ceci résulte en un agrandissement des ellipses transversales si le muscle rétrécit et une diminution dans le cas contraire. Le volume est préservé exactement entre les régions de tranches parallèles et change légèrement dans les autres régions, les auteurs insistant sur le fait que la conservation de volume n'est pas biologiquement justifiée (contraction isométrique). Le nouveau muscle est stocké dans un fichier.

Ensuite, une peau élastique (décrite plus loin car elle n'est pas directement liée au modèle de muscle) est ajoutée au modèle.

3.2.1.2 Modèles physiques

En dehors des modèles géométriques pour la modélisation des muscles présentés précédemment, on trouve des modèles physiques dont la modification ne dépend plus de paramètres totalement géométriques, mais est calculée à partir de l'utilisation de ressorts ou d'éléments finis par exemple.

3.2.1.2.1 Masses ressorts (Nedel 98-00)

Le modèle le plus simple (au sens physique) est celui de Nedel [22, 23, 24] qui utilise un réseau masses-ressorts surfacique pour modéliser chaque muscle.

Représentation du muscle de Nedel

Seuls les muscles fusiformes qui permettent d'articuler le squelette ont été modélisés par cette technique. Chaque muscle est représenté par une ou plusieurs *lignes d'action* et une enveloppe. On peut voir la ligne d'action comme le "squelette" du muscle qui est la ligne droite le long de laquelle agit la force musculaire. Une ligne d'action est dans le cas général une droite, mais peut aussi être une polyligne si on ajoute des points de contrôle, pour obliger le muscle à passer par un endroit particulier et éviter ainsi à certains muscles de raccourcir pendant une élongation. Le muscle ne couvre pas nécessairement toute la ligne d'action, les bouts restants représentant alors les tendons et gardant une longueur constante pendant la simulation. Le design de l'enveloppe

peut-être fait de plusieurs manières : à partir de clichés d'un cadavre, en utilisant des ellipsoïdes ou en dessinant le muscle à la main autour de la ligne d'action. Ensuite, il y a une étape qui permet de découper le muscle en tranches et de créer un maillage surfacique de la surface du muscle, orienté parallèlement et perpendiculairement par rapport à la ligne d'action. Cette étape peut permettre de gérer des niveaux de détails car on peut choisir l'ordre de grandeur du nombre de points du maillage final. On procède donc de la manière suivante :

1. On découpe le muscle en n tranches perpendiculaires à la ligne d'action. Sur chacune de ces tranches, on choisit y points de la surface du muscle, intersections entre une ligne imaginaire partant du centre de la tranche (là où passe la ligne d'action) allant dans une direction définie et la surface du muscle. On obtient les $n * y$ points du maillage.
2. On ajoute des ressorts linéaires pour simuler l'élasticité du muscle : on met des ressorts *verticaux* entre les points se correspondant d'une tranche à l'autre et on met des ressorts *horizontaux* entre les points voisins sur une même tranche. L'élasticité des ressorts horizontaux est différente de celle des ressorts verticaux.
3. On ajoute des ressorts angulaires pour empêcher le muscle de se tordre et conserver un volume "à peu près constant". Pour chaque masse x , on considère les 4 voisins (les deux de la même tranche x_1, x_3 , et les deux des deux tranches voisines de part et d'autre : x_2, x_4). Le premier ressort relie le milieu de x_1x_3 avec x et le second, le milieu de x_2x_4 avec x . Tous les ressorts sont placés lorsque le muscle est au repos.
4. On ajoute des contraintes géométriques résolues par dynamique inverse. Elles peuvent être locales, zonales ou globales et servent à éviter les interpénétrations de matière essentiellement. Dans les travaux publiés jusqu'en 2000, les contraintes étaient utilisées uniquement pour bouger les points d'attache du muscle au squelette.

Le muscle étant modélisé par des ressorts, l'utilisateur doit définir 6 paramètres pour que les calculs soient possibles : 2 coefficients d'élasticité pour les ressorts linéaires horizontaux et verticaux, 2 coefficients de courbure pour les ressorts angulaires verticaux et horizontaux, la masse du muscle et un facteur d'amortissement. Si la masse du muscle est intuitive, les autres coefficients le sont moins, surtout pour un utilisateur peu familier avec les ressorts.

Déformation du muscle

Le mouvement est créé au niveau des articulations. Ce mouvement induit un mouvement de tout ce qui est indéformable, des os du squelette en particulier. Ceci résulte par un changement de la ligne d'action (les positions de l'origine, de l'insertion et des points de contrôle doivent être recalculées dans le repère de l'humanoïde). Concrètement, la ligne d'action s'agrandit ou rétrécit, éloignant ou rapprochant l'origine du muscle, l'insertion et les points de contrôle. Ceci entraîne des contraintes géométriques et un nouvel état d'équilibre doit être calculé à chaque pas de temps. Le mouvement est simulé en appliquant un système d'équations du mouvement à chaque particule du modèle. Soit f_{result_i} , la force résultant au point i . Elle est égale à la somme des forces dues aux ressorts linéaires et angulaires respectivement :

$$f_{result_i} = f_{elasticity_i} + f_{curvature_i}$$

Les équations de Lagrange (Terzopoulos 87) donnent :

$$m\ddot{x}_i + \gamma\dot{x}_i + f_{result_i} = f_{extern_i} \quad (3.1)$$

Avec f_{extern_i} nulle, et des contraintes sur certaines masses. Ces équations sont ensuite intégrées dans le temps à l'aide de la méthode de Runge Kutta de degré 4.

3.2.2 Muscles dynamiques

Les muscles cinématiques simulés par les techniques présentées ci-dessus sont plus ou moins réalistes. Mais, même avec des modèles physiques, les effets dynamiques manquent lors de mouvements rapides, brusques du squelette.

3.2.2.1 Surface polygonale + ressorts (aubel)

En 2002, Aubel [2] présente une technique beaucoup moins coûteuse qu'un modèle physique complet (type éléments finis) qui permet de simuler le mouvement des muscles d'un personnage avec des effets dynamiques en rajoutant quelques ressorts qui entraînent une chair virtuelle. Encore une fois, les muscles sont modélisés individuellement. Les muscles et leurs tendons sont représentés par une surface polygonale triangulée. Chaque muscle se compose de deux parties :

- le squelette du muscle défini par les lignes d'action introduites par Nedel [23]
- un maillage surfacique qui représente l'enveloppe du muscle

De la même façon que dans [23, 22, 24], c'est la ligne d'action du muscle qui engendre les déformations et c'est donc sur cette ligne d'action que les efforts ont été concentrés.

3.2.2.2 Représentation de la ligne d'action du muscle

Aubel [2] propose deux modèles de lignes d'action visant des buts différents : un modèle physique, lent mais précis et un modèle géométrique beaucoup plus rapide destiné à être utilisé en temps-réel.

3.2.2.2.1 Modèle physique Dans ce modèle, la ligne d'action est un ressort constitué d'un ensemble de ressorts mis bout à bout. Les deux extrémités de cette chaîne sont attachées aux os et entre ces deux extrémités, on a un ensemble de nœuds dynamiques dont la position résulte de la relaxation du ressort (lorsque les deux extrémités se rapprochent). Tous les nœuds de la ligne d'action ont la même masse et la raideur de chaque ressort dépend de ce qu'il représente : tendon ou ventre du muscle. Pour contraindre cette ligne d'action, on ajoute des champs de forces attractifs pour raffiner la trajectoire, répulsifs pour empêcher par exemple que les ressorts ne pénètrent dans les os. Enfin, pour éviter certains problèmes d'angles, on peut approcher une partie de la ligne d'action par une courbe de Bézier cubique.

3.2.2.2.2 Modèle géométrique

Dans ce modèle, on enlève l'élasticité du modèle précédent. La ligne d'action devient donc un segment qui possède des nœuds dynamiques. Les positions de ces nœuds varient suivant la longueur de la ligne d'action et entraînent de cette façon des modifications du muscle. Ce modèle est beaucoup plus rapide, mais moins précis et peu adapté aux muscles complexes. D'autre part, puisque les forces ne sont pas modélisés, il n'est pas possible d'avoir un retour sur les forces qui entrent en jeu lors du mouvement.

3.2.2.3 Animation

L'animation de l'un ou l'autre modèle est simple. Lorsque les extrémités de la ligne d'action se rapprochent, les nœuds dynamiques bougent et une nouvelle enveloppe du muscle est calculée par une technique de type SSD. La ligne d'action joue le rôle du squelette. Cependant, ce modèle permet seulement d'obtenir des déformations cinématiques. Pour ajouter des déformations dynamiques, Aubel rajoute des ressorts avec un fort amortissement. Chaque nœud de la ligne d'action est donc attaché par un ressort au nœud correspondant sur sa trajectoire cinématique.

Ceci résulte en un mouvement dynamique de la ligne d'action et donc du muscle. La position finale de la ligne d'action retenue est, pour chaque nœud, une interpolation linéaire entre la position dynamique et la position cinématique. Avec cette technique, Aubel obtient de bons résultats visuels.

3.2.3 Tissus cinématiques

Le terme *tissus* peut englober plusieurs parties de l'anatomie, selon le papier. Il est le plus souvent utilisé pour tout ce qui n'est pas du muscle : graisse, yeux, organes internes, derme ... ou bien pour désigner une couche mixte muscles-graisse. Par tissus cinématiques, on entend les tissus calculés à partir de modèles physiques mais où l'effet recherché est obtenu après stabilisation de forces (utilisation d'algorithmes de relaxation).

3.2.3.1 Éléments finis non temps-réel (Gourret)

Gourret [13] utilise des éléments finis pour modéliser une main qui saisit une balle. Les deux objets, la main et la balle, sont discrétisés en éléments finis cubiques (8 nœuds et 3 degrés de liberté par nœud).

L'algorithme de la modélisation est le suivant :

1. Synthèse des surfaces triangulées de la balle et de la main à l'aide de SABRINA (système développé à l'EPFL).
2. Création d'un maillage volumique des objets.
3. Calcul des déformations avec une méthode basée sur les éléments finis.
4. Résultats transmis à SABRINA qui ressort une surface triangulée des objets déformés.

Le modèle d'objet utilisé est un modèle en couches constitué d'os réalistes et de chair déformable. Les os sont connectés par des articulations et animés par le système HUMAN FACTORY.

La chair volumique est discrétisée en éléments finis mais le maillage n'est pas uniforme. Il est plus dense dans les régions les plus sensibles car ces régions sont plus riches en informations.

L'équation d'équilibre utilisée par Gourret est celle de l'élasticité linéaire :

$$f = [K].u \quad (3.2)$$

K est la matrice de raideur $[n * n]$

f est le vecteur de force $[n * 1]$

u est le vecteur de déplacement $[n * 1]$

Sous cette forme simplifiée, le corps peut être vu comme un énorme ressort 3D de raideur K qui retourne une force f .

Étant donné que l'animateur ne peut imposer qu'un déplacement de la main mais pas une force, les calculs seront donc faits à partir du déplacement u_k imposé par l'animateur aux os de la main. La première étape consiste à placer la balle entre les doigts, quel que soit le matériau utilisé pour la balle. Ensuite, l'animateur place les doigts à l'intérieur de la balle et l'algorithme commence une série d'itérations qui calcule et décide si cette position est valide ou non. Dès que la balle et la main sont en contact, elles sont fusionnées en un seul objet. La balle doit alors être repoussée pour empêcher le recouvrement. La suppression du recouvrement crée des forces réactives sur la surface de la balle qui sont appliquées à la peau. À l'équilibre, ces forces maintiennent des déplacements compatibles entre les surfaces des deux objets.

L'algorithme est le suivant :

1. Mouvement des articulations par une méthode classique (paramétrique, cinématique ou dynamique) et calcul des déplacements u_k des os.

2. Déplacer la peau selon u_k , sans la déformer. La main se retrouve donc à l'intérieur de la balle. Application des déplacement u_k sur les nœuds de la balle pour empêcher l'interpénétration. La balle est alors écrasée plus qu'il ne faut et la main est inchangée.
3. Résoudre les équations 7 et 8 (détaillées plus bas) pour obtenir les déplacements u_u sur la balle et les forces réactives f_u sur les points de contact de la balle.
4. Appliquer la force $-f_u$ sur les points de la peau pour garantir l'égalité et l'opposition des forces entre la balle et la peau à l'équilibre.
5. Faire comme si les forces de contact f_u étaient les forces prescrites f_k de la balle sur la peau.
6. Résoudre les équations 7 et 8 pour la main et la balle simultanément pour obtenir les déplacements u_u de la balle et de la peau, et les forces réactives f_u sur les os. Si l'équilibre n'est pas atteint et si les forces réactives sur les os ne dépassent pas un certain seuil de validité, on continue au pas 2, sinon, on s'arrête.

$$\text{Relation7 : } K_{11}.u_u = f_k - K_{12}.u_k$$

$$\text{Relation8 : } f_u = K_{21}.u_u + K_{22}.u_k$$

Les relations 7 et 8 représentent le système global composé de la balle et de la main.

Le traitement global présenté ici peut aussi être appliqué à l'interdéformation de doigts, à la déformation entre les doigts et la paume, c'est à dire pour tous les cas de compression et dilatation entre deux morceaux d'humanoïde.

Le principal inconvénient de cet algorithme est que le nombre d'itérations n'est pas prévisible, ni garanti inférieur à une certaine limite. Cela compromet donc fortement le temps réel. Un autre problème est que, même après un certain nombre d'itérations, on n'est pas sûr d'obtenir un résultat, seulement la certitude que la valeur du déplacement imposé au début à la main n'est pas bonne. Il faut alors recommencer une autre simulation. Le résultat n'est donc pas garanti non plus, ce qui est extrêmement gênant dans le cas d'un système interactif. Bien sûr, ces incertitudes se compensent par une très bonne modélisation des contacts entre les deux objets et de très bons résultats visuels.

3.2.3.2 Éléments finis temps réel (Cotin)

Plus récemment, Cotin [9] utilise les éléments finis pour la modélisation d'un foie. Son but est de l'animer en temps-réel, malgré les temps de calculs énormes dûs à l'utilisation des éléments finis. Le modèle de foie doit servir à la simulation d'une opération avec un système à retour d'efforts. La simulation de déformations avec retour d'efforts se fait par une boucle fermée :

1. Le modèle se déforme en accord avec le mouvement induit par le chirurgien.
2. On calcule la force de contact à partir de cette déformation.
3. On génère cette force sur le système à retour d'efforts.

Le problème principal de ce genre de simulation est le temps-réel. Pour assurer un réalisme suffisant, le calcul des forces doit être effectué à une fréquence d'au moins 300 Hz, et le rendu à 24 Hz. Cependant, les méthodes de calculs basées sur les éléments finis ou les réseaux masses-ressorts sont trop coûteux en temps de calcul. Cotin et al. utilisent donc un algorithme spécial détaillé plus loin.

3.2.3.3 Élasticité linéaire

Tout d'abord, étudions le modèle utilisé par Cotin [9]. D'après [fun 93], le meilleur modèle pour le réalisme pour les tissus déformables est un modèle visco-élastique non linéaire. Le problème est que c'est très long et très complexe à calculer. Comme première approximation de la

loi de déformation de tissus déformables on peut prendre une élasticité linéaire 3D. Soit Ω le corps déformable, f_Ω et f_Γ , les forces volumiques et surfaciques. Soit Ω^* , le corps obtenu après déformation. Soit u , le déplacement de chaque point qui associe la position p_0 de chaque particule à la position p obtenue après déformation. Le problème est résolu par les éléments finis. Le domaine Ω est décomposé en un ensemble de tétraèdres. La solution du problème d'élasticité est alors la solution du système linéaire suivant :

$$f = [K]u. \quad (3.3)$$

$[K] = 3n * 3n$: matrice de raideur, symétrique, positive et sparse

n : nombre de nœuds

u : déplacement inconnu

f : forces extérieures.

Lors de la simulation, des forces extérieures sont appliquées sur la surface du solide alors que quelques nœuds sont fixés. Étant donné qu'on utilise un système à retour d'efforts, il est impossible de mesurer la force exercée par le manipulateur. La seule chose que l'on connaît est la position de l'extrémité du bâton qui appuie sur le solide. Les calculs de déformation doivent donc se faire avec des contraintes sur le déplacement u et non sur la force f . Les conditions aux limites sont principalement les déplacements des points de contacts entre le corps déformable et l'instrument chirurgical. On peut donc déduire la force exercée sur le capteur situé au bout de l'instrument et la déformation globale du corps par application des équations de l'élasticité linéaire. Les forces calculées peuvent ensuite être retournées au système à retour d'efforts pour opposer une résistance au mouvement de la main du chirurgien. Pour inclure les nouvelles contraintes, on remplace le système $f = [K]u$ par le système suivant :

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{ccc} a & b & c \end{array} \right) \\ & = \frac{u}{\lambda} \\ & \frac{f}{u^*} \end{aligned} \quad (3.4)$$

c'est à dire : $K * u + \bar{K} * \lambda = f$ et $\bar{K}^T * u = u^*$.

$[\bar{K}]$ est une matrice composée de vecteurs e_i avec un 1 à la i ème position et des zéros partout ailleurs.

Ce système provient de la méthode des multiplicateurs de Lagrange utilisée pour imposer certaines valeurs aux variables solution. Les valeurs λ_i de $[\lambda]$ obtenues après résolution du système sont égales à l'opposé de la force qui doit être appliquée au degré de liberté u_i pour imposer le déplacement u_i^* . Les résultats obtenus de cette façon (élasticité linéaire) sont uniquement valables pour des petits déplacements, ce qui convient très bien dans le cas de cette simulation car les déplacements sont limités à cause du système à retour d'efforts. L'intérêt de l'élasticité linéaire est la possibilité de calculer n'importe quelle déformation à partir de la connaissance d'un nombre fini de déformations élémentaires. L'autre intérêt est qu'il est possible de précalculer la matrice de raideur K et de ne l'inverser qu'une seule fois. Le gros problème de cette approximation est que ces équations ne sont plus du tout valables dans le cas de grands déplacements. On observe de grandes variations de volumes, complètement irréalistes.

3.2.3.4 Élasticité non-linéaire

Dans une seconde étape, le modèle de Cotin [9] a été amélioré pour simuler une élasticité quasi non-linéaire. Les expériences menées par Chinsei, montrent les propriétés suivantes :

- la réponse sous compression dépend de la vitesse de compression ;
- elle est non-linéaire ;
- elle reste approximativement la même sous des conditions identiques ;
- on peut tracer les courbes $f(x)$ = force appliquée et $dr(x)$ = déplacement radial avec x = déplacement axial

Supposons les courbes $f(x)$ et $dr(x)$ disponibles pour l'objet considéré. À l'aide d'une minimisation aux moindres carrés, on peut approcher ces fonctions par deux polynômes : respectivement $Q(x)$ et $P(x)$, de degré compris entre 4 et 10 suivant la précision désirée. Pour étendre ces résultats au cas 3D tout en préservant une loi de déformation basée sur l'élasticité linéaire, on fait les propositions suivantes :

- Le calcul d'une déformation quasi non linéaire sera basé sur un résultat de déformation linéaire, utilisant le même maillage avec les mêmes contraintes. En conséquence, $dr(x)$ et $f(x)$ doivent être exprimés en tant que fonctions du déplacement linéaire $dr_l(x)$ et $f_l(x)$
- La variation en amplitude du déplacement radial doit être similaire à celle des courbes expérimentales. Le déplacement u_n associé au nœud n est décomposé en deux vecteurs : u_{n_t} et u_{n_r} , un colinéaire et un orthogonal à la direction de la contrainte (nécessaire car les résultats expérimentaux ne donnent des renseignements sur la déformation radiale que dans le cadre de l'application d'une contrainte axiale sur le dessus de l'échantillon cylindrique). En conséquence, seule la variation non linéaire de l'amplitude de la composante orthogonale est connue. Ainsi, l'amplitude de u_{n_r} est modifiée pour suivre la courbe $P(x)$ tandis que u_{n_t} continue d'avoir une variation linéaire. Pour exprimer $dr(x)$ et $f(x)$ en fonction respectivement de $dr_l(x)$ et de $f_l(x)$, on utilise le module d'Young E et le coefficient de poisson ν établis empiriquement pour le matériau considéré. Pour un cylindre de hauteur h et de rayon r , la déformation radiale théorique est $dr_l(x) = \nu r x / h$ et $f(x) = s E x / h$ avec s , surface du haut du cylindre. De là, on peut déduire les fonctions $P(dr_l(x))$ et $Q(f_l(x))$ pour des propriétés élastiques particulières.

Considérons un nœud n avec le déplacement linéaire suivant : $u_n = u_n^t + u_n^r$. Le déplacement non linéaire correspondant est $U_n = u_n^t + U_n^r$ avec

$$U_n^r = P(\|u_n^r\|) \frac{u_n^r}{\|u_n^r\|} \quad (3.5)$$

L'amplitude des forces est modifiée de la même façon, sauf que c'est la composante colinéaire qui est modifiée en accord avec $Q(x)$. La force non linéaire au nœud n est donc $F_n = F_n^t + f_n^r$ avec

$$F_n^r = Q(\|f_n^r\|) \frac{f_n^r}{\|f_n^r\|} \quad (3.6)$$

Le modèle de déformation de Cotin est donc beaucoup plus élaboré que celui de Gourret qui n'était qu'une simple élasticité linéaire. Cotin présente un modèle d'élasticité non linéaire qu'il est capable de l'animer en temps-réel grâce à des précalculs judicieux.

3.2.3.5 Vers le temps-réel

Le meilleur moyen pour réduire le temps de calcul de déformation d'un modèle lorsqu'il s'agit d'un réseau masses-ressorts est bien évidemment de réduire le nombre de ressorts. C'est ce que fait Nedel [22, 23, 24] par rapport à Chadwick [7] en modélisant un muscle par un réseau de ressorts surfacique au lieu de volumique. Seulement, même si elle obtient du temps-réel pour un seul muscle, elle est je pense encore loin du temps-réel pour un humanoïde complet.

Une meilleure idée est probablement d'essayer de précalculer un maximum de choses hors ligne. C'est ce que fait Cotin [9]. Il base son algorithme sur le principe de linéarité et de superposition qui sont des conditions nécessaires.

A. Préalcul des déformations élémentaires

1. Spécification d'un ensemble de nœuds qui restent immobiles pendant la déformation. On assigne alors le déplacement $u_i^* = 0$ à chaque degré de liberté qu'il est nécessaire de spécifier, ce qui élimine des équations de la relation 3.3
2. Pour chaque nœud libre k sur la surface sur maillage, on impose un déplacement élémentaire $u_k^* = [\delta_1, \delta_2, \delta_3]^T$ et on calcule deux choses :
 - le déplacement de chaque nœud libre n différent de k et on le stocke dans un ensemble de tenseurs 3×3 $[T_{nk}^u]$ exprimant le déplacement du nœud n dû au déplacement élémentaire du nœud k imposé ;
 - les composantes de la force élémentaire λ au nœud k qui sont stockées dans le tenseur 3×3 $[T_k^f]$ et calculées à l'aide du système 3.2.3.3.

Cette étape de pré-calculs peut durer de quelques minutes à plusieurs heures. Les résultats sont stockés dans un fichier.

B. Déformations en temps-réel avec une élasticité linéaire

Le déplacement u_n d'un nœud n induit par la contrainte u_k^* appliquée au nœud k peut être obtenu par l'équation linéaire suivante :

$$u_n = [T_{nk}^u] \frac{u_k^*}{\|u_k^*\|} \quad (3.7)$$

pour chaque nœud n différent de k .

En général, plusieurs nœuds sont déplacés sur la surface du corps, donc, le déplacement d'un nœud est la somme de tous les déplacements induits par un nœud contrôlé. Cependant, la somme n'est pas directement applicable, car les nœuds contrôlés s'influencent mutuellement. On peut donc calculer la contrainte $\tilde{u}_{k_l}^*$, $l = 1, \dots, m$, apportée par chaque nœud à la somme à partir des précédents tenseurs de déformation $[T_{nk}^u]$. La matrice suivante représente l'influence mutuelle de tous les nœuds contrôlés :

$$M = \begin{pmatrix} \delta & T_{21}^u & T_{31}^u & \dots & T_{m1}^u \\ T_{12}^u & \delta & T_{32}^u & \dots & T_{m2}^u \\ \vdots & & & & \vdots \\ T_{1m}^u & T_{2m}^u & T_{3m}^u & \dots & \delta \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

avec

$$\delta = \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_3 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Le vecteur de contraintes modifié $[\tilde{u}^*]$ qui doit être appliqué au maillage est $[\tilde{u}^*] = [M]^{-1}[u^*]$. Puis, grâce au principe de superposition, on calcule le déplacement total de chaque nœud n :

$$u_n = \sum_{l=1}^m [T_{nk_l}^u][\tilde{u}_{k_l}^*]$$

La force associée à un nœud contrôlé k est déterminée par : $f_k = [T_{nk}^f][u^*]$ (c'est la force qu'il faut appliquer au nœud k pour produire le déplacement \tilde{u}^*).

Pour les déformations quasi non-linéaires en temps-réel, on se sert des tenseurs $[T_{nk}^u]$ et $[T_{nk}^f]$ précalculés pour des déformations linéaires. Ils nous permettent de calculer u_n et f_n , on peut donc en déduire u_n^r , f_n^r et u_n^t , f_n^t , les composants colinéaires et orthogonaux et appliquer les relations 3.5 et 3.6, peu coûteuses en temps de calcul.

3.2.4 Tissus Dynamiques

Les modèles d'animation de tissus dynamiques utilisent tous des éléments finis ou des réseaux masses-ressorts pour définir l'élasticité du tissu. Les lois de l'élasticité varient, et, en particulier, s'il s'agit d'élasticité linéaire ou pas.

3.2.4.1 Masses ressorts (Chadwick)

C'est la mécanique la plus simple pour faire des modèles physiques. Cependant, les réseaux masses ressorts sont souvent difficiles à contrôler, et les intégrations numériques ne sont pas toujours stables. Leur avantage par rapport aux éléments finis est leur facilité de mise en œuvre et des coûts de calcul réduits.

Le premier modèle de déformations dynamiques a été proposé par Chadwick [7] en 1989 pour modéliser les joues d'un personnage. Rappelons que dans son modèle, les déformations cinématiques sont calculées à l'aide de FFDs. Pour les déformations dynamiques, on fait correspondre les cubes FFD à des cubes masses-ressorts. Chaque point de contrôle devient une masse (particule) et on met des ressorts entre chaque masse.

À chaque pas de temps, les forces dues aux ressorts sont calculées et appliquées aux particules qui répondent par une accélération dans la direction où la force a été appliquée. Les équations du mouvement sont intégrées en utilisant la méthode de Runge Kutta de degré 2 avec un pas de temps adaptatif. Bien sûr, certains points sont fixes, principalement ceux qui sont rattachés aux os. La dynamique est appliquée en post-traitement, après le calcul du mouvement du squelette articulé.

L'algorithme est le suivant :

1. Le mouvement complet du personnage est précalculé
2. À ce moment là, les positions de chaque point de contrôle de la FFD sont connues. On en fixe certains, ceux qui sont collés aux os par exemple.
3. On construit le modèle physique (on met les ressorts) et le mouvement des points fixes est utilisé pour induire le mouvement des points dynamiques.
4. On calcule les nouvelles positions des points grâce aux équations du mouvement et les positions de ces points sont ensuite mises en correspondance avec les points de contrôle de la FFD, ce qui définit donc la forme déformée dynamiquement de la chair.
5. La continuité est maintenue entre les régions internes des mid-planes et avec les adjoining planes. Il faut nécessairement choisir des constantes (raideurs des ressorts, amortissement ...) et ceci est fait en accord avec l'apparence visuelle des résultats lors de l'animation. Ils ne sont pas nécessairement basés sur des réalités physiques.

L'avantage du réseau masses-ressorts couplé à des FFDs est qu'il est très facile de passer d'un modèle d'animation à l'autre, c'est à dire de passer d'une simulation cinématique à une simulation dynamique.

3.2.4.2 Éléments finis

Le principal problème des éléments finis est le coût prohibitif des calculs. En effet, la quantité de calculs est liée à deux choses : tout d'abord, elle est directement proportionnelle au nombre d'éléments du maillage, et, par ailleurs, elle dépend fortement des lois de l'élasticité choisies. Les différents travaux qui ont été menés s'intéressent à l'un ou l'autre de ces problèmes.

3.2.4.3 Éléments finis hiérarchiques - temps réel (debonne)

Lorsque l'on souhaite des déformations précises sur un modèle, il est évidemment nécessaire d'avoir un maillage fin. Le problème est que quand on affine un maillage, le nombre d'éléments croît très vite. Pour contrecarrer ce problème et donc améliorer les temps de calculs, Debonne utilise dans sa thèse [10] des éléments finis hiérarchiques. Il s'agit en fait d'avoir comme représentation du modèle différents maillages à différentes résolutions. Ensuite, lors de la simulation, on maille plus finement la zone où des déformations apparaissent alors qu'on peut maille grossièrement les zones qui subissent peu ou pas de déformations.

3.2.4.4 Dynamic Response Texture - temps réel (james)

James et Pai [16] ont développé un modèle physique capable de simuler des déformations dynamiques d'un objet volumique à la géométrie complexe en temps-réel. Ce modèle appelé DyRT pour "Dynamic Response Texture" peut être rajouté à n'importe quel modèle d'animation conventionnel et est traité au même moment et de la même façon que le rendu en utilisant les capacités de calcul de la carte graphique.

Les déformations de la DyRT sont basées sur l'analyse modale. Le modèle d'humanoïde utilisé est constitué d'os et de chair. Les os sont responsables du mouvement et de l'excitation des modes vibratoires des DyRT qui y sont rattachées. Pour les parties du corps déformables nécessitant du dynamique, on crée un maillage volumique d'éléments finis tétraédriques. Ensuite, pour chaque maillage, on calcule les modes de vibration [26] et on les enregistre dans la mémoire de la carte graphique.

L'algorithme de construction du modèle est le suivant :

1. Créer la géométrie du personnage (os articulés et chair)
2. Pour chaque partie déformable, on construit un objet DyRT :
 - on définit un volume élastique ;
 - on génère un maillage de ce volume ;
 - on fixe certains éléments du maillage (les sommets collés aux os) ;
 - on définit les propriétés matérielles de ce volume : raideur, compressibilité et densité ;
 - on calcule les modes dominants par un logiciel d'analyse modale (les m fréquences modales w_i et les m enveloppes volumétriques ϕ_i) ;
 - on définit les m cartes de perturbation des normales N_i , calculées à partir de la géométrie du personnage ;
 - on calcule les filtres de convolution et la matrice de transfert H

L'idée intéressante de cet article est de ne rajouter les effets dynamique que là où ils sont nécessaires au lieu de créer un modèle élastique complet d'un humanoïde par exemple. L'avantage est double : premièrement, en travaillant sur des maillages plus petits, les temps de calculs s'en trouvent réduits. Dans cette technique d'ailleurs, ce ne sont que des précalculs puisqu'ils utilisent l'analyse modale. Deuxièmement, puisque les maillages sont séparés pour chaque partie du corps (ce sont des objets DyRT différents), il est alors possible de donner des propriétés mécaniques différentes à ces différents maillages. On peut donc imaginer des muscles plus raides au niveau des cuisses et un ventre plus mou car il s'agit en réalité de tissus adipeux. De même, il est possible pour les mêmes raisons d'empiler plusieurs objets DyRT et ainsi de réaliser des couches de différentes propriétés mécaniques. Cependant, cela n'a pas été réalisé par les auteurs. Enfin, le temps-réel dans cette technique est surtout dû à l'utilisation de l'analyse modale. La carte graphique ne joue finalement qu'un rôle mineur mais essentiel : la superposition linéaire des modes retenus point par point.

3.2.4.5 Stiffness Warping : élasticité non linéaire, temps réel (Müller)

La méthode présentée par Müller et al. [21] adresse plus particulièrement le problème des larges déformations en élasticité non linéaire. Le problème principal de l'élasticité linéaire est que les forces élastiques linéaires sont invariantes par translation, mais pas par rotation, ce qui fait que le volume de l'objet n'est pas conservé lors de larges déformations. L'inconvénient majeur de l'élasticité non linéaire pour obtenir des temps de calculs faibles est que la matrice de raideur de l'objet change à chaque pas de temps et qu'il n'est donc pas possible de la précalculer.

La méthode de Müller résoud ces deux problèmes car les calculs se font à partir de la matrice d'élasticité linéaire précalculée qui est ensuite transformée par un champ de tenseurs qui décrit les rotations locales du matériau déformé. Il s'agit donc d'extraire la partie rotationnelle de la déformation de la matrice de raideur. De cette manière, l'objet garde un volume constant et il est possible de précalculer la matrice de raideur. Pour cela, à chaque pas de temps, on calcule le champ de tenseurs qui décrit les rotations locales de tous les sommets du maillage.

En élasticité linéaire, les forces élastiques pour un tétraèdre sont :

$$f_{elastic} = K(x - x_0)$$

K : matrice de raideur de l'élément

$f_{elastic}$: les forces élastiques

$x \in D$ autre part, soit $R_x \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, une matrice de rotation 3D orthogonale représentant une composante rotationnelle globale de la transformation rigide du tétraèdre. Soit $R_e \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$, qui contient 4 copies de R_x sur sa diagonale et 0 partout ailleurs :

$$R_e = [R_x \dots]$$

Étant donné que l'on connaît la rotation des 4 sommets du tétraèdre (R_e), on peut enlever cette rotation, ($R_e^{-1}x$), calculer la force élastique en élasticité linéaire sans la rotation (dans ce cas, la formule est valable) et remettre la rotation ensuite. Cela donne mathématiquement :

$$f_{elastic} = R_e K (R_e^{-1}x - x_0)$$

Il suffit donc d'appliquer ce calcul de force à chaque sommet de chaque tétraèdre. Cette technique fonctionne en temps réel et les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus par une vraie élasticité non linéaire, mais à moindre coût. Cette méthode peut aussi bien être appliquée à des éléments finis qu'à des réseaux masses-ressorts. Elle a été appliquée à un chien qui secoue la tête. Seule la tête du chien a été simulée, mais les résultats sont impressionnants.

3.2.5 Peau élastique

Le plus souvent, les modèles en couches ne sont pas recouverts d'une peau élastique, celle-ci étant fusionnée avec l'enveloppe externe des muscles ou des tissus. Cependant, quelques papiers ont proposé soit une peau polygonale élastique modélisée par des ressorts surfaciques, soit une peau calculée à partir d'une surface implicite "enveloppant" tous les composants internes et simulant une épaisseur de graisse.

3.2.5.1 Surfaces triangulées (Wilhelms)

Une fois le muscle modélisé (ce qui peut être fait par n'importe quelle technique qui convient), on peut y attacher une peau élastique. La peau de Wilhelms [33], est une surface triangulée générée lorsque l'animal est dans sa position de repos. Elle est constituée de ressorts et attachée

en certains points aux muscles, os ou autres tissus, de manière non fixe pour lui permettre de glisser. Les points d'attache, appelés *ancres*, se déplacent en suivant les muscles et leurs déformations (compression, étirement).

Une fois le maillage de la peau défini et relié aux composants du dessous (les muscles, les os), on modélise chaque arête de la surface triangulée par un ressort dont la raideur k_e est :

$$k_e(v_1, v_2) = (a_1 + a_2)/len^2$$

avec v_1 et v_2 les deux extrémités de l'arête, len , la longueur de cette arête au repos, et a_1 et a_2 , les aires des deux triangles ayant l'arête en commun. Cette formule permet de donner une meilleure uniformité des raideurs (mieux qu'une raideur constante appliquée à toutes les arêtes).

De même, les liaisons entre les ancres et leurs sommets correspondants du maillage de la peau sont modélisées par des ressorts de raideur k_a :

$$k_a = C_a \cdot \sum_i \left(\frac{a_i}{3}\right)$$

avec a_i , l'aire du triangle i ayant le sommet courant comme sommet (la somme se fait sur tous les triangles), C_a , facteur d'échelle permettant de faire plus ou moins glisser la peau sur les muscles (entraîne une raideur contrôlable mais qui reste proportionnelle à l'aire des triangles). La longueur à vide de ces ressorts est nulle.

Au moment de l'animation, lorsque le muscle se déforme, on calcule la nouvelle position des ancres situées sur le muscle, puis on applique un algorithme itératif de relaxation pour ajuster les sommets du maillage de la peau jusqu'à ce que les forces élastiques de la membrane atteignent l'équilibre. En effet, les points des couches inférieures auxquels sont attachés les sommets de la peau ont bougé. Les ressorts ont donc été tirés et ils doivent maintenant retrouver un état d'équilibre avant l'affichage.

L'algorithme de relaxation est le suivant :

1. On calcule le vecteur de force élastique pour chaque sommet. Soit $w_j = v_1 - v_2$, le vecteur reliant v_1 , le sommet courant à v_2 , le sommet situé à l'autre bout de l'arête. La longueur de w_j est la longueur de l'arête. On en déduit le *length excess* qui est la différence de longueur entre la longueur actuelle et la longueur au repos. Bien sûr, cette longueur peut être négative.
2. On calcule la force élastique sur chaque arête en multipliant le *length excess* par k_e (qui peut avoir été modifié selon le *length excess* pour favoriser le retour à la position d'équilibre par exemple). La direction de cette force est celle de w_j , c'est à dire qu'elle pointe vers v_1 si le *length excess* est positif, vers v_2 sinon.
3. Pour chaque sommet, on calcule la somme des forces élastiques dues à chacune des arêtes aboutissant à ce sommet et de la force due à l'arête reliant le point du maillage à son ancre. Ceci nous donne la force élastique agissant sur le sommet. Cette force est divisée par la somme des raideurs des ressorts contribuant à cette force pour donner le vecteur de relaxation élastique.
4. Tous les sommets de la peau sont translatés par le vecteur de relaxation élastique. Si on constate que ce vecteur fait entrer la peau en collision avec les composants des couches inférieures, on peut ajouter une force de rappel pour empêcher cette collision. Ensuite, on recommence à l'étape 1 tant que le vecteur de relaxation n'a pas atteint un seuil limite fixé par l'utilisateur ou un nombre maximum d'itérations.

Le point positif de cet algorithme de relaxation est que le nombre d'itérations est limité et l'on ne risque pas, comme dans le modèle de Gourret [13], de voir la simulation s'éterniser. D'autre part, le résultat est garanti et visuellement très satisfaisant.

3.2.5.2 Surfaces implicites (scheepers)

Dans le modèle de Scheepers [28], la peau est générée à partir de fonctions implicites ce qui permet de régler l'épaisseur de graisse et de chair entre les muscles et la peau.

Partie Etat de l'art sur les plis de la peau et de vêtements

3.3 Synthèse des détails externes : plis de la peau et/ou de vêtements

Quelque soit le modèle utilisé, la production d'animations de bonne qualité ne suffit à rendre les personnages réalistes. Il manque souvent des détails importants visuellement comme par exemple les plis. On peut en distinguer deux catégories : les plis statiques, qui sont présents et changent peu lors de l'animation et les plis dynamiques, qui se forment et se déforment au cours du temps. La première catégorie est le plus souvent créée lors de la modélisation, lorsque l'on se place dans le cas d'un skinning classique. Le graphiste incorpore directement ces plis dans le maillage ou dans la texture. Par contre, la seconde catégorie de plis a fait l'objet de beaucoup plus de recherches, car elle demande un travail énorme à un animateur.

Cette section s'intéresse au cas des rides qui ne sont pas fixes mais qui varient au cours de l'animation, suivant le mouvement de la surface (par exemple, le mouvement de la peau dictée par le mouvement d'un squelette. Quand le personnage bouge, la peau glisse à la surface et des plis se créent aux endroits où la peau s'accumule : aux articulations par exemple, comme on peut le voir sur la photo 3.10.)

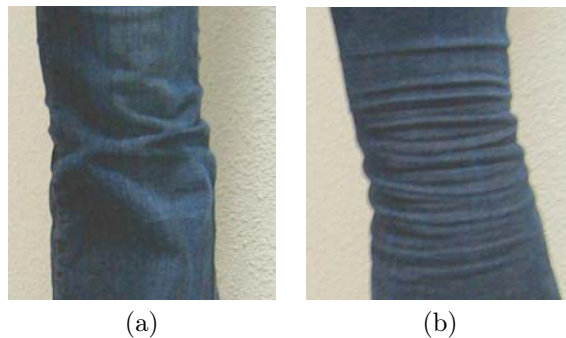


FIG. 3.10 – Avant (a) et arrière (b) d'un jean réel.

3.3.1 Bosselage ou bump mapping et déplacement mapping

Les premiers travaux sur les rides ont été réalisés par Blinn [4] en 1978. Au lieu d'essayer de simuler les plis d'un maillage directement, il invente la technique du bosselage, plus connue sous le nom anglais de *bump mapping*. Il s'agit de modifier les normales de la surface avant d'effectuer les calculs d'éclairage en chaque point de la surface. C'est une technique simple, facilement implémentable sur les cartes graphiques actuelles, et qui est parfaitement adaptée à de petites perturbations de la surface. Cela permet d'obtenir des effets visuels de creux et de bosses sans que le maillage ne soit déformé. Cette technique a été reprise par plusieurs travaux [1, 6, 25] pour simuler des rides faciales. Le principal problème de cette méthode est que la silhouette de l'objet ne se déforme pas et on voit des défauts quand la caméra est très proche de l'objet (ou les

plis trop gros) ou bien quand les rides se forment sur une surface très courbe comme les plis de pantalon au creu du genoux (voir figure 3.10 (b)). La seconde conséquence de la non déformation du maillage est que cela rend erronée la détection de collisions dans la région des rides. Cela pose problème surtout dans la simulation de vêtements où les rides sont suffisamment larges pour être impliquées dans des collisions ou auto-collisions.

Pour remédier aux problèmes du rendu dans les cas limites (silhouette non déformée), il est possible d'utiliser du *displacement mapping* qui déplace les sommets du maillage avant le rendu. Cette technique est maintenant rapide car elle exploite les propriétés des cartes graphiques récentes. En contre-partie, il devient impossible (comme dans le cas du bump mapping), d'effectuer des calculs sur le maillage après cette étape car les nouvelles positions des sommets ne sont pas stockées.

Volino [31] propose une technique rapide, basée sur des polygones pour animer les rides de modèles déformables. Il s'agit de moduler l'amplitude d'un schéma de ride donné sur chaque triangle. Le maillage est automatiquement affiné si nécessaire. Pour le rendu, il utilise soit du bump mapping, soit du displacement mapping. Ce travail qui donne de très bons résultats visuels a été étendu dans [14]. Le problème de la technique se trouve du côté de l'utilisateur qui doit dessiner un motif de rides complet et régler des paramètres jugés non intuitifs par Kono [17]. Plus récemment, Bando [3] a repris le même genre d'idée. La différence se situe dans la construction de la carte de déplacements. L'utilisateur doit spécifier les rides potentielles une par une dans la projection 2D du maillage de l'objet en dessinant une courbe de Bézier comme creu de la ride et en spécifiant quelques paramètres. Lors de l'animation, ces rides seront présentes ou pas. En plus de cette étape pénible, un précalcul coûteux sur la surface est nécessaire puisque le maillage ne doit pas être quelconque. Il est donc rééquilibré par une étape de minimisation d'énergie sur les arêtes de la surface polygonale. Les résultats obtenus par Bando sont sur la figure 3.11

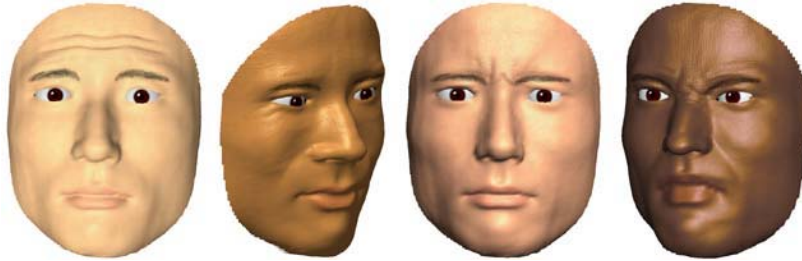


FIG. 3.11 – Résultats de rides du visage obtenus par Bando en 2002

La modulation de l'amplitude des rides peut aussi être obtenue grâce à des modèles physiques parfois assez élaborés [6, 36, 35, 1, 34]. L'idée est de coller au maximum à la réalité physique du tissu déformé et d'utiliser les paramètres d'élasticité et de viscosité de la peau pour résoudre des équations qui génèrent une position d'équilibre et des paramètres pour le rendu des rides. Dans [1] par exemple, la peau est une surface triangulée qui recouvre des muscles modélisés par des B-splines. C'est donc le mouvement des muscles qui déforme le maillage et une tension est calculée en chaque triangle du maillage de la peau. Cette tension permet de calculer une élévation de la ride qui ne peut exister que sur un muscle et qui doit être alignée sur le maillage. Ces techniques sont souvent couplées à du bump mapping ou du displacement mapping pour le rendu. Elles marchent bien, mais sont incompatibles avec le temps réel et très contraignantes. D'autre part, elles supposent que l'on connaisse les paramètres physiques de la peau ou du vêtement simulé et sont indissociables des muscles qui doivent donc être modélisés. Enfin, ce sont des méthodes peu

intuitives pour un utilisateur puisque le résultat final ne peut pas être modifié directement, mais en jouant sur les paramètres d'élasticité des ressorts par exemple.

3.3.2 Déformations géométriques du maillage

Cette sous-section regroupe les articles qui modifient le maillage de l'objet (en soft).

3.3.2.1 Rides créées à partir de splines

Les premiers travaux se sont surtout intéressés aux rides dues à l'animation du visage. Viaud [30] utilise un masque de rides de référence qui consiste en une surface Cardinal spline dont les isolignes sont alignées avec les rides potentielles.

3.3.2.2 Textures de dilatation

Malgré le nom de la technique, elle ne se contente pas de calculer une texture reflétant les éventuels plis, mais génère bien un maillage 3D à partir d'une texture 2D. Étant donné que les rides sont dues à une résistance à la compression, elles peuvent être générées par des techniques de simulation. Combaz [8] génère des plis complexes en simulant les déformations statiques d'un maillage d'éléments finis, déformé par un processus de croissance interne. L'utilisateur dispose d'une interface intuitive pour peindre les directions principales des rides et leur fréquence. Ces propriétés sont utilisées pour mettre en place le comportement d'expansion anisotrope de la surface. Les résultats obtenus sont visuellement très convaincants (figure 3.12) mais la technique en elle-même ne peut pas convenir pour générer des rides à surface constante en réponse à une animation. Les modèles générés sont statiques.

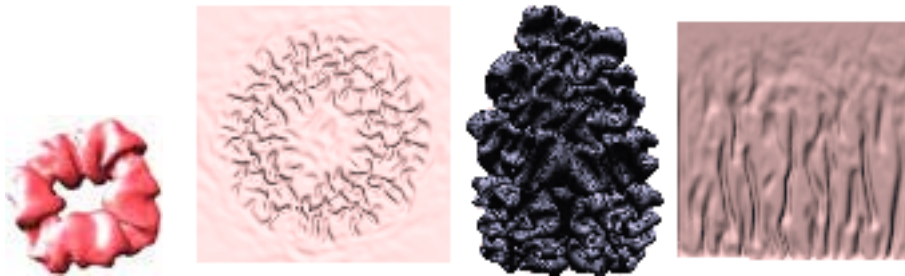


FIG. 3.12 – Résultats de plis obtenus par Combaz en 2002 par une technique de simulation

3.3.2.3 Préservation de contraintes

Les rides dynamiques sont dues à des contraintes de conservation de longueur inhérentes aux tissus physiques. Elles peuvent donc logiquement être générées à partir de ces contraintes. Sauvage [27] et al. ont proposé un modèle de courbe multirésolution qui préserve sa longueur pendant la manipulation en ondulant à une échelle prédéfinie. Leur solution repose sur un processus d'optimisation global qui résout les contraintes sur la longueur de la courbe limite. Cette méthode, initialement loin du temps-réel, atteint maintenant des temps interactifs car une approximation grossière est utilisée avant la convergence finale (Pas encore publiée). Malheureusement, à l'heure actuelle, l'application de cette technique à une surface n'est pas proposée de manière élégante :

les lignes à longueur constante sont forcément des lignes du maillage, ce qui donne une contrainte forte sur l'orientation des rides.

3.3.3 Conclusion

De nombreuses méthodes existantes pour modéliser des plis dynamiques utilisent le bump mapping ou le displacement mapping. L'idée est alors de trouver une fonction adaptée qui module l'amplitude d'un schéma de rides (une texture). Le problème de cette méthode est qu'il n'est pas possible d'appliquer un post-traitement après le calcul de la nouvelle position des sommets du maillage car les positions calculées ne sont pas stockées. La seule possibilité dans ce cas est de coder le traitement et les post-traitements dans un vertex program d'une carte graphique récente. Le gros avantage de ces méthodes est qu'elles sont très rapides, les calculs lourds étant effectués par le GPU. Les autres méthodes déforment le maillage $3D$, mais sont souvent très coûteuses (utilisation de simulation physique par exemple). Un autre inconvénient que l'on retrouve dans plusieurs techniques, est que les rides ne peuvent pas être placées librement, mais elles suivent le maillage et souvent, certains endroits prédéfinis à la modélisation. L'idéal pour respecter la contrainte de temps-réel des jeux vidéos, et simplifier le travail des artistes, serait d'avoir une technique temps-réel, intuitive avec retour visuel immédiat, et sans contraintes fortes sur la position des rides lors de la modélisation.

Chapitre 4

Le visage

4.1 Présentation de l'animation faciale

4.1.1 Origine

Parke [96] fut l'un des premiers à décrire une méthode de représentation et d'animation ayant pour but de générer des visages humains changeant d'expression. Le visage était alors représenté par un maillage de 250 triangles et animé grâce à une interpolation sinusoïdale. Dans le milieu des années 1980, l'animation faciale connut un regain d'intérêt grâce à Waters et son modèle musculaire [90], et grâce à Cohen et Massaro et leur premier essai de synthèse vocale visuelle [80].

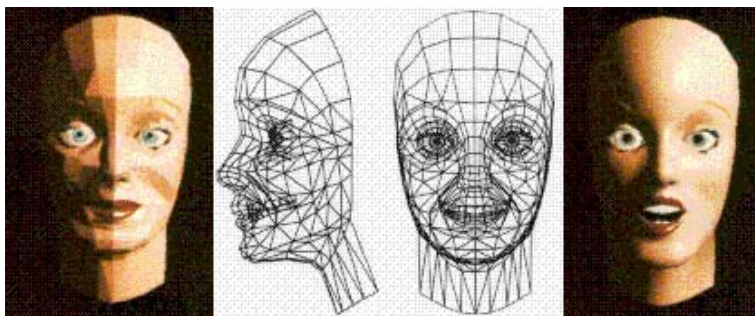


FIG. 4.1 – Parke 1973 : Un des premiers modèles d'animation faciale

4.1.2 Objectifs

Depuis Parke, de nombreuses et différentes techniques ont été mises à l'épreuve (dernièrement recensées par Parke et Waters en 1996 [71]), avec toujours pour but l'**analyse** et la **synthèse** de visages humains en respectant les contraintes suivantes :

- *Temps réel* : On s'efforce dans la mesure du possible à mettre au point des techniques fonctionnant en temps réel, ou au moins en temps interactif.
- *Réalisme* : Le cerveau humain est très sensible à l'expression faciale. Il faut donc atteindre un certain réalisme pour que le résultat soit visuellement crédible.

- *Automatisme* : Quelque soit la technique d’animation faciale utilisée, on va chercher à simplifier au maximum le travail humain (dans l’idéal, se passer complètement de l’intervention humaine).
- *Adaptabilité* : Toujours dans un souci de limiter l’intervention humaine, on cherche à rendre les techniques les plus indépendantes possibles du modèle géométrique et anatomique du visage. Entre autre, on essaiera d’obtenir des techniques indépendantes de la morphologie du visage.

4.1.3 Contraintes

Bien que des systèmes performants existent (Butfield [37], Chai [38]), et que l’amélioration du matériel permette de plus en plus de réalisme, l’animation faciale se heurte à deux problèmes majeurs :

- *La complexité du visage humain* : Celui-ci se compose de nombreuses couches en interaction, contrôlées par un ensemble de nombreux muscles enchevêtrés.
- *La forte sensibilité du cerveau humain à l’expression faciale* : Celui-ci interprète inconsciemment certains signes et expressions du visages, parfois difficiles à identifier.

4.1.4 Motivations

Les motivations derrière la recherche en animation faciale sont de différents ordres :

- *Motivation industrielle*. Les industries du jeu vidéo et du film d’animation utilisent intensivement les techniques d’animation faciale, mais différemment : Le jeu vidéo cherche d’abord à garder un critère de performance et d’efficacité ; l’industrie filmographique privilégie la qualité et le réalisme au détriment du temps de calcul.



FIG. 4.2 – Buzz, du film Toy Story par Pixar

- *Motivation matérielle* : La puissance des machines actuelles autorise les infographistes à aller beaucoup plus loin dans le détail, notamment en animation faciale
- *Motivation en interface homme-machine* : Les environnements immersifs sont de plus en plus courants (réalité virtuelle, réalité augmentée), le développement d’une animation faciale convaincante autorise la création de métaphores de communication (un “protocole de communication” entre l’homme et la machine) dans ces environnements immersifs.

4.1.5 Techniques

Il est illusoire de croire à une organisation nette et précise de l'animation faciale. Beaucoup de techniques d'animation faciale en utilisent d'autres partiellement, ou dans un contexte d'utilisation différent. Toutefois, si on parle de techniques *de base*, on peut arriver à une catégorisation sommaire de ces techniques [64]. Cette catégorisation s'appuie surtout sur le support utilisé pendant l'animation. Ainsi, certaines techniques travaillent sur la **géométrie** du visage, d'autres travaillent dans l'espace **image et texture**, d'autres n'animent que certaines **parties du visage** (lèvres, cheveux,...). Enfin, certaines techniques sont dédiées à l'adaptation morphologique qui permet de changer la morphologie du visage, ou encore d'appliquer des modèles de vieillissement au visage.

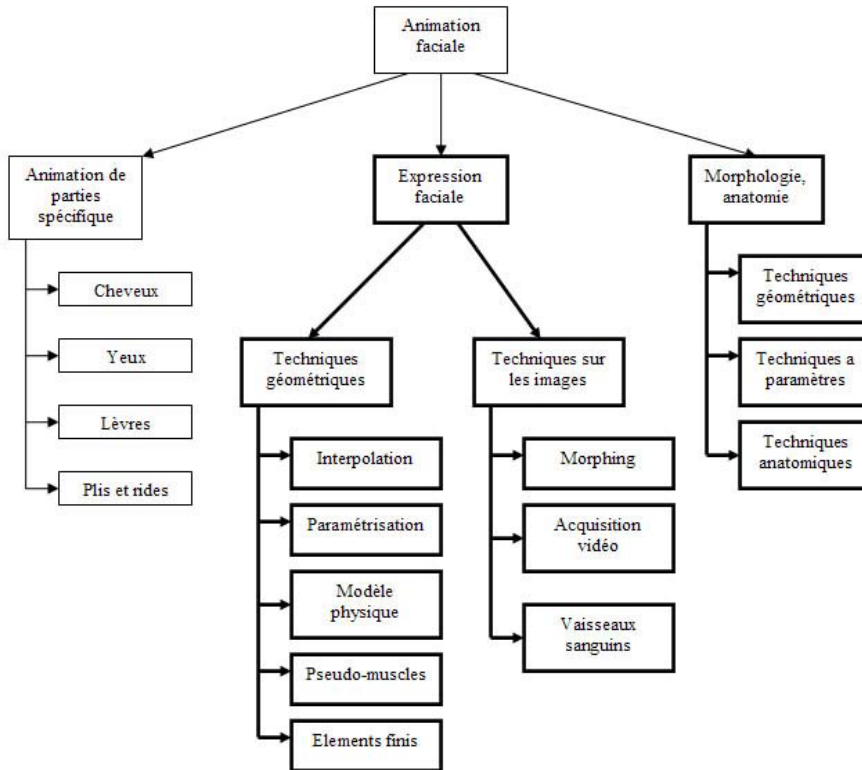


FIG. 4.3 – Organisation des différentes techniques d'animation faciale

Ce schéma a été construit à partir des différences entre les outils mathématiques, physiques et informatiques mis en œuvre. Il est aussi important de souligner que ces techniques ne sont pas mutuellement exclusives, bien au contraire. Elles sont très souvent combinées sur un même visage. Ce chapitre reprend plus en détail les techniques relatives à l'expression faciale et à la morphologie, en essayant dans la mesure du possible, de monter en complexité dans chacune des 3 branches traitées (techniques géométriques, techniques sur les images, morphologie).

4.2 L’expression faciale par la géométrie

4.2.1 Interpolations

4.2.1.1 Problématique

Interpoler consiste à générer, à partir d’états extrêmes, les états intermédiaires d’un système. Les travaux dans ce domaine sont parmi les premières pistes à avoir été explorées, et l’interpolation est maintenant un acquis maîtrisé et largement utilisé dans d’autres techniques. Le choix de la fonction d’interpolation (qui définit les états intermédiaires à partir des états extrêmes) est très important car c’est de lui que dépendra la qualité et les performances du résultat. Plusieurs fonctions ont déjà été utilisées pour l’animation faciale :

- *Interpolation linéaire* : La plus simple, mais aussi la plus courante. Elle est utilisée dans de nombreuses techniques dont certaines très performantes [65].
- *Interpolation sinusoidale* : Waters l’a utilisée avec succès pour les mouvements labiaux [81].
- *Interpolation bilinéaire* : Généralement utilisée dans le cadre du “morphing” (cf. plus loin)[95], [70].

4.2.1.2 Interpolation de paramètres

L’interpolation est très souvent utilisée pour animer des *paramètres* du visage. Dans cette configuration, l’interpolation ne fonctionne pas seule, mais est un moyen de contrôler plus aisément un modèle de visage sous-jacent. Ce modèle sous-jacent peut être de nature diverse : on peut entre autre, animer les paramètres des muscles d’un modèle musculaire [73], ou d’une manière générale tout paramètre continu d’un modèle.

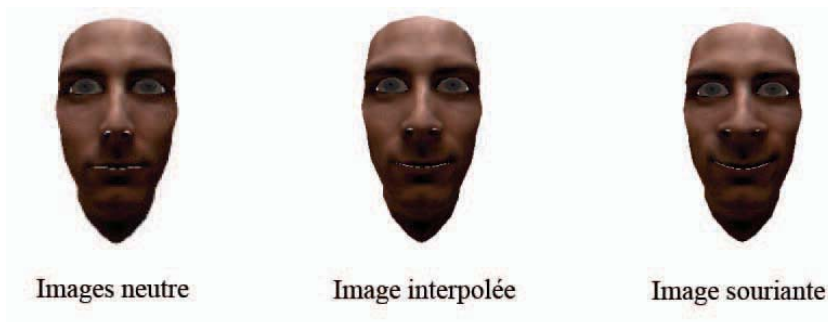


FIG. 4.4 – *Interpolation des paramètres musculaires dans le modèle de Waters [90]*

4.2.1.3 Positions-clés (“keyframing”)

On peut aussi interpoler directement différentes configurations du visage ; la cible de l’interpolation est alors les points du visage. Les positions extrêmes qui servent à cette interpolation sont appelées “keyframes” ou “positions-clés”.

Les positions-clés ont été une des premières approches choisies pour animer le visage, et fonctionnent par interpolation linéaire entre différents maillages [96]. Le principe de cette méthode est le suivant : on dispose d’une base de données de visages (représentant chaque état du visage à un temps donné), obtenue par acquisition 3D ou travail d’artistes. Tous ces visages ont la

propriété d'avoir exactement la même topologie (on connaît une correspondance point à point entre deux visages de la base de données). Grâce à cette correspondance entre points, on peut aisément calculer une interpolation (linéaire par exemple) entre deux visages.

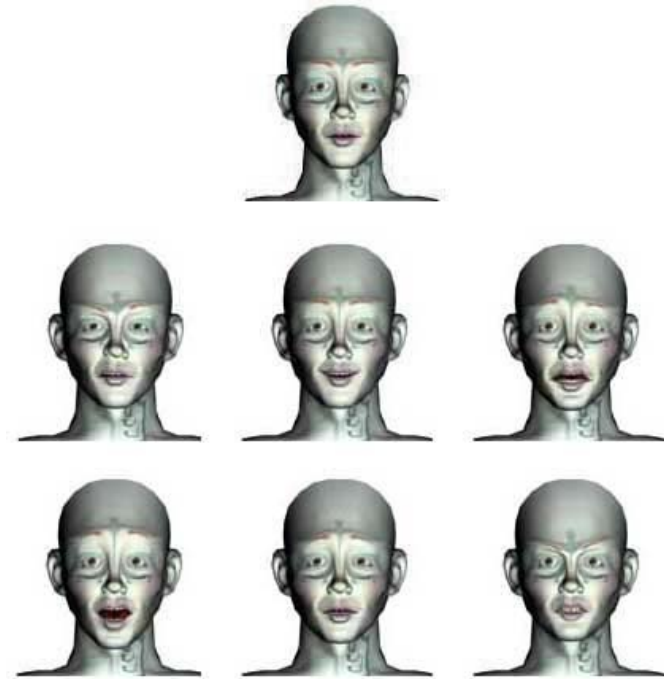


FIG. 4.5 – Maillage de référence et quelques positions-clés pour le personnage de la Banshee du jeu Lochness (c) Galiléa)

Les positions-clé restent encore la méthode la plus utilisée pour précalculer les cinématiques des jeux vidéos ; et ceci parce qu'elle nécessite plus un travail d'artiste que de technique.

4.2.1.4 Formes de mélange (“blend shapes”)

Les *blend shapes* sont très similaires aux positions-clé. À partir d'un modèle de référence, on définit des cas limites du visage (représentant celui-ci exprimant une émotion ou un visème). On obtient l'animation faciale en définissant des poids (variables au cours du temps) à chacune des *blend shapes* et en les interpolant. Afin de réduire le nombre de formes nécessaires pour obtenir un visage avec une gamme d'émotions et d'expressivité suffisamment riche, des systèmes de *blend shapes* par région ont été proposés. cela consiste à utiliser un ensemble de système de *blend shapes* local, c'est à dire qui ne travaille (et donc n'est défini) que sur une partie du visage [87].

Joshi [39] a encore simplifié le travail des artistes en posant une méthode capable d'extraire automatiquement, à partir d'un ensemble de *blend-shapes* classique, un système de *blend-shapes* par région. L'artiste peut alors travailler sur les cas limites d'une région, qui sont de taille réduite.

4.2.1.5 Avantages et Limitations

L'utilisation de positions-clés est :

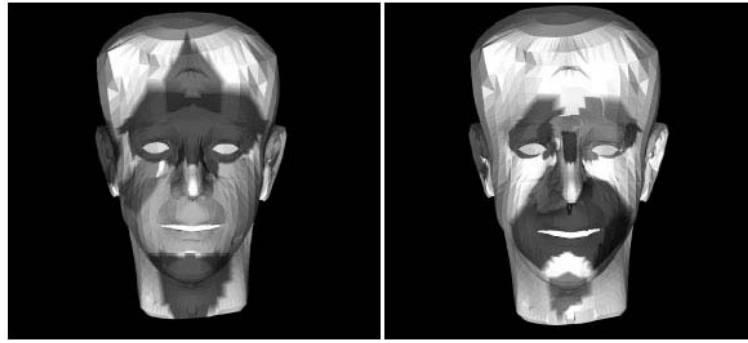


FIG. 4.6 – Régions générées automatiquement à 2 niveaux de précisions différents

- Rapide, surtout si l’interpolation choisie est linéaire
- Simple et facilement combinable à d’autres méthodes

En revanche, la technique des positions-clés (et d’interpolation en général) présente de nombreux inconvénients :

- Les données de base sont volumineuses et potentiellement fastidieuses à mettre en place (le travail est toutefois simplifié avec les travaux de Joshi [39]).
- Les degrés de liberté des mouvements sont limités par le nombre de positions-clés disponibles ; ainsi les visages ne sont pas assez flexibles pour exprimer une grande gamme d’émotions.
- Les positions-clés obtenues pour un visage sont difficilement adaptables à un autre, et il faut recréer la base de données de visages pour chaque modèle.
- Le résultat obtenu peut devenir incohérent quand on interpole entre plusieurs positions avec des valeurs importantes.

En résumé, l’interpolation est la méthode d’animation faciale la plus ancienne, mais c’est aussi un outils bien maîtrisé et indispensable dans la plupart des techniques d’animation faciale plus récentes, et en particulier dans les paramétrisations.

4.2.2 Simulations physiques de muscles

4.2.2.1 Problématique

Les visages sont animés par les muscles. Il semble donc naturel, pour un modèle de visage, de chercher à lui appliquer un modèle de muscles. De plus, un modèle de description musculaire détaché de la représentation du visage permet d’être indépendant de la morphologie. Les techniques que nous allons voir maintenant cherchent à modéliser mathématiquement le comportement de la peau, de la chair et des os.

Une approche naturelle serait de simplement simuler le fonctionnement d’un muscle réel [90, 92, 69]. Mais on se heurte à la complexité de l’anatomie humaine : celle-ci est tellement compliquée, que l’on ne possède pas toutes les informations sur son fonctionnement... A fortiori, on ne peut pas simuler un comportement que l’on ne connaît pas (et de toute façon la complexité serait telle que cette simulation ne serait pas viable dans le cadre d’un modèle destiné au temps-réel). En effet, les muscles réels possèdent de nombreux degrés de liberté, et leur simulation passe par une prise en compte des interactions des muscles avec les os (et notamment la mâchoire lorsque celle-ci bouge), avec la peau, les différents tissus, et surtout avec les autres muscles. La

modélisation physique d'un muscle fait donc intervenir les propriétés visco-élastiques des tissus du visage, et demande de nombreux calculs.

En plus de la complexité inhérente à un seul muscle, environ trente muscles sont impliqués dans les expressions du visage (contrôle des mouvements des yeux, de la face et de la bouche). Ces muscles trouvent leur origine au niveau des os du squelette de la face et se fixent sur les tissus mous de la peau du visage tels que paupières, nez, joues et lèvres. Au total, dix-sept muscles entrent en jeu dans le sourire. Paramétrer un sourire par la configuration d'autant de muscles est loin d'être optimale. Nous allons donc voir différentes manières de représenter et d'animer cette complexité.

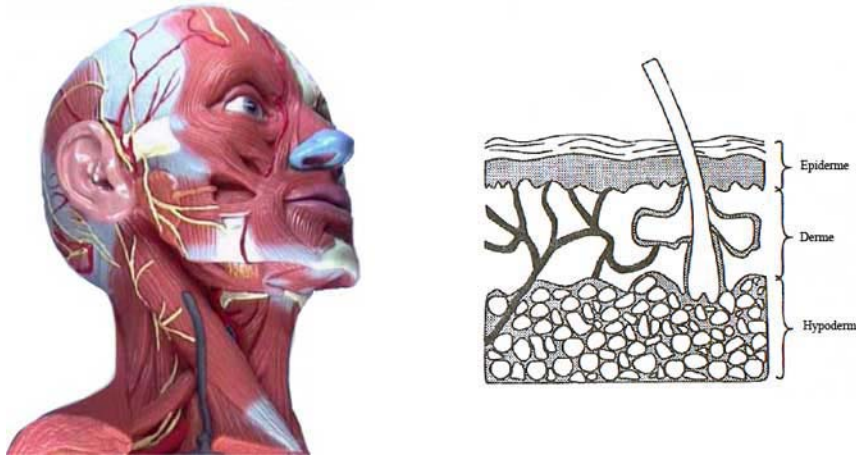


FIG. 4.7 – Principaux muscles impliqués dans les expressions du visage (à gauche) et structure de la peau (à droite)

4.2.2.2 Modélisation des muscles par un système masse-ressort

On représente la peau par un réseau de masses-ressorts (on utilise des ressorts élastiques). L'effet d'un muscle consiste en une perturbation de ce réseau qui doit alors trouver une position d'équilibre. Par exemple, les travaux de Platt et Badler [92, 91] utilisent une modélisation élastique de 38 muscles.

On obtient de très bons résultats visuels, mais pour un coût de calcul assez conséquent.

4.2.2.3 Modélisation des muscles par un champ vectoriel

On représente la peau par un maillage classique. L'effet d'un muscle est traduit par l'application d'un champ de vecteurs sur une zone donnée du visage (effet local des muscles) que l'on appelle zone d'influence [56]. La zone d'influence et la description mathématique du champ de vecteurs dépend du type de muscle que l'on veut modéliser. Waters [90] utilise deux types de muscles : un muscle linéaire (dont la zone d'effet est un cône) est le sphincter (dont la zone d'effet est une ellipse). Les muscles linéaires en particulier permettent de simuler la contraction et l'étirement [50]. Cette contraction se caractérise par un mouvement de la peau vers le point d'attachement du muscle au squelette. Pour chaque point de la peau (i.e. du maillage), on obtient donc un vecteur de déplacement qu'il suffit de pondérer par la valeur de contraction du muscle

pour obtenir son effet. Bien entendu, la zone est définie par un cône le long du muscle centré sur le point d'attachement du muscle au squelette et s'ouvrant du côté de la peau. De plus, on définit des distances au point d'attachement minimale et maximale. Finalement, un muscle est paramétré par :

- Son point d'attachement au squelette (sa "tête")
- Son point d'attachement à la peau (sa "queue")
- L'angle d'ouverture de son cône
- Sa distance minimale d'effet
- Sa distance maximale d'effet
- Sa valeur de contraction

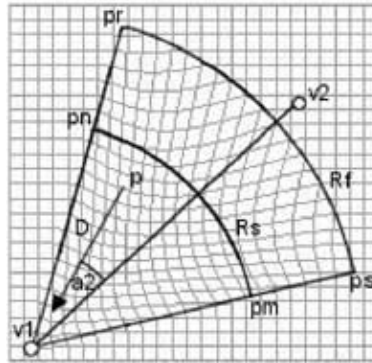


FIG. 4.8 – Exemple : zone de contraction d'un muscle linéaire

Seul la valeur de contraction évolue au cours du temps, un muscle se limite donc à un seul paramètre dynamique. Au final, ce modèle de muscle est rapide, indépendant du choix de représentation du visage, mais doit toutefois être adapté lors d'un changement de topologie. Bien que des techniques existent pour faire cette adaptation morphologique (cf. 4.), ce travail est *a priori* manuel et laborieux.

4.2.2.4 Réseaux de ressorts, modèle en couches

Le but de ces techniques est de modéliser précisément les propriétés plastiques, visqueuses et élastiques de la peau. La surface du visage est alors représentée par 3 couches de maillage élastique, connectées entre elles par des ressorts transversaux. Ces couches sont :

- L'épiderme
- Le derme
- L'ossature

L'épiderme et le derme sont séparés (et connectés) par une couche graisseuse (matérialisée par une première série de ressort transverses). Le derme et l'ossature sont séparés par la couche musculaire. Les ressorts reliant ces deux couches définissent donc directement les muscles du visage ; et l'effet des muscles est ainsi propagé de couche en couche jusqu'à la peau. Bien que la qualité visuelle soit très bonne, le temps de résolution du modèle est lent (simulation de déformation volumique). Une solution partielle a été proposée par Wu [79] en limitant la résolution de problème à un maillage très simplifié, tout en conservant une bonne qualité d'image. Lee [75] a quant à lui cherché à pousser le réalisme à l'extrême en affinant la structure en couche : une couche de tissu biologique subissant des déformations non linéaires (cette couche est elle-même

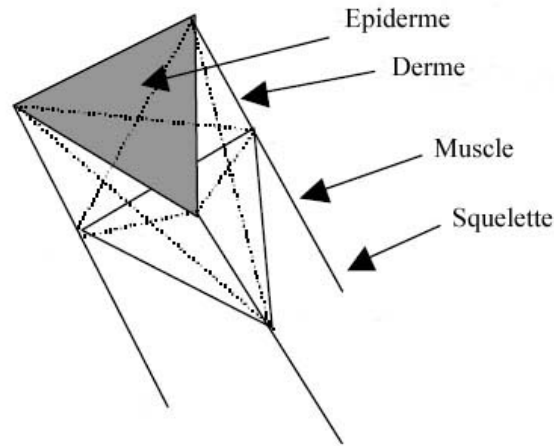


FIG. 4.9 – Element de maillage d'un modèle physique à 3 couches : chaque arête est un ressort, chaque sommet est une masse

subdivisée en 2 couches, l'épiderme et le fascia); sous cette couche de tissu, une couche musculaire est à l'origine de l'animation; et finalement une structure osseuse indéformable sert de support aux autres couches.

Cette méthode, encore plus lente que la précédente, donne des résultats exceptionnels. L'intervention humaine est toutefois toujours nécessaire dans le processus d'animation.

4.2.2.5 Avantages et Limitations

La simulation physique de muscles pour l'animation faciale a le mérite de donner de bons résultats.

Mais elles sont en général trop coûteuses (en terme de temps de calcul). On préfère souvent à cette simulation physique des modèles heuristiques beaucoup plus rapides : les pseudo-muscles.

4.2.3 Pseudo-muscles

4.2.3.1 Problématique

L'idée des pseudo-muscles est d'éviter la complexité qui est inhérente à la modélisation physique du visage, tout en conservant une paramétrisation musculaire. Un pseudo-muscle représente donc une transformation locale du visage qui essaie de mimer l'effet d'un muscle réel ou d'un groupe de muscles réels [88]. Une modélisation par pseudo-muscles n'est pas tenue de respecter les mécanismes internes aux visages. Cette approche heuristique offre une grande liberté quant au modèle de pseudo-muscle choisi. On peut trouver ainsi :

- Des modèles de pseudo-muscles filaires : Le fonctionnement est identique aux muscles linéaires de Waters [90] sans être obligé de respecter la position des muscles réels.
- Des modèles basés sur la déformation de formes libres [83] (Free Form Deformation, FFD)
- Des modèles où les pseudo-muscles sont représentés par des splines [89, 78].

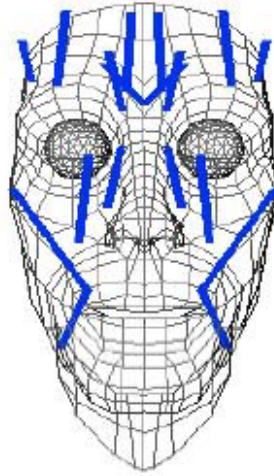


FIG. 4.10 – Disposition des muscles dans le modèle de Waters

4.2.3.2 Modélisation de pseudo-muscles par des déformations de formes libres

Les déformations de formes libres sont une technique générale d'animation qui consiste à définir une boîte autour de l'objet à déformer. Le déplacement des points de contrôle de cette boîte modifie en conséquence la forme de l'objet. Différentes déclinaisons sont définies à partir des FFD :

- Extended FFD (EFFD) : Les points de contrôle ne sont plus sur une boîte mais sur un cylindre, ce qui donne un résultat plus lisse [84].
- Rational FFD (RFFD) : Les points de contrôle sont dotés d'un poids qui commande l'intensité de la déformation de l'objet.

La simulation d'un pseudo-muscle grâce à une RFFD se décompose comme suit [83] :

1. On définit la zone du visage qui sera affectée par le pseudo-muscle.
2. On crée et on positionne le parallélépipède de contrôle pour cette région.
3. On modifie à la fois la position et le poids des points de contrôle du parallélépipède. La zone du visage est déformée en conséquence.
4. Les points situés à la frontière de deux zones affectées par deux pseudo-muscles différents sont ajustés par interpolation linéaire des deux effets.

En référence aux FACS d'Ekman, Thalmann [88] a défini un ensemble de pseudo-muscles par des RFFD. Chacun de ces pseudo-muscles est appelé *Abstract Muscle Action* (AMA), et travaille sur une région spécifique du visage. Il est à noter que l'ordre d'application des AMA est importante car il y a un système de dépendance entre AMA.

Un modèle par pseudo-muscles de ce genre permet un contrôle intuitif du visage. Toutefois, il souffre de quelques défauts :

- Le processus est assez lent, il faut définir un nombre assez conséquent de pseudo-muscles pour avoir un contrôle fin du visage.
- Le comportement d'un muscle réel n'est pas précisément simulé. De plus, certains comportements sont impossibles à réaliser avec des FFD (rides, cicatrices, boutons,...)

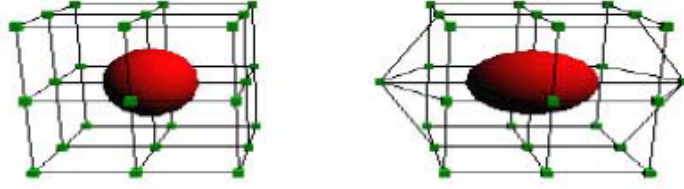


FIG. 4.11 – Déformation de forme libre. Les déformations de la boîte de contrôle sont répercutées sur l'objet.

- La déformation est surfacique et ne prend pas en compte les changements de volume (contrairement aux modèles physiques).

4.2.3.3 Modélisation de pseudo-muscles par des splines

Les maillages polygonaux ne sont pas parfaits :

- La courbure du visage est approximée et parfois erronée.
- La déformation d'un maillage polygonal donne parfois des résultats chaotiques.
- Pour obtenir des surfaces lisses, il faut obligatoirement subdiviser le maillage.

Pour palier ces défauts, on modélise le visage par un ensemble d'éléments de surface (patch) de continuité C^2 contrôlables grâce à quelques points. Pour un temps de calcul intéressant, on obtient une surface lisse et déformable localement. La courbe utilisée peut être de différentes nature : bicubique de Catmull-Rom [94], différentes variantes de Catmull-Clark [60] (utilisées par Pixar dans *Geri's Game* entre autre), ou encore des B-splines triangulaires [61]. Le problème majeur de ce modèle est qu'il est impossible de modifier la surface à un niveau de détail plus petit que celui de la taille des patches. Pour résoudre ceci, des modèles hiérarchiques ont été proposés [78].

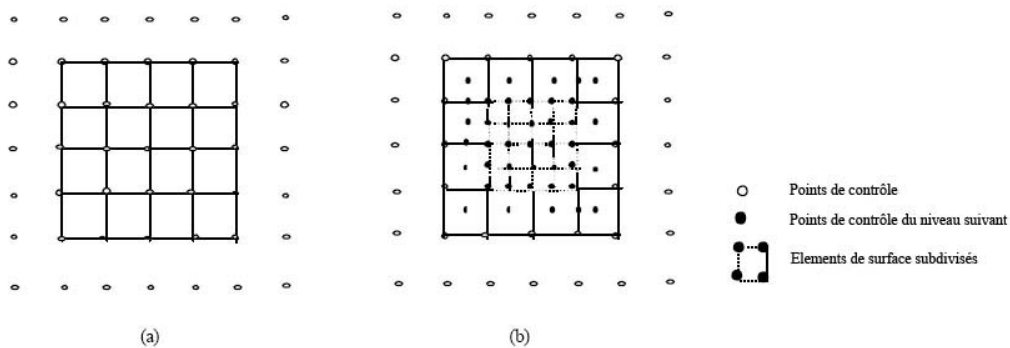


FIG. 4.12 – Modèle hiérarchique : (a) Niveau grossier, (b) Le patch central a été subdivisé

4.2.3.4 Avantages et Limitations

Les modèles pseudo-musculaires sont plus rapides que la simulation physique de muscles réels et essaient d'en mimer les effets. Toutefois, un pseudo-muscle n'est qu'une approximation d'un muscle réel. Quelque soit le modèle de pseudo-muscle choisi, il n'a pas la richesse, en terme de possibilités d'animation, des muscles réels. On se retrouve alors face à des configurations non réalisables à moins de compléter le modèle de visage par d'autres techniques (par exemple : l'articulation de la mâchoire).

4.2.4 Méthode des éléments finis

La méthode aux éléments finis (Finite Element method, FEM), est une approche numérique pour approximer un système physique de complexité arbitraire. Le volume à simuler est découpé en éléments de volume, chaque élément possède ses propres propriétés physiques. La résolution du système consiste à intégrer le comportement de ces éléments sur le volume tout entier.

Une modélisation aux éléments finis donne de bons résultats visuels. Mais cette résolution étant longue, on trouve des modèles aux éléments finis surtout pour des parties critiques du visages, en particulier la lèvre [58].

4.3 L'expression faciale par les images

4.3.1 Métamorphose (morphing)

4.3.1.1 Problématique

Les techniques de morphing sont nées de la volonté de pouvoir animer et déformer des objets tout en restant dans le cadre de la 2D. Les premières techniques de morphing ne travaillent donc que sur des images. Puis des modèles visant à palier le manque d'information 3D sont nés : le "view morphing", qui ajoute à la technique de base des informations de points de vue (matrice de projection), et le morphing 3D, qui combine un maillage géométrique 3D et une technique de morphing 2D.

4.3.1.2 Métamorphose d'images (Morphing 2D)

Le morphing d'images [82] (ou plus simplement morphing, ou encore métamorphose), est une technique très populaire pour générer des animations entre 2 images. Il y a de nombreuses variantes au morphing, mais toutes sont basées sur un principe de base : l'interpolation de la position et de la couleur des points des images. le morphing fonctionne comme suit. Etant données deux images I_0 et I_1 , on définit 2 applications $C_{0 \rightarrow 1}$ et $C_{1 \rightarrow 0}$ qui permettent respectivement de passer d'un point de I_0 à un point de I_1 , et de passer d'un point de I_1 à un point de I_0 . Deux applications sont nécessaires car il n'y a pas forcément de correspondance point à point entre les deux images. Ces deux applications sont définies à partir de points (ou de courbes) d'intérêts qui sont mis en correspondance entre les deux images. On peut de plus enrichir la connaissance de l'image en définissant des "zones actives" sur une image [65], ce qui permet de faire du morphing localisé en ne tenant compte que de certaines parties des images. Les images intermédiaires s'obtiennent alors en calculant une interpolation de la position et la couleur des points qui sont en correspondance par $C_{0 \rightarrow 1}$ et $C_{1 \rightarrow 0}$.

Le morphing 2D donne

- De bons résultats visuels (puisque l'on profite de la qualité visuelle des images d'entrée)
- A faible temps de calcul

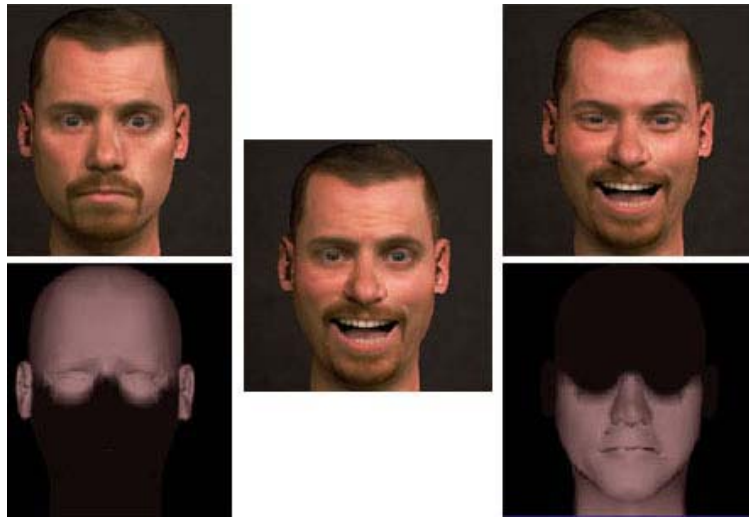


FIG. 4.13 – Morphing localisé selon Pighin : à droite et à gauche, les images sources avec leurs zones actives.

En revanche, il souffre de plusieurs problèmes :

- La mise en correspondance des points d'intérêts doit être fait manuellement pour chaque images-clef
- Il ne prend pas en compte les changements de points de vue.
- Une simple interpolation de position et couleur peut donner des résultats irréalistes.

4.3.1.3 “View Morphing”

Pour résoudre ce problème de changement de point de vue, Seitz a introduite en 1996 le “View morphing” [72]. Cela consiste en rajouter une étape de déformation des images avant le morphing proprement dit, et une étape de recomposition après le morphing. Ces deux étapes supplémentaires ont pour but de corriger les déformations dues à la perspectives et ainsi améliorer la qualité du morphing lorsque les 2 images n'ont pas le même point de vue.



FIG. 4.14 – Exemple de View morphing : au centre, l'image générée à partir des 2 autres.

En plus de connaître les 2 images et les 2 applications pour passer de l'une à l'autre, on se donne la connaissance de la matrice de projection pour chacune des images H_0 et H_1 . Toutefois, on ne possède aucune information de 3D sur les points de l'image. On calcule alors les images intermédiaires en 3 étapes :

- *Préparation* : On applique à I_i la transformation projective H_i^{-1} . Les deux images obtenues \bar{I}_0 et \bar{I}_1 possèdent alors les mêmes propriétés projectives.
- *Morphing* : On applique le morphing classique à ces nouvelles images pour obtenir une nouvelle image \bar{I}_m .
- *Projection* : On applique à \bar{I}_m une transformation projective H_m pour obtenir notre image finale I_m . La transformation projective H_m est la transformation qui interpole les points de vue définis par H_0 et H_1 .

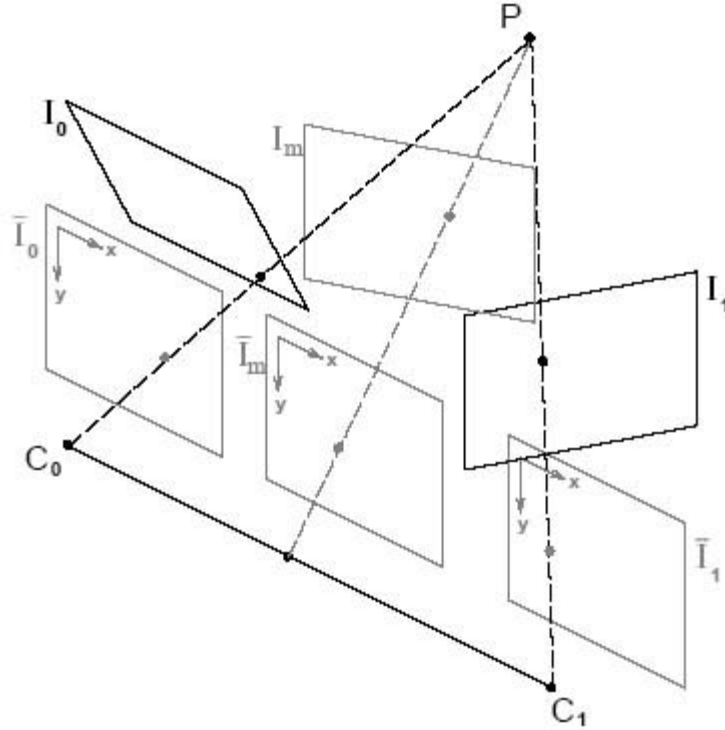


FIG. 4.15 – View morphing : transformation des repères quand les images ont des points de vue différents.

Cette méthode résout en partie le problème du point de vue ; en partie seulement, car elle ne permet pas d'avoir un point de vue complètement libre comme on peut l'avoir avec une méthode en 3 dimensions.

4.3.1.4 Métamorphose 3D

Le morphing 3D [65] est une extension du morphing 2D qui a pour objectif de se débarrasser de la contrainte de point de vue imposé, inhérente au morphing 2D. Pour ce faire, on compose deux méthodes :

- Une interpolation géométrique 3D, ce qui permet d'obtenir tous les points de vue possibles.
- Un morphing 2D qui s'applique aux textures des modèles géométriques.

Cette méthode donne de bons résultats pour un temps de calcul relativement faible. Toutefois elle nécessite une phase de préparation importante :

- Il faut obtenir le modèle géométrique et sa texture, généralement en filmant un visage avec plusieurs caméras, et ensuite corriger les textures pour éliminer des potentiels problèmes d'éclairages.
- Il faut définir les points d'intérêts sur ces textures (comme pour le morphing 2D), bien que des techniques semi-automatiques existent pour faciliter cette tâche [65].

4.3.1.5 Morphing spécifique à l'animation faciale

Pour le morphing appliqué à l'animation faciale, on peut noter que :

- Il n'y a pas (ou très peu) de zones cachées sur les différentes images du morphing. C'est à dire qu'entre deux images, on aura très peu de nouveaux pixels sur l'image.
- L'ensemble des images de base servant au morphing est réduit (quelques dizaines au maximum).

A partir de ces observations, des méthodes de morphing spécifiques ont été développées :

- On peut calculer les images intermédiaires grâce à une méthode de flot optique [62]. C'est une méthode qui consiste à calculer, pour chaque point de l'image, sa nouvelle position dans une autre image. On obtient ainsi un tableau de vecteurs correspondant aux déplacements de chaque point. Très utilisée en vision par ordinateur pour le suivi d'objet, cette méthode reste coûteuse en terme de temps de calcul. Cette méthode est efficace et des applications l'utilisant existent [51].
- On peut aussi, à partir d'une technique de morphing classique, précalculer le résultat de morphing entre deux images sous forme de champ de vecteurs de déplacement [37]. Ceci est possible car le nombre d'image est limité, et donc celui de combinaisons l'est aussi. De plus comme il y a très peu de zones cachées, on peut faire une correspondance point à point entre les images et ainsi stocker ces précalculs dans des tableaux de vecteurs de déplacement. La quantité de données (et de calculs) peut encore être divisée par 2 en prenant en compte la symétrie du visage. En revanche, il est nécessaire de rajouter, après le morphing, une phase de correction pour combler les trous qui peuvent rester.

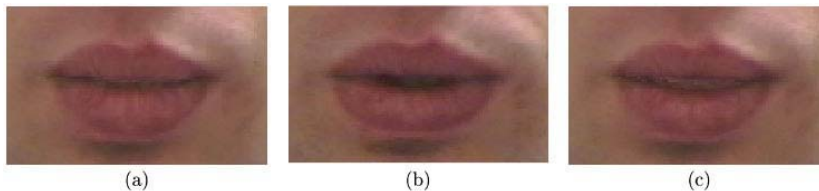


FIG. 4.16 – Exemple avec la méthode de Buttfield : (a) Image obtenue par sa méthode, (b) Image filmée, (c) Image obtenue par morphing classique.

- Finalement, des systèmes interactifs permettant de définir les points d'intérêts facilement existent. Zhao [42] propose un système interactif multirésolution qui permet d'éditer indifféremment l'aspect global ou les aspects locaux du morphing. L'outil développé par Zhao en déduit les paramètres de morphing à utiliser. Pour ce faire, il utilise une approche par *composants*. Un composant représente une partie de l'objet (du visage), sans forcément

de sémantique associée, et se compose d'un ensemble de composants ou de triangles. On obtient donc une hiérarchie : le morphing au niveau global traite alors comme objet de base les composants de plus haut niveau, et le morphing au niveau du détail traite les composants de niveau inférieur.

4.3.1.6 Avantages et Limitations

Le morphing est une technique rapide ayant l'avantage de produire des images de qualité similaires à celle des images données en entrée. En revanche, il y a deux limitations au morphing :

- L'intervention humaine est nécessaire pour définir les points d'intérêts entre les deux images.
- Il peut y avoir des artefacts (des zones de l'image non calculées) qu'il faut traiter après coup.

4.4 Techniques liées à la morphologie

4.4.1 Mise en correspondance géométrique

4.4.1.1 Problématique

L'expression faciale se traduit sur un visage par un champ de vecteurs, spécifique au visage. Le problème est donc de trouver un moyen d'adapter ce champ de vecteurs à un autre visage possédant une morphologie différente, voire très différente (dans le cas d'animation d'animaux, de monstres, ou de toutes créatures pouvant montrer une expression faciale). On cherche de plus à avoir un procédé le plus automatique possible et ne nécessitant le moins d'informations possibles (autre que les visages eux-même).

4.4.1.2 Clonage d'expression

Pour parvenir à ce transfert de mouvement, Noh [53] n'a besoin que de très peu d'informations : aucune connaissance sur les visages source et cible n'est prérequis : ni la topologie, ni la connectivité entre les points, ni d'informations anatomiques. Toutefois, il a besoin d'avoir un certain nombre de paires de points correspondants entre les 2 visages. Ces points n'ont aucune signification sémantique.

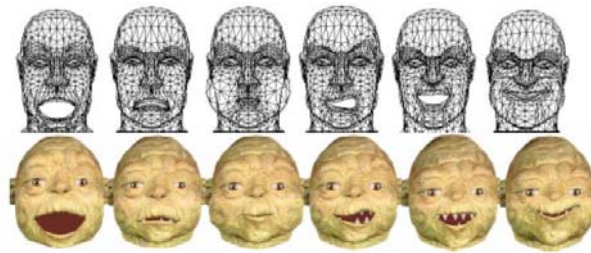


FIG. 4.17 – Exemple de transfert de mouvement avec la méthode de Noh

L'algorithme se déroule en 2 phases :

- La première étape consiste à mettre les 2 modèles en correspondance. C'est à ce niveau que les paires de points interviennent. Le nombre de ces paires est réduit au maximum, et il suffit de moins d'une dizaine de paire pour parvenir à cette mise en correspondance.

Celle-ci se fait d'abord grâce à des fonctions à base radiale (Radial Basis Function, RBF [49]) pour interpoler la position des points. Une projection cylindrique des nouveaux points sur la surface du visage cible permet d'achever la mise en correspondance.

- La seconde étape adapte le champ de vecteur du visage source au visage cible. L'amplitude et la direction de ces vecteurs sont modifiées de manière à respecter la forme locale du nouveau visage. La direction de chaque vecteur est modifiée de manière à ce que le vecteur conserve son orientation dans un repère local défini par la normale et la tangente à la surface du visage. L'amplitude de chaque vecteur est modifiée de manière à respecter les différences de taille entre les deux visages.

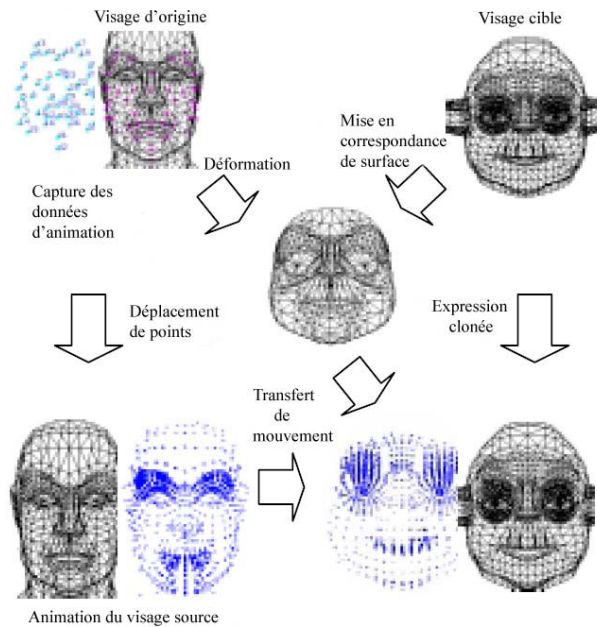


FIG. 4.18 – Le clonage d'expression selon Noh

4.4.1.3 Avantages et Limitations

Le transfert d'expression en mettant en correspondance la géométrie est :

- Rapide, une fois que le précalcul des RBF est effectué.
- Automatique, ou presque : il suffit de définir quelques paires de points en correspondance pour que le modèle fonctionne.

En revanche, il y a quelques défauts :

- Le modèle se comporte assez mal au niveau des yeux et des lèvres.
- L'expression est copiée telle qu'elle. On ne peut pas modifier ou amplifier l'expression faciale du visage source.
- La mise en correspondance devient difficile si les deux visages sont très différents

4.4.2 Extraction et resynthèse de paramètres

4.4.2.1 Problématique

Le principal problème de la mise en correspondance géométrique seule est que celle-ci ne fonctionne pas si les deux visages ont des morphologies très différentes. Pour palier à ce problème, on peut utiliser un modèle paramétrique intermédiaire. En extrayant du visage source les paramètres de ce modèle et en resynthétisant l'expression faciale sur le visage cible à partir de ces paramètres, on s'affranchit des différences morphologiques.

4.4.2.2 Extraction et synthèse à partir de modèles-clef

Pyun [41] a récemment proposé d'utiliser un modèle de positions-clef pour paramétrer les visages source et cible. Sa méthode se décompose en 3 phases. Les deux premières ne sont appliquées qu'une fois.

1. Construction des positions-clef. Ces positions-clef représente l'expression extrême d'un ensemble d'émotions suffisamment large et générique pour couvrir toute expression faciale (typiquement, les 6 émotions interculturelles identifiées par Ekman). Les positions-clef sont définies pour le visage source et le visage cible, mais celles du visage cible sont laissées à l'imagination de l'artiste : elles n'ont pas d'incidence sur le processus. En revanche les positions-clef du visage source doivent être soigneusement définies pour que le visage puisse être efficacement analysé.
2. La préparation de l'analyse. Un ensemble de points est choisi aléatoirement (ou à la charge de l'utilisateur) sur le visage source de référence. les points correspondants sur chaque position-clefs donnent un ensemble de vecteurs de déplacement. Grâce à une analyse en composantes principales de cet ensemble de points, Pyun définit une application de l'ensemble des vecteurs de déplacement des points choisis vers les paramètres d'interpolation de l'ensemble des positions-clef. l'analyse de paramètres se fait donc simplement en utilisant cette fonction
3. L'animation du visage. A chaque nouvelle image source, les points choisis à l'étape 2 sont identifiés, et les déplacements par rapport à la position de ces points sur le visage de référence sont mesurés. L'application précédente fournit alors les paramètres du modèle à position-clef qui sont reproduit sur le visage cible.

4.4.2.3 Avantages et Limitations

Cette méthode est très rapide, car la plupart des calculs ne sont effectués qu'une seule fois. De plus, l'artiste possède une grande liberté quant à la définition des positions-clef de la cible. En revanche, elle souffre de 2 problèmes inhérents au choix du modèle à positions-clef :

- D'une part, l'artiste doit définir les positions-clef du visage source manuellement et soigneusement.
- D'autre part, si le choix des positions-clef n'est pas adapté ou complet, l'analyse des paramètres peut faillir. Pour résoudre ce problème, on pourrait utiliser la méthode à Bregler [43] qui consiste à extraire les différentes positions-clef directement de l'animation du visage source.

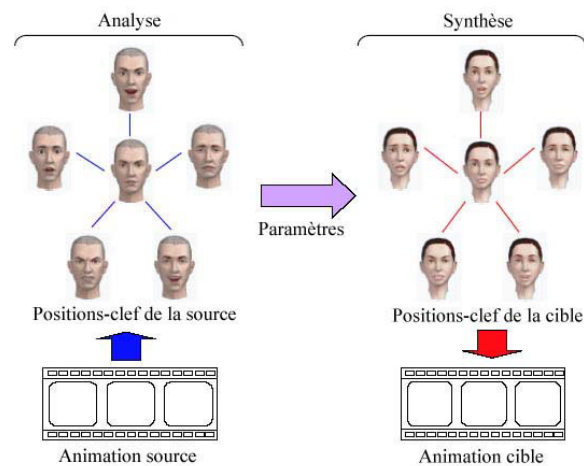


FIG. 4.19 – Analyse et synthèse de positions-cléf pour la copie d’expression

4.4.3 Marquage anatomique

4.4.3.1 Problématique

Le but du marquage anatomique est d’améliorer la mise en correspondance des visages grâce à la connaissance de marqueurs anthropométriques placés sur la peau ou le squelette. L’avantage de ces marqueurs par rapport à des méthodes purement géométrique est qu’ils permettent une connaissance biologique du visage, et autorisent donc entre autre les déformations morphologiques et le vieillissement du visage. Les marqueurs permettent de plus de catégoriser les visages et de leurs attribuer des caractéristiques [59].

4.4.3.2 Marquage adapté à un modèle d’animation musculaire

Kähler [47, 40] utilise un modèle composé de 6 éléments :

- Un maillage triangulaire de la peau, avec une subdivision adaptée à la courbure et surtout à la *déformabilité* du visage. La déformabilité est la capacité à être fortement déformé au cours de l’animation faciale.
- Un système musculaire de contrôle d’animation composé de 24 muscles linéaires et radiaux (cf. modèle musculaire de Waters).
- Un maillage triangulaire du squelette rigide avec une mâchoire articulée.
- Un système masse-ressort reliant la peau, le squelette, et les muscles.
- Des modèles séparés pour les yeux, les dents et la langue.
- Des marqueurs de 2 natures : 60 marqueurs sur la peau, et 22 marqueurs sur le crâne.

La position des marqueurs sur les différents visages permet de passer de l’un à l’autre en 3 étapes :

1. En utilisant des fonctions à base radiale et les marqueurs sur la peau, on met en correspondance la peau des deux visages.
2. En utilisant les marqueurs sur le squelette et en mesurant les épaisseurs de peau sur les deux visages, on met en correspondance le squelette des deux visages.

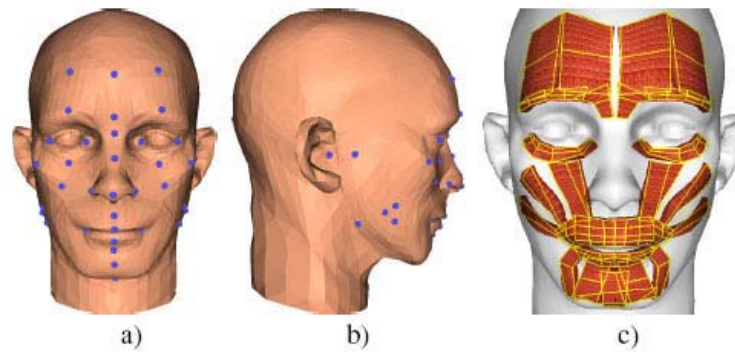


FIG. 4.20 – a) et b) position de quelques marqueurs, c) modèle musculaire attaché aux squelette et à la peau

3. Connaissant la position de la peau et du squelette, et comme le modèle musculaire est fixé sur eux, on peut mettre en correspondance les muscles, et donc toute l'animation faciale qui en dépend.

4.4.3.3 Avantages et Limitations

Les modèles anatomiques offrent des possibilités d'animation faciale qui vont au-delà de l'expression faciale (vieillesse par exemple). En revanche, le calcul de la mise en correspondance avec des marqueurs est assez coûteuse, mais non critique puisqu'il n'est effectué qu'une seule fois. Bien qu'une méthode de positionnement semi-automatique des marqueurs soit proposée par Kähler [47], l'intervention de l'artiste est encore nécessaire.

4.5 Perspectives

L'animation faciale est un des plus vieux domaines de l'infographie. C'est aussi un des moins évidents ; c'est pourquoi il y a tant de pistes différentes qui ont été essayées, du dessin d'artiste à la synthèse d'images. Elles ont été détaillées ici en fonction d'une part de leur support (géométrie ou image), d'autre part de leur approche. La plupart des techniques récentes ne se limitent pas à une de ces pistes, mais sont des agencements de plusieurs d'entre elles.

Mais l'animation faciale est en fait encore plus vaste : au delà des aspects informatiques, mathématiques et physiques, il faut prendre en compte les aspects biologiques et artistiques. La perspective notamment de coupler le travail d'un artiste d'une part (dessinateur, peintre) et le travail d'un scientifique d'autre part, paraît intéressante. On peut par exemple mener une analyse statistique sur une base de visages (vidéo), mais contrainte par des considérations artistiques sur les différentes régions du visage.

Chapitre 5

Les cheveux

Malgré les progrès réalisés ces dernières années en animation de personnages virtuels, la simulation réaliste de longs cheveux reste un problème très difficile à l'heure actuelle. En effet le nombre important de cheveux composant une chevelure (100 000 environ) traduit la forte complexité d'un tel système. De plus, contrairement à l'animation de fourrure ou de cheveux courts qui a pu être réalisée avec succès dans certains films tels que *Stuart Little* [158] ou *Montres et Cie* [163], la simulation de longs cheveux doit, pour être suffisamment réaliste, tenir compte des multiples interactions qui se produisent d'une part entre la chevelure et le corps du personnage, et d'autre part entre les cheveux ; en effet tous les effets naturels visibles dans une chevelure réelle, à savoir son volume, sa cohésion ou au contraire sa séparation en mèches durant le mouvement, etc., sont dûs à la complexité de ces interactions.

Cet état de l'art a pour but de présenter l'ensemble des travaux qui se sont intéressés à l'animation de cheveux

Dans un premier temps, nous présentons les diverses représentations géométriques qui ont été utilisées pour modéliser des cheveux. Ensuite nous passons en revue les différentes techniques d'animation employées, en précisant l'intérêt et l'inconvénient de chacune. Enfin nous montrons comment les méthodes existantes traitent le point essentiel en animation de chevelures, à savoir la gestion de la complexité.

5.1 Représentation géométrique d'une chevelure

5.1.1 Représentation linéique

Bon nombre de chercheurs [161, 169, 172] ont utilisé une représentation linéique de la chevelure, en modélisant chaque cheveu ou chaque mèche par une chaîne 1D reliant des particules ou des segments 1D. Cette modélisation paraît naturelle, mais pour obtenir des chevelures suffisamment volumineuses lors de l'animation, il est impératif de tenir compte des interactions entre les différents éléments. Hadap et Magnenat-Thalmann [165] ont utilisé une représentation de chevelures mixte, en modélisant les grandes échelles à l'aide d'une représentation volumique, et les détails plus fins (cheveux individuels) par des structures linéiques. Cela leur a entre autres évité d'avoir à traiter toutes les interactions cheveux-cheveux, ce qui aurait été trop coûteux.



FIG. 5.1 – Image réelle d’une chevelure en fort mouvement

5.1.2 Représentations surfaciques et volumiques

Koh et Huang [167, 168] et Kim et Neumann [166] ont choisi de représenter la chevelure par un ensemble de bandes 2D de cheveux, chacune de ces bandes étant modélisée par un morceau de surface paramétrique, de type *NURBS*¹.

L’avantage de cette représentation pour l’animation (cf. 5.2) est qu’elle permet d’obtenir des déformations très variées de la chevelure, à un coût moindre. Cependant là encore il est nécessaire de gérer correctement les interactions entre bandes afin de générer une chevelure avec du volume. Afin d’intégrer directement l’effet de volume dans le modèle, Kim et Neumann [166] ont créé artificiellement du volume aux coiffures qu’ils représentent, en ajoutant un *offset* aux surfaces de la chevelure. Cet ajout de volume permet de prendre en considération, de manière simplifiée, les interactions entre cheveux (cf. 5.3). La méthode [170] propose une représentation volumique plus élaborée de la chevelure, en la modélisant par un ensemble de mèches volumiques déformables en interaction.

5.2 Techniques d’animation applicables à l’animation d’une chevelure

Il existe deux grandes techniques d’animation : l’animation par *modèles descriptifs* et l’animation par *modèles générateurs*.

La première technique consiste à donner aux objets que l’on souhaite animer une fonction explicite de son mouvement en fonction du temps. C’est le cas par exemple de l’animation par *positions clefs*, ou encore de la capture de mouvement. La technique d’animation par positions

¹Non Uniform Rational B-Spline

clefs a été largement employée pour animer des chevelures.

A l'opposé, les modèles générateurs fournissent un ensemble de lois (si ces lois sont issues de la physique, on parle alors de *modèles physiques*) auxquelles l'objet est soumis. Cette technique d'animation a l'avantage de permettre la synthèse de mouvements génériques.

Ci-dessous on présente les principales méthodes qui ont été employées pour la dynamique de chevelures : l'animation par positions clefs (modèle descriptif), l'animation de chaînes articulées (modèle pseudo-physique), l'animation de chaînes masses-ressorts (modèle physique), et l'animation de milieu fluide ou continu (modèle physique).

5.2.1 Animation par positions clefs

L'animation par position clefs est la technique d'animation utilisée traditionnellement dans les dessins animés. Elle consiste à stocker l'information pertinente du mouvement à plusieurs instants donnés dans des clefs, et à interpoler le mouvement entre les clefs.

Les méthodes basées sur la représentation de la chevelure à l'aide de surfaces paramétriques [167, 166] sont bien adaptées à cette technique, car la déformation d'un morceau de surface est simplement lié au déplacement des points contrôlant cette surface. L'animateur souhaitant animer une chevelure de cette façon peut donc construire une série de positions clefs $K_{i \in [0..n]}$, en choisissant pour chacune de ces positions K_{i_0} l'emplacement de l'ensemble des points de contrôle $C_{i_0, p \in [0..m]}$ de la chevelure. L'interpolation entre les différentes positions clefs est ensuite gérée par le système de manière très simple, puisque cela revient à utiliser une fonction interpolant dans le temps chaque suite $S_i^{p_0}$ de points de contrôle $C_{i \in [0..n], p_0}$.

L'inconvénient d'une telle approche, est que les résultats qu'elle produit ne sont valables que pour le mouvement spécifiquement représenté, contrairement aux modèles générateurs.

5.2.2 Animation de chaînes articulées

Un certain nombre de chercheurs [161, 169] ont choisi d'utiliser la méthode initialement proposée par Anjyo *et al.* en 1992, qui consiste à représenter chaque cheveu par une *chaîne de segments rigides articulés*. Cette méthode sert à la fois à obtenir la position initiale des cheveux (modélisation de coiffure), et à les animer. Dans le cas de la représentation des cheveux par des chaînes articulées [156], la position et l'orientation de chaque segment peuvent être calculées en cascade, des racines jusqu'aux pointes, en utilisant des équations analytiques unidimensionnelles prenant en compte la gravité. L'inconvénient majeur de cette méthode, comme l'illustre la figure 5.2 est que la réponse à la collision d'un cheveu avec le corps a une incidence uniquement sur le segment en collision (et sur les segments suivants), mais n'est pas propagée au niveau des segments proches de la tête, puisque la modification de position et d'orientation des segments ne se fait que dans un sens (racines vers les pointes). Cette méthode est donc satisfaisante dans le cas où la chevelure considérée est courte, mais elle ne marcherait pas pour une chevelure longue atteignant les épaules : comme le montre la figure 5.2, la réponse à une telle collision ne serait pas du tout naturelle.

En 2001, Lee et Ko [169], ont étendu la méthode et proposé de résoudre le problème en ajoutant artificiellement des forces de synthèse aux segments se trouvant à proximité du segment en collision (cf. fig 5.3). Cette méthode permet alors, de manière artificielle, de tenir compte de la propriété du cheveu à se déformer sur toute sa longueur lors d'une collision avec un objet autre que la tête.

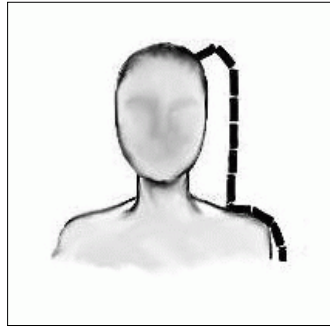


FIG. 5.2 – Collision entre une chaîne articulée et un membre du corps autre que la tête

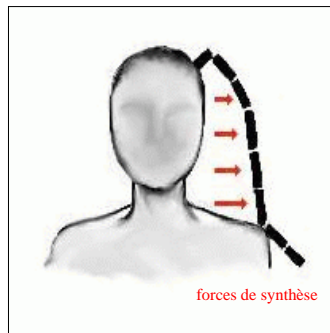


FIG. 5.3 – Collision entre une chaîne articulée et le corps avec ajout de forces de synthèse correctives

5.2.3 Animation de systèmes masse-ressort

Une manière de modéliser à l'intérieur même du système dynamique la capacité d'un cheveu à se déformer sur toute sa longueur consiste [168, 170] à représenter chaque cheveu par une chaîne de masses-ressorts. La réponse à une quelconque collision entre ce système et le corps est conforme à la réalité (cf. fig. 5.4).

Cependant, un tel système présente deux inconvénients par rapport aux chaînes articulées : d'une part, la longueur d'une chaîne de masses-ressorts est variable, alors qu'un cheveu est inextensible ; d'autre part, l'intégration dans le temps d'un tel système nécessite beaucoup de calculs, car chaque particule subit des forces élastiques de la part de ses deux particules voisines. Rosenblum *et al* [172] ont été parmi les premiers à utiliser des chaînes de masses-ressorts pour animer une chevelure ; dans leur méthode, chaque cheveu est modélisé par une chaîne comportant une quinzaine de masses reliées entre elles par des ressorts amortis. Mais avec une telle méthode, il n'est pas possible d'animer plus d'un millier de cheveu sans générer des calculs trop lourds.

Les systèmes masses-ressorts sont donc plutôt adaptés à l'animation d'une chevelure divisée en mèches : chaque mèche de cheveu est en effet relativement extensible, et le nombre de mèches composant une chevelure peut-être choisi suffisamment petit pour ne pas générer des calculs trop coûteux.

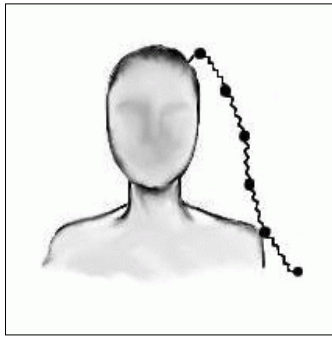


FIG. 5.4 – Collision entre une chaîne masses-ressorts et le corps

5.2.4 Animation d'un milieu continu

Hadap et Magnenat-Thalmann [164] ont d'abord proposé de modéliser les cheveux comme les lignes de courant d'un champ fluide. La dynamique des fluides est appliquée sur un flux orienté de haut en bas, tandis que le corps du personnage est modélisé comme un obstacle pour le flux. Mais avec ce type de méthode, les cheveux gardent toujours la même orientation (ils ne se croisent jamais), et il est donc impossible de simuler des mouvements faisant intervenir des collisions entre cheveux.

Cette méthode a été améliorée en proposant [165] d'utiliser pour la chevelure un modèle d'animation double : un premier modèle, à grande échelle, traduit les diverses interactions en présence au cours du mouvement d'une chevelure dans l'air en considérant cette chevelure comme un milieu continu, soumis aux lois de la dynamique des fluides ; à petite échelle, on modélise la dynamique propre d'un cheveu individuel en tenant compte de sa géométrie et de sa raideur. Le mouvement complet de la chevelure se compose donc d'un mouvement global, régi par la dynamique des fluides, et de mouvements locaux de quelques cheveux individuels visant à accroître le réalisme visuel de l'animation.

Récemment, Bando et al. [157] ont repris cette approche en l'étendant à une méthode adaptative (cf. 5.3.6).

5.3 Gestion de la complexité

Le problème majeur de l'animation de chevelures vient du fait que, d'une part, le nombre de cheveux constituant une chevelure est très important (environ 100 000 cheveux composent une chevelure réelle), et d'autre part, que l'ensemble des interactions en présence est très complexe ; en effet, la chevelure interagit avec le corps, et les cheveux interagissent également entre eux. Etant donné le nombre total de cheveux composant une chevelure, on comprend bien qu'il est totalement impossible, en des temps de calcul raisonnables, d'animer individuellement chaque cheveu, et en même temps de détecter et de traiter toutes les collisions qui se produisent au cours du mouvement.

On se retrouve alors face à deux problèmes antagonistes. Comment peut-on modéliser de la manière la plus réaliste possible le comportement d'une chevelure ? Et comment peut-on réduire la complexité du système à animer ?

Certaines méthodes développées consistent à animer les cheveux de manière individuelle, tout

en utilisant des algorithmes très simples de gestion des collisions. D'autres génèrent le mouvement de la chevelure à partir de l'animation d'un nombre restreint d'éléments, et privilégient ainsi des algorithmes gérant les interactions de manière plus évoluée. Enfin, très récemment, des méthodes adaptatives ont été proposées pour optimiser les calculs de simulation tout en essayant de préserver au maximum le réalisme.

5.3.1 Interactions entre la chevelure et le corps

Afin de simplifier la détection des collisions entre la chevelure et le corps, une méthode couramment employée [156, 170] consiste à approcher le corps par un ensemble de formes géométriques simples, comme des ellipsoïdes. Afin d'obtenir des résultats plus précis et plus naturels, d'autres méthodes considèrent le modèle géométrique du corps sans l'approcher, et, pour éviter d'avoir à calculer les collisions entre la chevelure et des milliers de polygones, utilisent des algorithmes d'accélération de calcul : Lee et Koo [169] utilisent une grille précalculée qui stocke, pour chaque direction (ϕ, θ) de l'espace la distance r de la surface extérieure du corps à partir de l'origine. Le test de collision revient alors à une simple comparaison de distance. Plante *et al.* [170] (qui modélisent la chevelure sous forme d'un ensemble de mèches) se servent d'une grille de l'espace englobant le corps et la chevelure, et qui stocke, dans chacune de ses cellules, la liste des polygones ainsi que la liste des segments de mèches intersectant la cellule considérée, et ce à chaque instant. Le test de collisions consiste donc simplement à tester l'interpénétration de chaque segment de mèche avec les polygones du corps situés dans la même cellule de la grille (*i.e.* dans la même région de l'espace).

5.3.2 Interactions entre cheveux

Les interactions entre cheveux sont, de manière générale, beaucoup plus complexes à gérer : il est d'une part difficile de connaître exactement la nature des forces que les cheveux exercent réellement les uns sur les autres ; d'autre part, si l'on anime les cheveux de manière individuelle, la gestion de ces interactions suppose de tester un nombre considérable d'éléments. C'est pour cette raison que, dans les méthodes où les cheveux sont animés individuellement, les interactions au sein de la chevelure sont modélisées de manière très simple.

Parmi les méthodes alternatives à l'animation de cheveux individuels, on peut distinguer deux grandes catégories :

- les méthodes basées sur l'hypothèse que la chevelure présente une continuité dans son ensemble (ie. la chevelure est assimilée à un milieu continu) ;
- les méthodes basées sur l'hypothèse que la chevelure présente des continuités seulement de manière locale : ces méthodes conduisent à une modélisation de la chevelure par un ensemble de mèches.

5.3.3 Animation de cheveux individuels

Certaines approches se sont focalisées sur l'animation de cheveux individuels en négligeant bien souvent les interactions entre cheveux pour des raisons évidentes de coût de calcul [172, 156, 161, 169, 175].

Or malgré la puissance accrue des ordinateurs, on ne peut pas espérer à l'heure actuelle pouvoir animer individuellement tous les cheveux composant une chevelure en des temps de calcul raisonnables, même en négligeant toutes les interactions.

Les méthodes basées sur l'animation individuelle de cheveux se sont donc toujours limitées à l'animation de quelques dizaines de milliers de cheveux.

Anjyo *et al.* [156] ont animé 20 000 cheveux sans traiter les collisions entre cheveux, à raison de 50 secondes par image (cf. fig. 5.5). En utilisant du calcul parallèle, Hadap et Magnenat-Thalmann [165] ont réussi à animer 10 000 cheveux en prenant en compte les intercollisions, à raison de 2 minutes par image.

Les chevelures animées de cette façon apparaissent alors très lisses, sans discontinuité aucune (cf. fig. 5.5).



FIG. 5.5 – Animation de cheveux individuels sans tenir compte des interactions entre cheveux [156]

5.3.4 La chevelure vue comme un milieu continu

5.3.4.1 Modélisation du volume de la chevelure

Afin de tenir compte des interactions entre cheveux à moindre coût, certaines approches considèrent que le principal effet des collisions entre cheveux est de donner du volume à la chevelure. Elles modélisent alors directement la chevelure comme un ensemble de morceaux de surface, voire comme un volume.

Kim et Neumann [166] ont modélisé les interactions entre cheveux en donnant artificiellement du volume à la chevelure et n'ont animé réellement que les cheveux situés à la surface de la chevelure. Lee et Koo [169] ont quant à eux étendu et amélioré la méthode [156], en prenant en compte les interactions entre les cheveux de manière efficace : l'algorithme consiste, pour chaque cheveu, à modéliser l'ensemble des cheveux situés en-dessous de lui par une surface dont la distance à la surface du corps représente l'épaisseur de la chevelure à cet endroit ; les collisions sont alors traitées de la même manière que les collisions entre les cheveux et le corps. Dans le film Final Fantasy [?], des morceaux de tissu ont été utilisés pour animer la chevelure, et quelques cheveux individuels ont été animés au-dessus.

Toutes ces méthodes parviennent bien à synthétiser des coiffures statiques réalistes, mais le fait de considérer que l'interaction entre cheveux a pour seul effet de donner du volume à la chevelure est très limitant lorsque l'on se place dans le cas d'une chevelure en mouvement. Notamment, avec une telle approche, il est impossible de restituer les discontinuités locales qui se produisent au sein d'une chevelure en fort mouvement (cf. fig. 5.1), et qui sont pourtant essentielles dans l'apport de réalisme.

5.3.4.2 Interpolation de la chevelure autour de quelques cheveux directeurs

Si l'on considère que la chevelure présente une cohésion *globale* dans son aspect pendant le mouvement, on peut alors se contenter d'animer uniquement quelques cheveux directeurs, puis d'étendre ce mouvement au reste de la chevelure par interpolation. Cette technique a été proposée il y a une dizaine d'années [161]. L'inconvénient est qu'elle ne s'applique qu'à des chevelures très lisses, et qui, encore une fois, ne présentent aucune discontinuité lors du mouvement. En outre,

cette méthode pose le problème des collisions entre la chevelure et le corps, puisque seuls les quelques cheveux directeurs sont capables de détecter une interpénétration.

Chang et al. [160] ont utilisé des bandes de triangles reliant les cheveux directeurs pour pallier à cet inconvénient. La gestion des collisions entre cheveux consiste alors simplement à traiter les interactions pouvant survenir entre les cheveux guides et ces triangles intermédiaire, ce qui est peu coûteux. De plus, des cheveux guides sont automatiquement ajoutés de manière adaptative afin de garantir que l'ensemble des cheveux guides reste convenablement distribué durant le mouvement.

5.3.4.3 Chevelure simulée physiquement comme un milieu continu

Hadap et Magnenat-Thalmann [165] gèrent la complexité des interactions entre cheveux, entre les cheveux et l'air, et entre les cheveux et le corps en traitant l'ensemble de la chevelure comme un milieu continu, régi par les lois de la dynamique des fluides. Le résultat est assez convaincant concernant le volume des chevelures ainsi animées. Cependant, comme le montre la figure 5.6, cette méthode conduit encore à des animations de chevelures très lisses, où n'apparaissent pas les discontinuités que l'on observe dans le cas réel (cf. fig. 5.1).



FIG. 5.6 – Animation de la chevelure comme un milieu continu [165]

Très récemment, Bando et al. [157] se sont inspirés de cette idée de milieu continu pour la chevelure en l'étendant à un modèle adaptatif (cf. 5.3.6).

5.3.5 Regroupement des cheveux en mèches

L'hypothèse selon laquelle la chevelure est un milieu continu est discutable : en effet on peut remarquer que toute chevelure, aussi lisse soit-elle, peut subir des discontinuités au cours d'un mouvement ; ie. à un instant donné, si le mouvement est suffisamment rapide, certains groupes de cheveux sont susceptibles d'avoir une direction visiblement différente du reste de la chevelure.

Ainsi, une autre idée, est de considérer que la chevelure présente non pas une continuité globale, mais des cohésions internes *locales*. La chevelure est alors modélisée comme un ensemble de primitives géométriques ou *mèches*, que l'on anime séparément.

D'autre part, cette modélisation sous forme de mèches est évidemment un bon moyen de réduire le nombre d'éléments individuels à animer, tout en gardant une certaine complexité pour la chevelure. Plusieurs travaux se sont basés sur cette approche, certains simulant un nombre réduit de grosses mèches (par exemple dans Shrek [162]), d'autres utilisant des mèches surfaciques [167, 168], ou volumiques [176, 171], ces mèches pouvant être déformables ou rigides.

En utilisant un modèle physique de mèches volumiques déformables, avec un modèle élaboré de collisions anisotropes, Plante *et al.* [170, 171] ont obtenu des résultats assez réalistes (cf. fig. 5.7).



FIG. 5.7 – Animation de cheveux regroupés en mèches volumiques déformables [171]

Cependant toutes ces méthodes sont loin d'être interactives. A titre d'exemple, les simulations réalisées par Plante et al. ont nécessité un temps de calcul d'environ 40 secondes par image, soit 1000 fois plus que ce qu'il faudrait au minimum pour être en temps réel.

5.3.6 Méthodes adaptatives

Très récemment des méthodes adaptatives [174, 159, 173, 157] ont été mises au point afin de minimiser les temps de calcul de simulation tout en préservant au maximum le réalisme.

Ward et al. [174] ont proposé de modéliser une chevelure en utilisant trois niveaux de détail géométriques : des bandes de cheveux 2D au niveau le plus grossier, des groupes de cheveux 3D au niveau intermédiaire, et des cheveux individuels au niveau le plus fin. Les transitions entre ces niveaux de détail sont générées dynamiquement au cours du mouvement, en fonction de certains critères comme la position de la caméra par exemple. Cette méthode s'avère être très efficace, en particulier pour l'étape de rendu.

Afin d'adapter à chaque instant les coûts de calcul en fonction de la complexité du mouvement de la chevelure, Bertails et al. ont modélisé la chevelure à l'aide d'une structure arborescente de mèches (appelé arbre de mèches adaptatif). Cette structure est capable de subir des subdivisions ou des fusions locales selon que la chevelure subit un mouvement important, ou au contraire qu'elle revient au repos. De cette manière, il n'y a pas de temps perdu inutilement à simuler des mèches qui ne bougent pas. Ward et al. ont employé une méthode similaire [173] afin d'étendre leurs premiers travaux, cités précédemment.

Enfin, Bando et al. [157] ont modélisé la chevelure par un ensemble de particules SPH² en interaction les unes avec les autres, chacune des interactions s'adaptant au cours du mouvement (cf. fig 5.8).

Dans ce modèle, une particule représente une certaine quantité de chevelure, munie d'une orientation (l'orientation d'une particule étant l'orientation moyenne de l'ensemble des cheveux représentés par la particule).

Initialement, on construit des chaînes de connexion entre particules voisines alignées selon l'orientation des cheveux : deux particules voisines ayant des directions proches, et telles que leurs positions sont également alignées selon cette direction, sont reliées par un ressort (d'autant plus raide que l'alignement est important). Cette configuration initiale est conservée tout au long du mouvement, puisqu'elle traduit la cohérence spatiale des interactions entre particules.

Au cours du mouvement, chaque particule est susceptible en plus d'interagir avec des particules

²Smoothed Particle Hydrodynamics

appartenant à son voisinage courant (différent du voisinage initial). La méthode propose de gérer ces interactions dynamiques entre cheveux en établissant des liens entre particules proches, liens qui disparaissent lorsque les deux particules ne sont plus voisines l'une de l'autre. La méthode facilite ainsi les séparations et regroupements transversaux de cheveux, tout en garantissant une longueur constante pour la chevelure. A chaque pas de temps, la recherche des voisinages de chaque particules est effectuée de manière efficace grâce à une grille de voxels.



FIG. 5.8 – Animation d'une chevelure discrétisée par des particules SPH liées entre elles de manière adaptative [157]

5.4 Conclusion

En définitive, quatre grands types d'approches ont été proposés jusqu'ici pour animer une chevelure.

Initialement, certains chercheurs ont tenté d'animer les cheveux de manière individuelle, mais cette méthode, trop coûteuse, ne leur a pas permis pas de gérer en plus les interactions entre cheveux, étape pourtant indispensable au réalisme du mouvement.

Par la suite, deux types de méthodes alternatives ont été étudiées afin de s'attaquer à la complexité du mouvement d'une chevelure. D'une part, les approches basées sur l'hypothèse de continuité de la chevelure ont conduit à faire diverses approximations dans le traitement de la chevelure (chevelure vue comme un milieu fluide, interpolation entre cheveux guides etc.). Les résultats obtenus sont surtout satisfaisants pour modéliser des chevelures très lisses. D'autre part, on a au contraire considéré que la chevelure pouvait subir des discontinuités locales au cours du mouvement, et dans ce cas, les cheveux ont été modélisés comme un ensemble fixe de mèches en interaction les unes avec les autres. Ces méthodes ont donné de bons résultats, y compris dans certains cas pour des chevelures lisses, mais pour lesquelles elles augmentent inutilement la complexité des calculs.

Le principal inconvénient de toutes ces méthodes est qu'elles demeurent coûteuses en temps de calcul. Pour cette raison, des méthodes adaptatives ont été développées récemment afin de tendre vers des simulations interactives et suffisamment réalistes. Ces méthodes hybrides ont d'autre part l'avantage d'unifier d'une certaine façon les deux visions contradictoires précédemment évoquées, puisque grâce à ce type de méthode, la chevelure peut se rassembler en un seul élément continu, ou au contraire se séparer en plusieurs mèches interagissantes.

Beaucoup de progrès restent néanmoins à faire : aucune des méthodes citées précédemment n'est capable de reproduire des mouvements complexes (mouvements rapides de la tête, peignage, etc.) pour des chevelures de nature variée, de manière à la fois réaliste et rapide.

Chapitre 6

modélisation biomécanique du genou

Dans le cas de l'animation physique d'une articulation, on peut répertorier trois type de modèles : cinématique, statique et dynamique : Dans le modèle cinématique, seul la position, la vitesse et l'accélération de l'articulation sont considérées. Sans porté intérêt à la masse ou au fonctionnement interne de l'articulation ou de ses composants. Dans le modèle statique, on ne considère que la position d'équilibre des forces internes et externe agissant sur l'articulation. On utilise des modèles quasi-statiques pour simuler les effets du mouvement. Le modèle dynamique incorpore à la fois le modèle cinématique et le modèle statique pour permettre de prendre en compte les forces faisant agir l'articulation, et son mouvement propre. Nous allons détailler ces modèles à travers l'exemple d'une articulation largement étudiée, car une des plus complexe, le genou.

Le genou étant une articulation importante dans le processus de marche ou de posture pour l'être humain, son mouvement a très tôt été étudié. Cependant, nombre de ces études ne portaient que sur le fonctionnement global du genou sans tenir compte de son fonctionnement interne. Or c'est une articulation complexe, faisant interagir de nombreux éléments lors de son action, et ne se limitant pas à une simple rotation. Elle présente, en effet, le paradoxe de devoir satisfaire deux contraintes antagonistes : assurer une grande stabilité, pour maintenir la station verticale, ainsi qu'une grande mobilité, lors des déplacements, ce qui est permis d'une part, par une articulation très libre dans ses mouvements, et d'autre part, par de nombreuses contraintes. Dû à son utilisation intensive et à sa grande complexité, le genou est facilement endommagé et difficilement soignable. Différents travaux ont donc été effectués dans le but de simuler son action, chacun apportant ainsi sa pierre à l'édifice. Avant de voir les solutions et les modèles mis en place au cours de ces études, nous allons étudier les différents éléments intervenant lors de l'action du genou et le fonctionnement naturel de celui-ci. Le genou est l'articulation intervenant entre les os du fémur et du tibia. Le contact s'effectuant entre les plateaux tibiaux pour le tibia et les condyles fémoraux pour le fémur. La présence d'un ménisque entre les os permet d'une part d'augmenter la surface de contact, afin de dissiper les forces entre le tibia et le fémur, tout en augmentant le coefficient de glissement du contact. De plus la rotule et un certains nombres de ligaments viennent contraindre les mouvements possibles du genou, ces degrés de liberté (DdL). L'articulation du genou se compose d'un degré de liberté principal : flexion/extension. Ainsi que de deux rotations secondaires : interne/externe (dites adduction/abduction) et latérale droit/gauche (dite varus/valgus). Le mouvement de rotation interne/externe se caractérise par la rotation de la partie inférieure de la jambe autour de l'axe du tibia, tandis que la rotation latérale droit/gauche introduit une rotation de la partie inférieure de la jambe dans le plan parallèle à l'axe du tibia et à l'axe résultant d'un produit vectoriel entre les axes du tibia et du fémur. De plus, on observe

des mouvements de tiroir antéropostérieur (d'avant en arrière), latéraux (droite/gauche) ainsi qu'éventuellement des mouvement de compression/distraction (haut/bas). Ce qui fait un total de 6 DdL pour l'articulation du genou. Cependant, ces 6 DdL sont contraints par les différents éléments intervenants dans l'articulation. Les ligaments permettent à ces surfaces articulaires d'être maintenues en contact et limitent également les mouvements de tiroirs et les rotations secondaires du genou.

6.1 Le modèle cinématique

Le modèle cinématique s'intéresse uniquement à la position, la vitesse et l'accélération de l'articulation. Comme nous venons de le montrer, il serait réducteur de ne considérer qu'un seul DdL, dès lors, il faut caractériser les mouvements qui nous intéressent. Le mouvement de l'articulation du genou peut être caractérisé par trois rotations et trois translations. Les axes de ces trois rotations sont généralement considérés comme dissociés. Le premier impératif est de localiser l'axe de flexion/extension. Shino [137] prétend que cet axe se déplace d'à peu près 1 cm pour 130° de rotation. Frankel et al.[110] approfondissent ces déclarations en proposant que le centre de rotation se déplace sur le plan de la rotation sous la forme d'une spirale. De leur côté, Crowninshield et al.[140] avèrent les déclarations de McLeod et al. [131], selon lesquelles, le centre de rotation se trouverait dans le condyle fémoral externe, proche de la surface du plateau tibial lorsque l'articulation est en pleine extension, et se déplacerait petit à petit vers l'arrière lors de la flexion. Smidt[145], utilise une translation dans la région du condyle fémoral externe pour simuler ce déplacement. Tandis que Lewis et Lew [127, 128] utilise déjà un modèle à 6 degrés de liberté définissant un axe unique optimal. Crowninshield et al. [140] décrivent dans leur article le mouvement de rotation varus/valgus comme deux rotations d'axe antéropostérieur se situant respectivement dans les condyles interne et externe. En opposition, Seering et al. [142] proposent un axe unique de rotation situé dans le fémur et passant par un point situé à moins de 0,5 cm et à mis chemin, de deux points de la surface condyles fémoraux les plus distants possibles. Le centre de la rotation interne/externe est situé par Mosely [136] au centre du condyle interne, il quantifie cette rotation α , à peu près, 30° pour une flexion de 130°. Wang et al. [149] et Crowninshield et al. [140] corroborent cette assertion en localisant le centre de cette rotation sur la partie interne du genou, mais Wang et al. spécifient la rotation comme une fonction de l'angle de flexion/extension. En opposition, Seering et al. [142] utilise un axe perpendiculaire au plateau tibial, passant par le point médian des centres des plateaux tibiaux interne et externe. Wang et Walker [148] quant à eux, définissent l'axe de rotation comme perpendiculaire à la crête de l'éminence intercondylienne. Selon Goodfellow et O'Connor [111], les mouvements de tiroirs antéropostérieur doivent apparaître dans un axe antéropostérieur défini par la fente de l'éminence intercondylienne, et parallèle au plateau tibial dans le plan sagittal. Edwards et al. [108] et Crowninshield et al. [140] exprime tout deux ces mouvements dans un axe reposant sur le plan défini par les contacts osseux, selon l'insertion fémoral des ligaments croisé et passant par le centre du plateau tibial. Les mouvements de tiroir latéraux, selon Morrison [135], sont défini sur un axe de translation passant par les points de contact les plus distants, passant au milieu et perpendiculairement à la crête intercondylienne. Pour les mouvements de compression/distraction, Edwards [108] et Crowninshield et al. [140] emploient l'axe longitudinal du tibia passant par le centre du plateau tibial, alors que les résultats de Yoshioka et al.[?] suggèrent que la moyenne des axes diffère de 2° de l'axe du tibia.

6.2 Le modèle statique

Le modèle cinématique dépend des informations et des connaissances que l'on a sur le fonctionnement de l'articulation que l'on souhaite étudier. Pour se dégager de cette contrainte, certains chercheurs ont souhaités modéliser l'articulation en se basant sur les informations géométriques des éléments de l'articulation pour les faire interagir en y appliquant des forces internes et externes. Dans le but d'obtenir une description cohérente de l'articulation, ils ont commencé par modéliser l'articulation en recherchant la position d'équilibre entre les forces internes/externes, le modèle statique, puis simulés le mouvement en introduisant un déséquilibre, modèle semi-statique. Hefzy and Grood [117] ont classifiés ces modèles en quatre principaux groupes : Le Type I regroupe ceux qui sont utilisé pour déterminer la répartition de forces dans les muscles et ligament lors d'efforts exercés par l'articulation. Le Type II représente les systèmes dans lesquels les forces de chaque ligament sont représentées comme des fonctions dépendantes de l'articulation. Le Type III regroupe les systèmes principalement utilisés pour déterminer forces de frottement/glissement aux points de contacts. Le Type IV se compose des système les plus complexes incluant à la fois les contraintes ligamentaires et géométriques. Type I Aucune implémentation graphique de ce type de système n'a été faite, cependant il est possible de la concevoir a partir de Hefzy [HG88]. Type II Les premiers modèles ont été mis en place par Edwards et al. et Crowninshield et al. [108, 140]. Edwards et al. [108] ont étudié la cinématique de l'articulation du genou pour déterminer la longueur des ligaments latéraux et croisés. Ce système comporte 3 DdL : flexion dans le plan sagittal, rotation tibial dans le plan transversal et translation de compression/distraction. Crowninshield et al. [140] ont poursuivit ces travaux, en présentant le premier modèle analytique de genou prédisant les réponses de l'articulation soumis à des forces externes ou à des déplacement. Ce modèle a été obtenue en ajoutant 2 DdL : mouvement de varus/valgus et mouvements antéropostérieur, ainsi qu'en complexifiant la représentation des ligaments. La tension de l'articulation est calculée par la méthode inverse, aussi utilisée par Wismans [151]. Les prédictions obtenues ont été comparées avec des données expérimentales, les résultats sont considérés comme acceptable pour les mouvements de varus/valgus et de rotation latérale, mais pas pour les mouvements antéropostérieur. Dans un premier article, Grood et Hefzy [113] évaluent la contribution des ligaments aux efforts du genou en utilisant une matrice d'analyse structurelle. L'avantage de cet méthode étant que la l'effort de l'articulation est calculé directement à partir des équations du modèle. Dans leur second article, Hefzy et Grood [116] ont étendu leur travail en incorporant une description des ligaments plus réaliste. Type III Selon Hefzy et Grood [117] ce type de modèle a initialement été développé pour évaluer les variations d'effort du genou selon l'ostéotomie du tibia. Plusieurs modèles [132, 107, 129] ont été mis en place, mais aucun n'est graphique. Type VI Il n'existe à ce jour que trois modèles dans ce groupe, Wismans et al. [151], Andriacchi et al. [100] and Blankevoort et al.[103]. Wismans et al. [151] proposent un modèle 3D quasi-statique du genou. Le modèle comprend les structures ligamentaires et capsulaires, ainsi que la représentation géométrique 3D de l'articulation, permettant ainsi d'exprimer la position du fémur par rapport au tibia en fonction de l'angle de flexion. La tension et l'étirement des ligaments, ainsi que la position des deux points de contact, la magnitude et la direction des forces aux points de contact sont aussi désignés comme des fonctions de la flexion. Andriacchi et al. [100] présentent un modèle 3D utilisant un modèle de corps rigides pour le fémur et le tibia, et un modèle d'éléments finis pour les ligaments, ménisques et cartilage. Les rotations interne/externe et varus/valgus ont été prédites, puis quantitativement comparées aux valeurs expérimentales présentées par Markolf et al. [130]. Ils ont découvert qu'imposer des contraintes au mouvement déplace l'axe de rotation suffisamment pour altérer la réponse du genou. Ils en ont déduit qu'il était très important de pouvoir simuler un axe de rotation mobile dans le modèle du genou. Et ont proposé que les applications, utilisant un axe de rotation fixe, imposent un effort non naturel

à l'articulation.

6.3 Le modèle dynamique

Si le but de l'étude est la construction d'un système permettant de simuler de manière efficace le comportement d'une articulation en fonction d'une grande variété de contraintes, alors les modèles statiques ou quasi-statiques, considérant des restrictions artificielles sur l'articulation sont inadéquats. Il faut donc étendre l'étude faite sur ces modèles pour pouvoir gérer dynamiquement les contraintes que l'on souhaite y appliquer. On distingue 2 types de modèles : 2D [147, 99, 152, 134] et 3D [122, 134]. Tumer et Engin [147] ont développé un modèle 2d du genou, incorporant à la fois l'articulation patello-fémorale et tibio-fémorale. Le modèle permet la simulation de la réponse à la contraction de certains muscles de l'articulation et à l'application de forces externes. Le même jeu de muscles que Wongchaisuwat et al. [152] a été modélisé. Abdel-Rahmen et Hefzy [99] ont construit leur modèle comme deux corps rigides connecté par cinq ligaments. Le fémur est considéré comme fixe tandis que le tibia est libre dans le plan sagittal. L'articulation est considérée comme sans frottement, avec un seul point de contact. Les forces externes appliquées sont le poids de la jambe, s'appliquant au centre de gravité du tibia, comme défini par Moeinzadeh et al. [134], ainsi qu'une force de charge, s'appliquant elle aussi au centre de gravité du tibia, dans un axe perpendiculaire au à l'axe du tibia et dirigé vers l'arrière. Ils obtiennent ainsi trois équations de mouvement, deux équations d'accélération des forces, dans l'axe x et y , et une équation d'accélération angulaire. Trois autres équations sont ajoutées pour résoudre le point de contact, soit six équations pour six inconnues. Ils ont ainsi pu démontrer, en accord avec la littérature, que pour une flexion de 20 à 90°, les efforts inverses sont essentiellement fournis par les ligaments croisé postérieur et collatéral interne. Wongchaisuwat et al. [152] s'intéressent au mouvement de roulement/glisement qui s'opère entre deux os. Pour se faire, ils modélisent le mouvement dans la coupe sagittale, et considèrent le tibia comme un pendule ne pouvant perdre le contact avec le tibia. Ils introduisent ensuite des efforts pour simuler les ligaments et les efforts fournis par les muscles, formulent les équations de mouvements résultants dans un système Newton-Euler, puis résolvent le système. Les résultats obtenus sont difficilement comparables à la littérature, à cause de différences dans les modèles et dans l'expérience, trop importantes. Mais Wongchaisuwat et al. prétendent les prédictions de réponse des ligaments comme très correctes. Moeinzadeh et al. [134] ont développé un modèle en 2d du genou, constitué de deux corps rigides attachés ensemble par la représentation des ligaments croisés et collatéraux. Le fémur est considéré comme fixe, tandis que le tibia reste mobile dans un plan. Le but de l'étude était de démontrer les effets de l'application d'une force externe sur le tibia plutôt que d'effectuer une simulation paramétrée. Leur modèle a permis de constater qu'en extension, les ligaments collatéraux et croisé antérieur s'allongent tandis que le croisé postérieur se contracte lors de l'application d'une charge sur le tibia.

6.4 Extraction des données réelles

Comme nous venons de le voir, les solutions pour construire le modèle sont nombreuses. Néanmoins, quelque soit la solution méthodologique envisagée, il est nécessaire de tenir compte des données qui seront utilisées pour la modélisation et l'animation. Or pour obtenir le résultat le plus crédible possible, ces données doivent être des données réelles. Les informations à obtenir sont d'une part les données géométriques et topologiques du système que l'on souhaite modéliser, pour extraire ces données on a généralement recours à des techniques de traitement d'image tel que la segmentation, quel soit multimodale, supervisé ou pas sur des données réelles telles que

des IRM ou des radios [120, 101, 139, 112, 118, 121, 115, 150]. Une fois la géométrie de la scène à modéliser obtenue, reste à acquérir les informations mécaniques et physiques des éléments constituant le modèle. Là encore, plusieurs solutions sont disponibles selon le type d'application visée. D'une part les informations de mouvement tel que la vitesse, l'amplitude et la nature des transformations effectués peuvent être obtenue par l'utilisation de capteurs de mouvements [124, 105]. Les informations physiologiques des éléments sont obtenues à partir de la littérature et des connaissances d'experts. Et pour finalement détecter les forces intervenant sur le système, il est là encore nécessaire mettre en place des capteurs spécifiques, tel que des tapis mesurant la pression ou des systèmes à retour de force permettant de mesurer l'effort fourni [105, 125].

6.5 Le calcul de l'animation

Il faut aussi remarquer que la méthode de calcul de l'animation est aussi à prendre en compte lors de la construction du modèle; En effet, il est possible que certaines méthodes requièrent des attributs particuliers aux modèles. Par exemple, les méthodes d'animation reposant sur les éléments finis, sont basées sur un échantillonnage 2D ou 3D des objets intervenant dans l'animation, des paramètres relatifs au matériau sont ensuite affectés à chacun des éléments du maillage, puis pour chaque étape de l'animation, on déduit le déplacement des éléments en fonction des efforts fournis. Il est donc nécessaire lors de la construction du modèle de réfléchir à la manière dont les différentes caractéristiques des éléments du maillage seront obtenues et stockées.

Chapitre 7

Données anthropométriques

7.1 Paramètres mécaniques des segments corporels

Lorsqu'on s'intéresse à l'humain virtuel, l'une des contraintes à prendre en considération est le réalisme. En animation d'humains virtuels, les données anthropométriques participent à cette recherche de réalisme. Les méthodes dynamiques se basent sur la simulation d'un système poly-articulé ayant des propriétés de masse et d'inertie. Même pour des méthodes fondées sur la modification de trajectoires, ce type d'information permet d'appliquer des contraintes de minimisation d'énergie ou de maintien de l'équilibre. En biomécanique, plusieurs approches ont été proposées pour estimer ce type de paramètres. Deux principales méthodes d'évaluation des données anthropométriques peuvent être identifiées :

- Celle utilisant une population d'étude et permettant ainsi de produire des équations de régression liant données générales (taille, poids) et paramètres mécaniques moyens des segments corporels (position des centres de masse, masses et inerties principalement). Les résultats de ces travaux sont résumés dans des tables anthropométriques couramment utilisées en analyse du mouvement.
- Celle fondée sur des régressions permettant de calculer des valeurs de masse et d'inertie particulière à un sujet, en fonction de mesures corporelles (tour de taille,...)

7.1.1 Etudes sur des populations et définition de tables anthropométriques

Historiquement, les premières approches utilisaient des données cadavériques pour définir des tables anthropométriques moyennes. Dès les années 50, à partir de la découpe de cadavres (Dempster, 1955) ont permis d'obtenir des valeurs moyennes de masses et d'inertie. Ces données ont été largement diffusées grâce à Winter (1990) qui reprit ces mêmes données. De la même manière, [178] Clauser et coll. (1969) étudient le cadavre de 13 adultes, afin de connaître les différentes masses segmentaires et inerties. Des marqueurs anatomiques sont choisis pour délimiter un segment corporel. Le choix de ces marqueurs est différent d'une table à une autre. Une fois les segments corporels isolés, les inerties peuvent être mesurées expérimentalement pour obtenir des données en deux dimensions uniquement. Cependant, les repères anatomiques couramment choisis ne correspondent généralement pas aux véritables centres articulaires. Ces données ne sont donc pas complètement applicables à de l'animation/simulation 3D où les segments corporels sont définis d'une articulation à la suivante. Plus récemment, avec l'évolution des techniques de mesures biomédicales (tomographie entre autre), le même type de mesure peut être effectué sur

des sujets vivants. Ceci a permis de mener un plus grand nombre d'études, sur des populations différentes.

Les tables anthropométriques les plus connues sont celles issues des travaux de Zatsiorsky [183](Zatsiorsky et coll., 1990). Il donne la masse relative des segments et les rapports entre l'emplacement du centre de gravité et la longueur du segment. L'établissement de ces tables par Zatsiorsky et coll. est basé sur la technique de radiographie par rayons gamma d'une population caucasienne de 100 hommes et 15 femmes étudiants à l'institut d'éducation physique de Moscou. Par contre, comme dans les précédentes approches, dans ces tables, la segmentation du corps s'effectue à partir de repères anatomiques souvent éloignés des centres articulaires. Par exemple, pour le segment cuisse (correspondant au fémur), le point proximal est placé sur l'épine iliaque alors que le centre articulaire de la hanche est bien en dessous. En utilisant ces tables en simulation, on a donc tendance à surestimer la masse de la cuisse et à ne pas intégrer le bassin dans le calcul de la masse du tronc. Afin de remédier à ce biais, Hinrichs [180] reprend les données cadavériques de Clauser et coll. [178] en vue de prendre comme repères distaux et proximaux les centres articulaires des différents segments. Ces ajustements réalisés par Hinrichs [180] sont directement issus des données originelles de Clauser et coll. [178] sauf pour deux distances manquantes où il utilise alors les données de Chandler et coll. [177] .

Données anthropométriques de Dempster [?](1955), reprise par Winter D.A. [179] :

Segment	Point proximal	Point Distal
Pied	Malléole latérale (externe)	Tête du 2ème métatarse
Jambe	Condyle fémoral	Malléole médiane (interne)
Cuisse	Grand trochanter	Condyle fémoral
Main	Axe du poignet	2ème jointure du majeur (3ème doigt)
Avant-bras	Axe du coude	Appendice styloïde du cubitus (ulnar)
Bras	Articulation gléno-humérale	Axe du coude
Tête	C7 - T1	Canal auditif
Thorax	C7 - T1	T12 - L1
Abdomen	T12 - L1	L4 - L5
Pelvis	L4- L5	Trochanter
Avant-bras + main	Axe du coude	Appendice styloïde du cubitus (ulnar)
Membre supérieur	Articulation gléno-humérale	Axe du coude
Jambe + pied	Condyle fémoral	Malléole médiane (interne)
Membre inférieur	Grand trochanter	Malléole médiane (interne)
Tronc	Grand trochanter	Articulation glénohumérale
Tête + tronc	Grand Trochanter	Articulation gléno-humérale

Données anthropométriques utilisées par Zatsiorsky et al [183] :

Segment	Point proximal	Point Distal	Circonférence
Pied	Extrémité du 2ème orteil	Saillie du talon quand celui-ci le pied forme un angle droit avec la jambe	Pied (au milieu du métatarse)
Jambe	Point latéral de la tête du tibia	Malléole	Maximum du mollet
Cuisse	Epine iliaque antéro-supérieure	Point latéral de la tête du tibia	Cuisse (au niveau du pli fessier)
Main	Apophyse styloïde du radius	Extrémité du doigt (majeur)	Main (métacarpe)
Avant-bras	Point proximal latéral de la tête du radius	Apophyse styloïde du radius	Maximum de l'avant-bras
Bras	Acromion (le bras est en position horizontale)	Point proximal latéral de la tête du radius	Maximum du bras
Tête	Vertex (sommet du crâne)	7ème cervicale	Maximum horizontal de la tête
Ht du tronc	Appendice xiphoïde	Cervicale	Circonférence de la poitrine (au niveau de l'appendice xiphoïde)
Milieu du tronc	Nombril	Appendice xiphoïde	Taille (au niveau du nombril)
Bas du tronc	Epines iliaques antéro-supérieures	Nombril	Pelvis (au niveau du trochanter)

Le tableau ci-dessous présente le rapport de la masse du segment sur la masse totale, pour chacun des segments d'un homme selon les données de Dempster et de Zatsiorsky et coll. (1983, 1990). De manière évidente, nous observons des différences liées en grande partie au fait que la segmentation du corps ne s'effectue pas selon les mêmes repères anatomiques.

	Données de Dempster, d'après Winter (1990)	Zatsiorsky et coll. (1983, 1990)
Bras	0.028	0.0271
Avant-bras	0.016	0.0162
Main	0.006	0.0061
Tête	0.081	0.0694
Thorax	0.216	0.1596
Abdomen	0.139	0.1638
Pelvis	0.142	0.1117
Cuisse	0.1	0.1417
jambe	0.0465	0.0433
piéd	0.0145	0.0137

De plus, les différences observées dans le rapport des masses peuvent aussi s'expliquer par la différence dans la population participant à l'étude. En effet, nous rappelons que l'étude de Dempster aboutit à des données issues de 7 cadavres d'hommes âgés, alors que l'étude de Zatsiorsky et coll. rapporte les données de 100 étudiants en éducation physique âgés approximativement de 24 ans. Pour aller plus loin dans l'étude des différentes tables anthropométriques, nous pouvons

insister sur le problème lié au tronc. En effet, comme les tableaux précédents le montrent, le tronc est un segment majeur puisqu'il représente globalement 36 à 49 % de la masse totale du corps. Or, selon les différentes tables, le tronc peut être divisé en 1, 2 ou 3 parties. Certains auteurs se sont donc intéressés tout particulièrement au tronc. C'est le cas pour Erdmann[181] qui détermine, grâce à l'étude de 15 patients masculins âgés de 20 à 40 ans, des équations de régression permettant la division du tronc en de nombreux sous-segments. Il est donc possible d'utiliser ces tables pour travailler avec des squelettes plus précis, comme c'est le cas dans la norme H-ANIM ou Mpeg-4 en animation.

7.2 Particularisation des données anthropométriques par des formules de régression

Lors des études biomécaniques, il a été rapidement mis en évidence la nécessité de la connaissance des paramètres segmentaires et la nécessité d'individualiser ces paramètres. Dès l'apparition des études cadavériques, certains auteurs ont cherchés à déterminer les équations de régression linéaires pour déterminer, par exemple, la masse ou le moment d'inertie [178, 180, 183](Clauser et coll. 1969 ; Hinrichs, 1985, Zatsiorsky et coll., 1990). Par exemple, Zatsiorsky et coll. [183] donne les paramètres de leurs équations de régression, pour déterminer la masse d'un segment à partir de la masse totale du corps et de sa taille. Si, dans un premier temps, les équations de régression utilisées étaient linéaires, Yeadon et Morlock [182] montrent que pour le calcul des moments d'inertie selon les différents axes et pour chaque segments, les équations de régression non linéaires apportent une plus grande précision par rapport à des équations de régression linéaires, diminuant de 21 % à 13 % l'erreur standard moyenne dans le calcul du moment d'inertie de la cuisse.

7.3 Discussions sur les tables anthropométriques

Pearsall et Costigan (1999) analysent la trajectoire du centre de masse calculé lors de la marche. Ces auteurs constatent que l'estimation des masses segmentaires et des moments d'inertie peut varier jusqu'à plus de 40%, selon la méthode utilisée. Cependant, ces variations dans l'estimation des paramètres segmentaires ne semblent pas beaucoup affecter les résultats lors de l'analyse de la marche. Cependant, nous sommes en droit de nous interroger sur leur influence lors de mouvements plus rapides et plus complexes. De plus, les tables anthropométriques sont généralement obtenues à partir de mesures issues d'une population homogène en âge et en époque. Ainsi, on peut s'interroger sur la validité des données provenant de personnes âgées lorsqu'on les applique sur une population plus jeune, et inversement. De plus, l'évolution de la société montre que depuis quelques décennies, la population a évolué (elle a principalement grandi). Or, l'étude de Dempster (1955), encore très utilisée, date d'il y a une cinquantaine d'année et pourrait conduire à des résultats différents si elle était de nouveau menée avec une population actuelle.

En conclusion, pour l'animation, il semble que les tables anthropométriques les plus adaptées soient celles utilisant les centres articulaires pour délimiter les segments corporels. De plus, ces données anthropométriques sont généralement liées à une population et il est donc nécessaire de choisir les données les plus adaptées au personnage à animer. Dans une simulation dynamique, une différence de données anatomiques peut conduire à des trajectoires différentes, ce n'est donc pas un paramètre à négliger. Les approches utilisant des informations sur le volume des segments et sur les densités moyennes est aussi intéressante. Dans le cas de l'analyse du mouvement humain,

des primitives géométriques simples sont utilisées pour représenter les segments corporels. Un humain virtuel est défini par un ensemble de facettes et il est donc possible d'estimer précisément le volume des segments des différents corps. On peut ensuite appliquer les densités moyennes relevées dans des tables pour remonter aux masses et aux inerties. Bien entendu, dans ce cas, on garde une imprécision sur les densités moyennes utilisées. Là encore, il faut s'intéresser aux données qui correspondent le mieux au type de population que l'on cherche à simuler. Une étude qui n'a pas été menée consiste à comparer les trajectoires obtenues avec des valeurs extrêmes de données anthropométriques afin de chiffrer l'influence réelle de ces valeurs sur le résultat de la simulation. De plus, en animation, il est courant d'animer des personnages qui ont l'air humain mais dont les données anthropométriques peuvent varier (personnages type « cartoon » par exemple).

Chapitre 8

Conclusion et perspectives

Dans ces sept chapitres, nous avons présenté un vaste état de l'art des travaux en modélisation d'humanoïdes. La particularité des humanoïdes provient du fait qu'ils constituent le modèle auquel chacun de nous est le plus habitué, et donc le plus sensible aux détails significatifs. Pour qu'un humain virtuel soit plausible, il est bien sûr indispensable qu'il ait une bonne apparence globale, mais au-delà il faut que son modèle fournisse tous les éléments qui permettront une animation convaincante.

Selon que l'on privilégie le temps réel pour les jeux vidéo par exemple ou la qualité finale que l'on trouve dans les films d'animation, les personnages créés doivent passer du statut de plausibles à celui de réalistes. Une étape importante a été franchie avec l'apparition des modèles multi-couches qui ont rapidement proposé une gestion réaliste du squelette ainsi que de la chair et plus récemment de la peau. La cohérence des couches est généralement pilotée par les muscles dont des représentations très abouties ont été proposées dernièrement.

L'étape ultime du réalisme est la reproduction des expressions et des sentiments apparents de l'humain virtuel. Dans ce cadre, les mains jouent un rôle important mais c'est sans conteste le visage qui est le plus important.

Finalement, du fait des capacités des machines récentes (CPU et GPU), il apparaît que quel que soit l'application prévue pour un modèle d'humain virtuel, la tendance actuelle va vers toujours plus de simulation de la réalité. Malheureusement, réalité rime ici avec complexité. En premier lieu, la modélisation d'un humanoïde se révèle être une charge lourde nécessitant de nombreux pôles de compétence et donc un investissement important. Cela se traduit directement au niveau des *standards* tels que H-Anim ou MPEG4 dont l'évolution est très lente et dont on se rend vite compte qu'ils limitent les recherches si on s'impose un respect trop strict. En second lieu, il est indéniable que dans le cas de l'humain virtuel, modélisation et animation sont intimement liés (muscles, visage, ...) et il est donc important d'effectuer un audit approfondi du domaine d'application souhaité avant d'entreprendre la modélisation.

La solution naturelle à cette situation réside en la mutualisation des compétences pour une définition modulaire et évolutive d'un modèle d'humain virtuel. Il est nécessaire d'appréhender la modélisation d'une partie d'un humanoïde comme la création d'une *brique* bien définie s'appuyant sur des fondations reconnues et proposant des services limités mais efficaces. Mettre en place une telle démarche nécessite cependant un travail non négligeable de documentation des *briques* ainsi que la définition d'*interfaces* pour les rendre utilisables par d'autres.

Si les perspectives de *bas niveau* ont été définies au fil des sept chapitres précédents et peuvent être résumées par un objectif de *toujours plus de réalisme dans une architecture modulaire*, à moyen terme il apparaît indispensable de définir une plateforme commune dans laquelle pourront

s'articuler des modules très ciblés. Ceci requiert non seulement des moyens importants pour la définition et la maintenance de cette plateforme, mais également une implication de tous les acteurs de la modélisation d'humanoïdes afin de faire vivre le projet.

Bibliographie

- [1] Physically-based wrinkle simulation and skin rendering. 1997.
- [2] Amaury Aubel. *Anatomically-Based Human Body Deformations*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, May 2002.
- [3] Yosuke Bando, Takaaki Kuratate, and Tomoyuki Nishita. A simple method for modeling wrinkles on human skin. In *Pacific Graphics*, October 2002.
- [4] James F. Blinn. Simulation of wrinkled surfaces. *Proceedings of SIGGRAPH'78*, pages 286–292, 1978.
- [5] Jules Bloomenthal. Medial-based vertex deformation. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH symposium on Computer animation*, pages 147–151. ACM Press, 2002.
- [6] Laurence Boissieux, Gergo Kiss, Nadia Magnenat-Thalmann, and Prem Kalra. Simulation of skin aging and wrinkles with cosmetics insight. In *Computer Animation and Simulation 2000*, pages 15–27, August 2000.
- [7] John E. Chadwick, David R. Haumann, and Richard E. Parent. Layered construction for deformable animated characters. volume 23, pages 243–252. ACM Press, 1989.
- [8] Jean Combaz and Fabrice Neyret. Painting folds using expansion textures. In *Pacific Graphics*, October 2002.
- [9] Stéphane Cotin, Hervé Delingette, and Nicholas Ayache. Real-time elastic deformations of soft tissues for surgery simulation. Technical Report 3511, INRIA, Projet Epidaure, October 1998.
- [10] Gilles Debunne. *Animation multirésolution d'objets déformables en temps-réel : application à la simulation chirurgicale*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, December 2000.
- [11] David R. Forsey. A surface model for skeleton-based character animation. *Second Eurographics Workshop on Animation and Simulation, Vienna, Austria*, pages 55–73, September 1991.
- [12] David R. Forsey and Richard H. Bartels. Hierarchical b-spline refinement. In *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 205–212. ACM Press, 1988.
- [13] Jean-Paul Gourret, Nadia Magnenat Thalmann, and Daniel Thalmann. Simulation of object and human skin deformations in a grasping task. volume 23, pages 21–30. ACM Press, 1989.
- [14] Sunil Hadap, Endre Bangerter, Pascal Volino, and Nadia Magnenat-Thalmann. Animating wrinkles on clothes. In *IEEE Visualization '99*, pages 175–182. IEEE Computer Society Press, October 1999.

- [15] D. Herbison-Evans. Nudes2 : A numeric utility displaying ellipsoid solids, version 2. *Computer Graphics*, 11(2) :354–356, 1978.
- [16] Doug L. James and Dinesh K. Pai. Dyrt : Dynamic response textures for real time deformation simulation with graphics hardware. volume 21, pages 582–585, San Antonio, TX, July 2002.
- [17] Hiroshi Kono and Etsuo Genda. Wrinkle generation model for 3d facial expression. *Sketches and Applications, SIGGRAPH'03*, August 2003.
- [18] Paul G. Kry, Doug L. James, and Dinesh K. Pai. Eigenskin : real time large deformation character skinning in hardware. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH symposium on Computer animation*, pages 153–159. ACM Press, 2002.
- [19] Thierry Lauthelier and Marc Neveu. Mélange de formes pour l'animation de personnages. application en production. In *6èmes journées du groupe de travail animation, simulation, systèmes dynamiques*, pages 38–51, October 1998.
- [20] J. P. Lewis, Matt Cordner, and Nickson Fong. Pose space deformation : A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In *Proceedings of SIGGRAPH'00, ACM Computer Graphics*, pages 165–172. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., July 2000.
- [21] Matthias Müller, Julie Dorsey, Leonard McMillan, Robert Jagnow, and Barbara Cutler. Stable real-time deformations. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH symposium on Computer animation*, pages 49–54. ACM Press, 2002.
- [22] Luciana Porcher Nedel. *Anatomic Modeling of Human Bodies Using Physically-Based Muscle Simulation*. PhD thesis, EPFL Lausanne, 1998.
- [23] Luciana Porcher Nedel and Daniel Thalmann. Real time muscle deformations using mass-spring systems. *Computer Graphics International 98*, 1998.
- [24] Luciana Porcher Nedel and Daniel Thalmann. Anatomic modeling of deformable human bodies. *The Visual Computer*, pages 306–321, 2000.
- [25] Stefano Pasquariello and Catherine Pelachaud. Greta : A simple facial animation engine. In *Proceedings of the 6th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications*, September 2001.
- [26] Alex Pentland and John Williams. Good vibrations : Modal dynamics for graphics and animation. volume 23, pages 215–222, 1989.
- [27] Basile Sauvage, Stefanie Hahmann, and Georges-Pierre Bonneau. Length preserving multiresolution editing of curves. *Computing*, to appear 2004.
- [28] Ferdi Scheepers, Richard E. Parent, Wayne E. Carlson, and Stephen F. May. Anatomy-based modeling of the human musculature. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 163–172. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [29] Karan Singh and Evangelos Kokkevis. Skinning characters using surface oriented free-form deformations. In *Graphics Interface*, pages 35–42, May 2000.
- [30] Marie-Luce Viaud and Hussein Yahia. Facial animation with wrinkles. In *Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, September 1992.
- [31] Pascal Volino and Nadia Magnenat-Thalmann. Fast geometrical wrinkles on animated surfaces. In *Seventh International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization (Winter School on Computer Graphics)*, February 1999.

- [32] Jane Wilhelms. Animals with anatomy. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(3) :22–30, May 1997.
- [33] Jane Wilhelms and Allen Van Gelder. Anatomically based modeling. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 173–180. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., August 1997.
- [34] Yin Wu, Prem Kalra, Laurent Moccozet, and Nadia Magnenat-Thalmann. Simulating wrinkles and skin aging. *The Visual Computer*, 15(4) :183–198, 1999.
- [35] Yin Wu, Prem Kalra, and Nadia Magnenat Thalmann. Simulation of static and dynamic wrinkles of skin. In *Proceedings of Computer Animation '96*, pages 90–97. IEEE Computer Society Press, June 1996.
- [36] Yin Wu, Nadia Magnenat Thalmann, and Daniel Thalmann. A plastic-visco-elastic model for wrinkles in facial animation and skin aging. In *Pacific Graphics*, pages 201–213, 1994.
- [37] A. Buttfield, *A new approach to rapid image morphing for lip motion synthesis*, 2003, 26th Australasian computer science conference in research and practice in information technology
- [38] J. Chai, J. Xiao, J. Hodgins, *Vision-based Control of 3D Facial Animation*, 2003, Eurographics/Siggraph Symposium on Computer Animation
- [39] P. Joshi, W. C. Tien, M. Desbrun, F. Pighin, *Learning Controls for Blend Shape Based realistic facial Animation*, 2003, Eurographics/Siggraph Symposium on Computer Animation
- [40] K. Kahler, J. Haber, H. Seidel, *Reanimating the Dead : Reconstruction of Expressive faces from Skull Data*, 2003, ACM Transactions on Graphics
- [41] H. Pyun, Y. Kim, W. Chae, H. W. Kang, S. Y. Shin, *An Example-Based Approach for Facial Expression Cloning*, 2003, Eurographics/Siggraph Symposium on Computer Animation
- [42] Q. Zhang, Z. Liu, B. Guo, H. Shum, *Geometry-Driven Photorealistic facial Expression Synthesis*, 2003, Eurographics/Siggraph Symposium on Computer Animation
- [43] C. bregler, L. Loeb, E. Chuang, H. Deshpande, *Turning to the masters : motions capturing cartoons*, 2002, Proceedings of Siggraph 2002, pp. 399-407
- [44] M. Byun, N. Badler, *FacEMOTE : Qualitative parametric Modifiers for Facial Animations*, 2002, Eurographics/Siggraph Symposium on Computer Animation
- [45] Piero Cosi, Emanuela Magno Caldognetto, Giulio Perin, Claudio Zmarich, *Labial Co-articulation Modeling for Realistic facial Animation*, 2002
- [46] S. Gachery, N. Magnenat-Thalmann, *Designing MPEG-4 facial Animation Tables for Web Applications*, 2002, Miralab, University of Geneva
- [47] K. Kahler, J. Haber, H. Yamauchi, H. Seidel, *Head shop : Generating animated head models with anatomical structure*, 2002, Eurographics/Siggraph Symposium on Computer Animation
- [48] I. S. Pandzic, *Facial Animation Framework for the Web and Mobile Platforms*, 2002, 7th International Conference on 3D Web Technology
- [49] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, *Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions*, 2001
- [50] J. D. Edge, S. Maddock, *Expressive Visual Speech using Geometry Muscle Functions*, 2001, Eurographics UK

- [51] T. A. Faruque, A. Kapoor, R. Kate, N. Rajput, L. V. Subramaniam, *Audio driven facial animation for audio-visual reality*, 2001, ICME 2001, Proceedings of IEEE International conference on multimedia and expo.
- [52] S. B. Gokturk, J. Y. Bouguet, R. Grzeszczuk, *A data-driven model for monocular face tracking*, 2001, IEEE International Conference on computer vision, pp. 701-708
- [53] J. Noh, U. Neumann, *Expression Cloning*, 2001, Siggraph
- [54] L. Revéret, Irfan Essa, *Visual Coding and Tracking of Speech Related Facial Motion*, 2001, IEEE International Workshop on Cues in Communication
- [55] D. DeCarlo, D. Metaxas, *Optical Flow Constraints on deformable models with applications to face tracking*, 2000, International Journal of Computer Vision, vol. 38, pp. 99-127
- [56] D. Hung, S. Huang, *Modeling Human Facial Expressions*, CS 718 Topics in Computer Graphics
- [57] L. Revéret, *Conception et évaluation d'un système de suivi automatique de gestes labiaux en parole*, Mémoire de thèse, INPG, Grenoble, 1999, pp. 1-34
- [58] S. Basu, N. Olivier, A. Pentland, *3D Modeling and Tracking of Human Lips Motions*, ICCV, 1998, pp. 337-343
- [59] D. DeCarlo, D. Metaxas, M. Stone, *An Anthropometric face Model Using variational Techniques*, 1998
- [60] T. Derose, M. Kass, T. Truong, *Subdivision Surfaces in Character Animation*, Siggraph proceedings, 1998, pp. 85-94
- [61] P. Eisert, B. Girod, *Analyzing Facial Expressions for Virtual Conferencing*, IEEE, Computer Graphics and Applications, 1998, vol. 18, no. 5, pp. 70-78
- [62] T. Ezzat, T. Poggio, Miketalk : *A talking facial display based on morphing visemes*, 1998, Proceedings of IEEE computer animation '98, pp. 96-102
- [63] B. Guenter, C. Grimm, D. Wood, H. Malvar, F. Pighin, *Making faces*, Siggraph proceedings, 1998, pp. 55-66
- [64] Jun-yong Noh, Ulrich Neumann, *A Survey of Facial Modeling and Animation Techniques*, 1998, USC Technical Report 99-705
- [65] F. Pighin, J. Hecker, D. Lischinski, R. Szeliski, D. H. Salesin, *Synthesizing Realistic Facial Expressions from Photographs*, Siggraph proceedings, 1998, pp. 75-84
- [66] A. Lanitis, C. J. Taylor, T. F. Cootes, *Automatic Interpretation and Coding of face Images Using Flexible Models*, 1997, IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, pp. 743-756
- [67] A. Löfqvist, *Theories and models of speech production*, 1997, In W. Hardcastle and J. Laver (Eds.), The Handbook of Phonetic Sciences, pp. 404-426
- [68] F. Pighin, J. Auslander, D. Lischinski, D. H. Salesin, E. Szeliski, *Realistic Facial Animation Using Image-based 3D Morphing*, 1997, Technical Report UW-CSE-97-01-03
- [69] F. Scheepers, R. Parent, W. Carlson, S. May, *Anatomy-based Modeling of the Human Musculature*, 1997, Proceedings of Siggraph
- [70] K. Arai, T. Kurihara, K. Anjyo, *Bilinear Interpolation for Facial Expression and Metamorphosis in Real-time Animation*, The Visual Computer, 1996, vol. 12 pp. 105-116
- [71] F. I. Parke, K. Waters, *Computer Facial Animation*, 1996, ISBN 1-56881-014-8

- [72] S. M. Seitz, C. R. Dyer, *View Morphing*, 1996, in Siggraph 1996 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pp. 21-30, ACM Siggraph 1996
- [73] H. Sera, S. Morishima, D. Terzopoulos, Physics-based Muscle Model for Moth Shape Control, IEEE International Workshop on Robot and Human Conversation, 1996, pp. 207-212
- [74] M. J. Black, Y. Yacoob, *Tracking and recognizing rigid and non-rigid facial motions using local parametric models of image motion*, 1995, International Conference on Computer Vision, pp. 374-381
- [75] Y. C. Lee, D. Terzopoulos, K. Waters, *Realistic face Modeling for Animation*, Siggraph proceedings, 1995, pp. 55-62
- [76] M. Hoch, G. Fleischmann, B. Girod, *Modeling and animation of facial expressions based on B-Splines*, 1994, The Visual Computer, vol. 11, pp. 87-95
- [77] P. Kalra, N. Magnenat-Thalmann, *Modeling of Vascular Expressions in facial Animation*, Computer Animation, 1994, pp. 50-58
- [78] C. L. Y. Wang, D. R. Forshey, Langwidere : *A New Facial Animation System*, *Proceedings of computer animation*, 1994, pp. 59-68
- [79] Y. Wu, N. magnenat-Thalmann, D. Thalmann, *A Plastic-Visco-Elastic Model for Wrinkles in facial Animation and Skin Aging*, Proc. 2nd Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Pacific Graphics, 1994
- [80] M. Cohen, D. Massaro, *Modeling co-articulation in synthetic visual speech*. In N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann editors, Model and technique in Computer Animation, 1993, pp. 139-156, Springer-Verlag, Tokyo
- [81] K. Waters, T. M. Levergood, *Decface : An automatic Lip-synchronization Algorithm for Synthetic Faces*, 1993, DEC. Cambridge Research Laboratory Technical Report Series
- [82] T. Beier, S. Neely, *Feature-based Image Metamorphosis*, 1992, Computer Graphics, Siggraph proceedings, vol. 26 pp. 35-42
- [83] P. Kalra, A. Mangili, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann, *Simulation of facial Muscle Actions Based on rational Free Form Deformations*, 1992, Eurographics, vol.11, pp. 59-69
- [84] S. Coquillard, *Extended Free-Form Deformation : A Sculpturing Tool For 3D Geometric Modeling*, Computer Graphics, 1990, vol. 24, pp. 187-193
- [85] D. Terzopoulos, K. Waters, *Physically-based Facial Modeling, Analysis and Animation*, J. of Visualization and Computer Animation, 1990, vol. 1, pp. 73-80
- [86] L. Williams, *Performance-driven facial animation*, 1990, Siggraph Proceedings, pp. 235-242
- [87] J. Kleiser, *A fast, efficient, accurate way to represent the human face*, 1989, Siggraph 1989 Course notes 22 : State of the art in Facial Animation
- [88] N. Magnenat-Thalmann, E. Primeau, D. Thalmann, *Abstract Muscle Action Procedures for Human face Animation*, 1988, Visual Computer
- [89] Monique nahas, Hervé Huitric, Michel Saintourens, *Animation of a B-Spline Figure*, 1988, Visual Computer
- [90] K. Waters, *A muscle model for animating three-dimensional facial expression*. In Maureen C. Stone, editor, Computer Graphics (Siggraph proceedings, 1987) vol. 21 pp. 17-24

- [91] S. M. Platt, *A Structural Model for Human face*, Ph. D. Thesis, University of Pennsylvania, 1985
- [92] S. Platt, N. Badler, *Animating Facial Expressions*, 1981, Computer Graphics
- [93] P. Ekman, W. V. Friesen, *Facial Action Coding System*, Consulting Psychologists Press, Palo Alto, CA, 1978
- [94] E. Catmull, *Subdivision Algorithm for the Display of Curved Surfaces*, Ph. D Thesis, University of Utah, 1974
- [95] F. I. Parke, *A Parametric Model for Human faces*, Ph. D. Thesis, University of Utah, Salt lake City, Utah, 1974, UTEC-CSc-75-047
- [96] F. I. Parke, *Computer Generated Animation of faces*, Proc. ACM annual conf., 1972
- [97] ISO/IEC 14496, Moving Picture Experts Group, *MPEG-4 International Standard*, www.cseit.it/mpeg/
- [98] Garg A. and P.S. Walker. Prediction of total knee motion using a 3d computer graphics model. *Journal of Biomechanics*, 23(1) :45–58, 1990.
- [99] E.M. Abdel-Rahman and M.S. Hefzy. A two-dimensional dynamic anatomical model for the human knee joint. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 115(9) :357–365, November 1993.
- [100] T.P. Andriacchi, R.P. Mikosz, S.J. Hampton, and J.O. Galante. Model studies of the stiffness characteristics of the human knee joint. *Journal of Biomechanics*, 16 :23–29, 1983.
- [101] P. Beylot, P. Gingsins, P. Kalra, N. Magnenat Thalmann, W. Maurel, D. Thalmann, and J. Fasel. 3d interactive topological modeling using visible human dataset. *Computer Graphics Forum*, 1998.
- [102] L. Blankevoort, R. Huiskes, and A. de Lange. The envelope of passive knee joint motion. *Journal of Biomechanics*, 21 :705–720, 1988.
- [103] L. Blankevoort, R. Huiskes, and A. Delange. *An in-vitro Study of the Passive Kinematic Behaviour of the Human Knee Joint*. R.L.Spilker, December 1984.
- [104] E.Y. Chao. Justification of triaxial goniometer for the measurement of joint rotation. *Journal of Biomechanics*, 13 :989–1006, 1980.
- [105] J.X. Chen, H. Wechsler, Y. Zhu, E.B. MacMahon, and D.V. Carmines. Knee surgery assistance : Patient model reconstruction, motion simulation, and biomechanical visualization, 2002. submitted to IEEE Transactions on Biomedical Engineering.
- [106] R.B. Davis, S. Ounpuu, D.J. Tyburski, and J.R. Gage. A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10(5) :575–587, 1991.
- [107] R.A. Denham and R.E.D. Bishop. Mechanics of the knee and problems in reconstructive surgery. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 60-B(3) :345–352, 1978.
- [108] R.G. Edwards, J.F. Lafferty, and K.O. Lang. Ligament strain in the human knee joint. *ASME Transactions, Journal of Basic Engineering*, 92 :131–136, 1970.
- [109] J.R. Ensberg, S.K. Grimston, and J.H. Wackwitz. Predicting talocalcaneal joint attitudes from talocalcaneal/talocrural joint attitudes. *Journal of Orthopaedic Research*, 6 :749–757, 1988.
- [110] V.H. Frankel, A.H. Burstein, and D.B. Brooks. Biomechanics of internal derangement of the knee. pathomechanics as determined by analysis of the instant centres of motion. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 53-A :945–962, July 1971.

- [111] J. Goodfellow and J. O'Connor. The mechanics of the knee and prosthesis design. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 60-B :358–369, 1978.
- [112] T. Géraud, P.Y. Strub, and J. Darbon. Segmentation d'images en couleur par classification morphologique non supervisée. In the Faculty of Sciences at Ibn Zohr University, editor, *International Conference on Image and Signal Processing (ICISP'2001)*, pages 387–394, May 2001.
- [113] E.S. Grood and M.S. Hefzy. An analytical technique for modelling knee joint stiffness - part i : Ligamentous forces. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 104 :330–337, November 1982.
- [114] E.S. Grood and W.J. Suntay. A joint coordinate system for the clinical description of three dimensional motions : Application to the knee. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 105 :136–144, 1983.
- [115] K. Haris, S.N. Estradiadis, N. Maglaveras, and A.K. Katsaggelos. Hybrid image segmentation using watersheds and fast region merging. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(12) :1684–1699, 1998.
- [116] M.S. Hefzy and E.S. Grood. An analytical technique for modelling knee joint stiffness - part ii : Geometrical non-linearities. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 105 :145–153, 1983.
- [117] M.S. Hefzy and E.S. Grood. Review of knee models. *Applied Mechanics Review*, 41(1) :1–13, January 1988.
- [118] M. Herbin. *Contribution au traitement numérique de données en imagerie multimodale*. PhD thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2001.
- [119] M.P. Kadaba, H.K. Ramakrishnan, and M.E. Wootten. Measurement of lower extremity kinematics during level walking. *Journal of Orthopaedic Research*, 8 :383–392, 1990.
- [120] P. Kalra, P. Beylot, P. Gingsins, N. Magnenat-Thalmann, P. Volino, P. Hoffmeyer, J. Fasel, and F. Terrier. Topological modeling of human anatomy using medical data. In *Computer Animation '95 proceedings*, pages 172–180. IEEE Computer Society Press, 1995.
- [121] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snake : Active contour model. *International Journal of Computer Vision*, 1(4) :321–331, 1987.
- [122] K.R. Kaufman, K.N. An, and E.Y.S. Chao. A dynamic mathematical model of the knee joint applied to isokinetic exercise. In *Computational Methods in Bioengineering*, volume 9, pages 157–167. ASME Biomechanical Engineering Division, R.L. Spilker, 1988.
- [123] D.B. Kettlekamp, R.J. Johnson, G.L. Smidt, E.Y.S. Chao, and M. Walker. An electrogoniometric study on knee motion in normal gait. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 52-A :775–790, 1970.
- [124] L. Kocsis. More precise measurement method for 3d gait analysis. *Third Conference on Mechanical Engineering Proceedings*, pages 215–134, Springer 2002.
- [125] P. Komdeur, F.E. Pollo, and R.W. Jackson. Dynamic knee motion in anterior cruciate impairment : a report and case study. *Baylor University Medical Center Proceedings 2002*, 15 :257–259, 2002.
- [126] A.S. Levens, C.E. Berkeley, V.T. Inman, and J.A. Blosser. Transverse rotation of the segments of the lower extremity in locomotion. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 30-A :859–872, 1948.

- [127] J.L. Lewis and W.D. Lew. A note on the description of articulating joint motion. *Journal of Biomechanics*, 10 :675–678, 1977.
- [128] J.L. Lewis and W.D. Lew. A method for locating an optimal “fixed” axis of rotation for the human knee joint. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 100 :187–193, 1978.
- [129] P.G. Maquet and G.A. Pelzer. Evolution of the maximum stress in osteoarthritis of the knee joint. *Journal of Biomechanics*, 10 :107–117, 1977.
- [130] K.L. Markolf, J.S. Mensch, and H.C. Amstutz. Stiffness and laxity of the knee—the contributions of the supporting structures. a quantitative in vitro study. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 58-A(9) :583–594, July 1976.
- [131] W.D. McLeod and M.J. Cross. Knee joint axis of rotation. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology*, 1974.
- [132] R.J. Minns. Forces at the knee joint : Anatomical considerations. *Journal of Biomechanics*, 14(9) :633–643, 1981.
- [133] S. Miyazaki and A. Ishida. New mathematical definition and calculation of axial rotation of anatomical joints. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 113(3) :270–275, September 1991.
- [134] M.H. Moeinzadeh, A.E. Engin, and N. Akkas. Two-dimensional dynamic modelling of human knee joint. *Journal of Biomechanics*, 16(4) :253–264, 1983.
- [135] J.B. Morrison. The mechanics of the knee joint in relation to normal walking. *Journal of Biomechanics*, 3 :51–61, 1970.
- [136] H.F. Mosely. Disorders of the knee. *Ciba Clinical Symposia*, 5(6), 1953.
- [137] Shinno N. Static-dynamic analysis of movement of the knee. *Tokushima Journal of Experimental Medicine*, 8(1) :101–110, 1961.
- [138] O. Nocent. Quaternions : Une représentation alternative des rotations. Technical report, LERI - Université Reims Champagne-Ardenne, 2003.
- [139] M. Pokric, N.A. Thacker, M.L.J. Scott, and A. Jackson. Multi-dimensional medical image segmentation with partial voluming. In *Fourth International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention Proceedings(MICCAI 2001)*, pages 1293–1294, 2001.
- [140] M.H. Pope R. Crowninshield, , and R.J. Johnson. An analytical model of the knee. *Journal of Biomechanics*, 9 :397–405, 1976.
- [141] H.K. Ramakrishnan and M.P. Kadaba. On the estimation of joint kinematics during gait. *Journal of Biomechanics*, 24 :969–977, 1991.
- [142] W.P. Seering, R.L. Piziali, D.A. Nagel, and D.J. Schurman. The function of the primary ligaments of the knee in varus-valgus and axial rotation. *Journal of Biomechanics*, 13 :785–794, 1980.
- [143] G. Selvik. Roentgen stereophotogrammetry - a method for the study of the kinematics of the skeletal system. *Acta Orthopaedica Scandinavica Suppl.*, 232 :1–51, 1989.
- [144] K. Shoemake. Animating rotation with quaternion curves. *ACM SIGGRAPH '85*, 19(3) :245–254, 1985.
- [145] G.L. Smidt. Biomechanical analysis of knee flexion and extension. *Journal of Biomechanics*, 6 :79–92, 1973.
- [146] D.H. Sutherland, R.A. Olshen, E.N. Biden, and M.P. Wyatt. *The development of mature walking*. London : Mac Keith Press, 1988.

- [147] S.T. Tumer and A.E. Engin. three-body segment dynamic model of the human knee. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 115(4) :350–356, 1993.
- [148] C. Wang and P.S. Walker. Rotary laxity of the human knee. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 65-A :161, 1974.
- [149] C.J. Wang, P.S. Walker, and B. Wolf. The effects of flexion and rotation on the length patterns of the ligaments of the knee. *Journal of Biomechanics*, 6 :587–596, 1973.
- [150] J. Weickert. Efficient image segmentation using partial differential equations and morphology. Technical report, Universität of Mannheim, 2000.
- [151] J. Wismans, F. Veldpaus, J. Janssen, A. Huson, and P. Struben. A three-dimensional mathematical model of the knee joint. *Journal of Biomechanics*, 13 :677–685, 1980.
- [152] C. Wongchaisuwat, H. Hemami, and H.J. Buchner. Control of sliding and rolling at natural joints. *ASME Transactions, Journal of Biomechanical Engineering*, 106 :368–375, November 1984.
- [153] M.R. Yeadon. The simulation of aerial movement - i. the determination of orientation angles from film data. *Journal of Biomechanics*, 23 :59–66, 1990.
- [154] N. Ying and W. Kim. Use of dual euler angles to describe general spatial movements of human joints. In *2001 Summer Bioengineering Conference Proceedings*, volume 50, pages 273–274, Snowbird, Utah, Summer 2001.
- [155] N. Ying and W. Kim. Use of dual euler angles to quantify the three-dimensional joint motion and its application to the ankle joint complex. *Journal of Biomechanics*, 35(12) :1647–1657, December 2002.
- [156] K. Anjyo, Y. Usami, and T. Kurihara. A simple method for extracting the natural beauty of hair. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1992*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 111–120, August 1992.
- [157] Y. Bando, B-Y. Chen, and T. Nishita. Animating hair with loosely connected particles. *Computer Graphics Forum*, 22(3) :411–418, 2003. Proceedings of Eurographics’03.
- [158] J. Berney and J. K. Redd. A tale of fur, costumes, performance, and integration. *SIGGRAPH Course 14*, 2000.
- [159] F. Bertails, T-Y. Kim, M-P. Cani, and U. Neumann. Adaptive wisp tree - a multiresolution control structure for simulating dynamic clustering in hair motion. In *ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, page ?, July 2003.
- [160] J. T. Chang, J. Jin, and Y. Yu. A practical model for hair mutual interactions. In *ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pages 73–80, July 2002.
- [161] A. Daldegan, N. M. Thalmann, T. Kurihara, and D. Thalmann. An integrated system for modeling, animating and rendering hair. *Computer Graphics Forum*, 12(3) :211–221, 1993.
- [162] R. Falk and L. R. Sande. Shrek : The story behind the screen. *SIGGRAPH Course Note 19*, 2001.
- [163] M. Fong. Animating monster fur. *SIGGRAPH Course 36 : From Ivory Tower to Silver Screen*, 2001.
- [164] S. Hadap and N. Magnenat-Thalmann. Interactive hair styler based on fluid flow. In *Computer Animation and Simulation ’00*, pages 87–100, August 2000.
- [165] S. Hadap and N. Magnenat-Thalmann. Modeling dynamic hair as a continuum. *Computer Graphics Forum*, 20(3) :329–338, 2001. Proceedings of Eurographics’01.

- [166] T-Y. Kim and U. Neumann. A thin shell volume for modeling human hair. In *Computer Animation 2000*, IEEE Computer Society, pages 121–128, 2000.
- [167] C. Koh and Z. Huang. Real-time animation of human hair modeled in strips. In *Computer Animation and Simulation'00*, pages 101–112, September 2000.
- [168] C. Koh and Z. Huang. A simple physics model to animate human hair modeled in 2D strips in real time. In *Computer Animation and Simulation '01*, pages 127–138, September 2001.
- [169] D-W. Lee and H-S. Ko. Natural hairstyle modeling and animation. *Graphical Models*, 63(2) :67–85, March 2001.
- [170] E. Plante, M-P. Cani, and P. Poulin. A layered wisp model for simulating interactions inside long hair. In Nadia Magnenat-Thalmann Marie-Paule Cani, Daniel Thalmann, editor, *Computer Animation and Simulation 2001Proceeding*, Computer Science. EUROGRAPHICS, Springer, sep 2001. Proceedings of the EG workshop of Animation and Simulation.
- [171] E. Plante, M-P. Cani, and P. Poulin. Capturing the complexity of hair motion. *Graphical Models (Academic press)*, 64(1) :40–58, january 2002. submitted Nov. 2001, accepted, June 2002.
- [172] R. Rosenblum, W. Carlson, and E. Tripp. Simulating the structure and dynamics of human hair : Modeling, rendering, and animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 2(4) :141–148, 1991.
- [173] K. Ward and M. C. Lin. Adaptive grouping and subdivision for simulating hair dynamics. In *Pacific Graphics*, September 2003.
- [174] K. Ward, M. C. Lin, J. Lee, S. Fisher, and D. Macri. Modeling hair using level-of-detail representations. In *International Conference on Computer Animation and Social Agents*, May 2003.
- [175] Y. Watanabe and Y. Suenaga. A trigonal prism-based method for hair image generation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12(1) :47–53, 1992.
- [176] Z. Xu and X. D. Yang. V-hairstudio : an interactive tool for hair design. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 21(3) :36–42, May / June 2001.
- [177] McConville J. T. Reynolds H. M. et Ypung J. M. Chandler R. F., Clauser C. E. Investigation of inertial properties of the human body. Technical Report AMRL Technical report 74-137, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio., 1975.
- [178] McConville J.T. Clauser C.E. and Young J.W. Weight, volume and center of mass of segments pf the human body. Technical Report AMRL Technical report 69-70, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio., November 1969.
- [179] Winter D.A. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley and Sons,Inc., second edition, Toronto, 1990.
- [180] Hinrichs R. N. Adjustments to the segment center of mass proportions of clausser et al. *Journal of Biomechanics*, 23-9 :949–951, 1990.
- [181] Erdmann W.S. Geometric and inertial data of the trunk in adult males. *Journal of Biomechanics*, 30-7 :679–688, 1997.
- [182] Morlock M. Yeadon M.R. The appropriate use of regression equations for the estimation of segmental inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 22-6/7 :683–689, 1989.

- [183] Seluyanov V. Zatsiorsky V. and Chugunova LG. Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments. In *Contemporary problems of biomechanics Moscow*, pages 273–291. Mir, 1990.