

## *Thème 3 : Rendu photo réaliste*

Contributions de :

Vincent VIVANLOC (IRIT)

Mathias PAULIN (IRIT)

Jean-Pierre JESSEL (IRIT)



# Table des matières

<b>Chapitre 1 Animation et rendu de peau</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Animation de la peau et des muscles . . . . .	3
1.2.1 Présentation . . . . .	3
1.2.2 Anatomie des os et des muscles . . . . .	5
1.2.3 Modélisation du corps humain . . . . .	5
1.2.4 Animation par squelette . . . . .	8
1.2.5 Enrobage . . . . .	10
1.3 Animation et rendu des rides et ridules . . . . .	15
1.3.1 Anatomie de la peau . . . . .	15
1.3.2 Animation des rides . . . . .	16
1.3.3 Rendu des ridules . . . . .	18
1.4 Rendu de la peau par approches phénoménologiques et surfaciques . . . . .	19
1.4.1 Modèle phénoménologique . . . . .	19
1.4.2 Modèle mesoscopique surfacique . . . . .	20
1.5 Rendu de la peau par approches subsurfaciques . . . . .	22
1.5.1 Modèle mesoscopique subsurfacique : réflectance et transmittance . . . . .	22
1.5.2 Modèle mesoscopique subsurfacique : dispersion . . . . .	27
1.6 Tableaux récapitulatifs . . . . .	30
1.7 Conclusion . . . . .	31
<b>Chapitre 2 Animation et rendu des cheveux</b>	<b>33</b>
2.1 Introduction . . . . .	33
2.1.1 Anatomie du cheveu . . . . .	33
2.1.2 Problématiques . . . . .	33
2.1.3 Premiers modèles de chevelure . . . . .	33
2.2 Génération de la coiffure . . . . .	35
2.2.1 Placement des cheveux sur le cuir chevelu . . . . .	35
2.2.2 Modélisation de la coiffure . . . . .	35

2.3	Animation d'un cheveu . . . . .	35
2.3.1	Modèle du cantilever . . . . .	36
2.3.2	Animation . . . . .	36
2.3.3	Limites . . . . .	38
2.4	Animation de chevelure par modèles discontinus . . . . .	38
2.4.1	Modèles de maillages . . . . .	38
2.4.2	Modèle hiérarchique et adaptatif de mèches . . . . .	39
2.5	Animation de chevelure par modèles continus . . . . .	40
2.5.1	Modèle basé sur la dynamique des fluides . . . . .	40
2.5.2	Modèle de maillage reconstruit dynamiquement . . . . .	42
2.6	Rendu d'un cheveu . . . . .	43
2.6.1	Géométrie . . . . .	43
2.6.2	Modèle d'éclairage anisotropique d'un cheveu . . . . .	43
2.7	Rendu des cheveux courts . . . . .	44
2.7.1	Du modèle de matériau à la texture volumique . . . . .	44
2.7.2	Application de la texture volumétrique . . . . .	45
2.7.3	Limites . . . . .	45
2.8	Rendu des cheveux longs . . . . .	46
2.8.1	Rendu de chevelure . . . . .	46
2.8.2	Ombrage de la chevelure . . . . .	46
2.9	Tableaux récapitulatifs . . . . .	48
2.10	Conclusion . . . . .	48
<b>Chapitre 3 Animation et rendu de vêtements</b>		<b>51</b>
3.1	Introduction . . . . .	51
3.2	Animation du tissu par maillage masse-ressort . . . . .	51
3.2.1	Premiers modèles . . . . .	51
3.2.2	Maillages masse-ressort . . . . .	53
3.3	Amélioration du modèle masse-ressort . . . . .	55
3.3.1	Rendre un comportement réaliste . . . . .	56
3.3.2	Variantes sur le modèle masse-ressort . . . . .	57
3.3.3	Détection des collisions et autocollisions . . . . .	58
3.3.4	Résolution du système . . . . .	59
3.4	Rendu de tissu . . . . .	60
3.4.1	Tissu uni . . . . .	61
3.4.2	Tissu imprimé . . . . .	61
3.4.3	Tissu côtelé . . . . .	61

---

3.5 Tableaux récapitulatifs . . . . .	62
3.6 Conclusion . . . . .	63
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>65</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>



# Table des figures

1.1	Vue générale de la simulation de la peau, des muscles et des os . . . . .	4
1.2	Modèle en couche de Jimenez . . . . .	7
1.3	Squelette et os racine . . . . .	8
1.4	Configuration en pose . . . . .	9
1.5	Os, offset et sommet de la peau . . . . .	11
1.6	Enrobage rigide . . . . .	12
1.7	Enrobage en action . . . . .	13
1.8	Défauts d'enrobage . . . . .	14
1.9	Sauvegarde de la surface des sections . . . . .	14
1.10	Implémentation avec masques d'éclairage . . . . .	19
1.11	Eclairage rasant . . . . .	20
1.12	BRDF . . . . .	21
1.13	Fonctions de phases et approximations de Schlick . . . . .	23
1.14	Modèle de Hanrahan et Krueger . . . . .	24
1.15	Modèle de Kubelka-Munk . . . . .	24
1.16	Evaluation de la composante de dispersion primaire . . . . .	26
1.17	Généralisation de la BRDF par la BSSRDF . . . . .	28
1.18	Résolution de la BSSRDF par lancé de rayon . . . . .	29
1.19	Approximation de la diffusion par dipôle . . . . .	30
2.1	Vue générale de la simulation de cheveux . . . . .	34
2.2	Placement des cheveux selon Bando et al. . . . .	36
2.3	Extrusion des mèches à l'aide des isoparamétriques d'une NURBS . . . . .	37
2.4	Modèle de force d'attraction/répulsion. . . . .	39
2.5	Modèle AWT : géométrie et animation multi-résolution . . . . .	40
2.6	Modélisation de coiffure à l'aide de primitives . . . . .	41
2.7	Modèle de Kajiya-Kay . . . . .	43
2.8	Calcul de l'ombrage de la chevelure . . . . .	47
3.1	Vue générale de la simulation des vêtements . . . . .	52
3.2	Agencement des ressorts pour un tissu . . . . .	54
3.3	Subdivision de Villard et Borouchaki . . . . .	55
3.4	Correction de l'élongation en position et en vitesse . . . . .	56
3.5	Modèle de force de courbure appliqué au tissu . . . . .	57
3.6	Tricot rendu en temps interactif par BTF . . . . .	62





# Liste des tableaux

1.1	Données pour le modèle subsurfacique de peau . . . . .	27
1.2	Animation de peau : comparatif des méthodes . . . . .	30
1.3	Rendu de peau : comparatif des méthodes . . . . .	31
2.1	Animation de cheveux : comparatif des méthodes . . . . .	48
2.2	Rendu de cheveux : comparatif des méthodes . . . . .	48
3.1	Animation de tissu : comparatif des méthodes . . . . .	62
3.2	Rendu de tissu : comparatif des méthodes . . . . .	63



# Introduction

## But du document

De nombreuses applications de réalité virtuelle sembleraient bien vides sans un être humain, ne serait-ce que virtuel. La représentation d'un personnage soulève un grand nombre de problèmes de modélisation, d'animation, de rendu et de comportement.

Ce rapport tente de faire le point sur les différents modèles de rendu et d'animation applicables à l'humain virtuel. Les modèles de rendu liés aux calculs de l'illumination, seront accompagnés de modèles d'animation. Ces deux thèmes sont en effet fortement imbriqués, le choix de l'un influençant ou interdisant le choix de l'autre. Toutefois, par animation, on entend les modèles d'animation de la peau, des vêtements ou des cheveux. Ceux-ci sont éloignés des problématiques de mouvement de haut niveau, liés à l'analyse et à la capture de mouvement humain ou à la vie artificielle.

La plupart de ces techniques ont été introduites lors de la réalisation de film d'animation. Cependant la programmabilité des cartes graphiques actuelles permet d'envisager leur application dans un contexte temps réel.

## Contenu du document

Ce document s'articule autour de trois grandes parties, la peau, les cheveux et les vêtements, qui seront examinées à travers un modeste état de l'art des modèles existants.

Que ce soit pour la peau, les vêtements ou les cheveux, la complexité géométrique de leur microstructure (fibres du tissu, milieu cellulaire du derme) conduit souvent à créer des modèles approchés de leur macrostructure (maillages masse-ressort) voire de leur mesostructure. La mesostructure est la structure apparente formée à la fois par la microstructure (la structure atomique des fibres) et la macrostructure (le tissage des fils).

Or cette approche génère un écart de comportement tant au niveau de l'animation que du rendu, entre la microstructure et la mesostructure adoptée. Après avoir décrit les modèles de base, on exposera ceux qui tentent de répondre à ce dilemme : comment imposer un mouvement et un rendu cohérent dans sa globalité à partir d'une structure localisée ?

## Animation et rendu de la peau

L'enrobage permet de recouvrir le squelette de l'humain virtuel d'une peau synthétique. Cette méthode éprouvée sera étudiée dans le chapitre concernant l'animation de la peau. Lorsque l'humain virtuel nous fait face, son visage aussi inexpressif que parfait nous en dit long sur le travail qu'il est possible d'accomplir en rendu de la peau, de la structure cellulaire aux rides, de la dispersion subsurfacique aux BTF (chapitre 1).

## **Animation et rendu des cheveux**

Un humain virtuel porte souvent une coiffe pour cacher sa calvitie et lorsqu'il a la chance d'avoir des cheveux, même au feu de l'action, il n'est jamais décoiffé. Après avoir isolé le cas les cheveux ras rendus par texture volumique, le rendu et l'animation des cheveux longs seront décrits, depuis la corde formée de ressorts aux modèles particuliers continus inspirés par l'astrophysique et la physique des fluides (chapitre 2).

## **Animation et rendu des vêtements**

Si généralement les humains virtuels sont habillés d'armures et les humaines de juste-au-corps, la simulation de vêtements peut alors les aider à améliorer leurs garde-robes. Les problèmes viennent de la complexité du maillage masse-ressort et de la difficulté à lui imprimer un mouvement réaliste (chapitre 3).

# 1

## Animation et rendu de peau

### 1.1 Introduction

L'animation de la peau est liée à celle des os et des muscles. Le modèle le plus courant est le modèle d'enrobage, présenté plus loin.

Toutefois, dans un cadre d'études biomécaniques où la précision prend le pas sur la performance, de nombreux modèles sont inspirés par l'anatomie d'un corps humain. L'animation d'un humain virtuel est liée à une bonne définition des muscles et de la peau sous forme de modèles de matériaux déformables. L'animation du squelette est contrainte par une définition réaliste d'un modèle hiérarchique, où la complexité des mouvements articulaires doit être respectée.

De la même manière, l'industrie cosmétique est à la recherche de modèle d'éclairage subsurfacique réaliste. Allié à un modèle de ridules et rides à travers une description explicite, ces modèles rendront d'autant plus la peau réaliste.

### 1.2 Animation de la peau et des muscles

#### 1.2.1 Présentation

Pour les premiers modèles géométriques, la géométrie était explicitée pour chaque clé d'animation. Si le rendu est rapide, le principal désavantage est la place occupée en mémoire de l'animation : le nombre de modèles est important pour chaque animation.

L'animation par squelette permet de réduire sensiblement la place mémoire occupée. A chaque personnage est associé un squelette et une peau. Dans un premier temps, l'animation par squelette est appliquée : la position de chaque os du squelette est modifiée. La phase d'enrobage modifie ensuite les coordonnées de la peau calculées en fonction de la position de chaque os calculée précédemment. Comparée à la méthode précédente, les calculs sont certes plus importants mais l'animation est réduite aux seules transformations associées aux os.

L'animation par squelette sera décrite dans la première partie et l'enrobage sera abordé en seconde partie. En dernière partie, des méthodes d'améliorations de l'aspect seront évoquées. La position des sommets servant de référence est calculée lorsque le personnage est configuré pour une certaine position, des défauts peuvent apparaître dans des configurations singulières, notamment si la torsion entre deux os est trop importante.

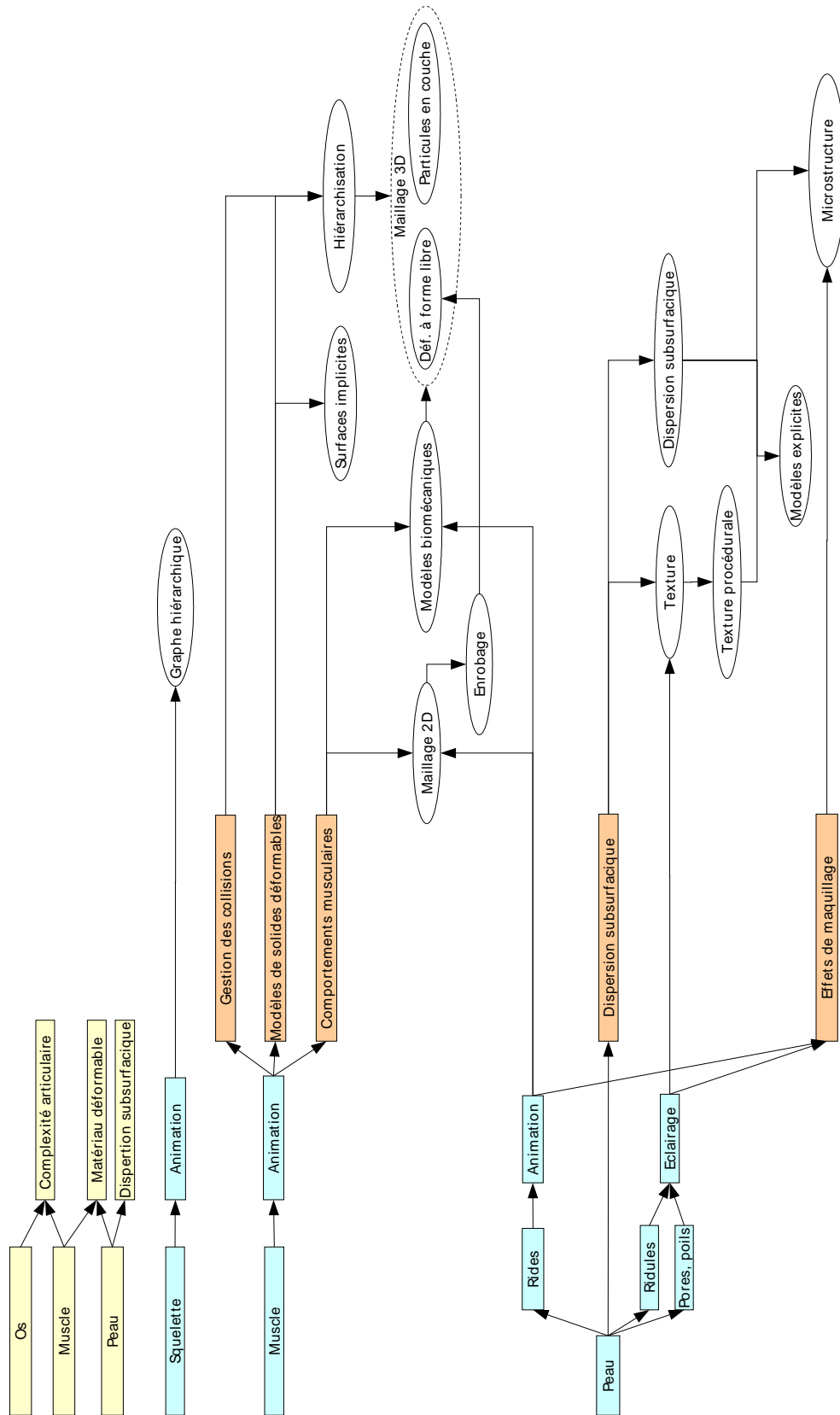


FIG. 1.1 – Vue générale de la simulation de la peau, des muscles et des os

## 1.2.2 Anatomie des os et des muscles

### Squelette

Un corps est composé d'environ 200 os reliés par une centaine d'articulation et 639 muscles. Les mouvements qui en résultent n'en sont que très difficile à modéliser. Par exemple, la marche n'utilise pas moins de 90 muscles et 55 os. Si pour une application de biomécanique, il sera nécessaire de modéliser ces entités de manière réaliste, une animation temps réel pourra se contenter d'un modèle largement simplifié, exposé ci-dessous.

### Muscles

La forme des muscles peut être classés suivant deux grands familles, les fusiformes et les complexes. De la même manière, le comportement des muscles extenseurs ou fléchisseurs peut être modélisé selon trois composantes : physique, géométrique et contrôle de l'animation à un niveau supérieur à travers une fonction d'activation [Hin94]. Deux types de déformations sont isolés : cinétiques et dynamiques. L'état cinétique du squelette détermine l'élongation ou la contraction des muscles pour simuler le mouvement correspondant. La contraction du muscle et donc la force exercée par le muscle, est directement déterminée par une fonction d'activation. Cette fonction représente le taux de contraction du muscle au cours du temps, propre à chaque muscle. Autrement, les déformations dynamiques ne concernent souvent que certaines parties charnues du corps qu'on omet de nommer par décence.

## 1.2.3 Modélisation du corps humain

### Squelette

Un squelette rigide articulé se présente sous la forme d'un assemblage de segments rigides, les os reliés entre eux par des articulations, rotules. Plusieurs travaux se sont penchés sur la représentation optimale d'un squelette. On citera par ordre d'évolution, l'assemblage par contrainte et le graphe hiérarchique. Ce dernier utilise une structure arborescente de segments, les os, permettant de représenter les liens entre les différents éléments du squelette [CHP89].

Le squelette utilisé en animation est la version épurée du squelette humain. La plupart des os sont présents, tels que la colonne vertébrale, les bras, le fémur ou encore les tibias. Si les mains sont représentées de façon réaliste, toutes les phalanges étant présentes, les pieds sont souvent réduits à leur strict minimum, les personnages étant le plus souvent chaussés.

Il existe des représentations par graphe plus générales, mais plus complexes [BHBK92]. Concernant les degrés de liberté, seules les rotations autour des trois axes seront considérées et pourront être restreintes à un intervalle donné.

### Muscles

L'animation d'un personnage fait généralement abstraction de la simulation des muscles pour des raisons de simplicité. Cependant, les muscles doivent être simulés pour une approche de l'animation par des méthodes dynamiques, comportementales (actionneurs). Une hiérarchisation en couche permet d'améliorer le comportement et le traitement des collisions. De la même manière, les rides sont représentés par des maillages déformés par des primitives d'expression faciale.

### Modèles simplifiés

**Déformation de forme libre** Les muscles sont définis par un ensemble d'opérations de déformations de formes libres, *Free Form Deformation, FFD*. Ce modèle de muscle utilise des données kinésiologiques (élasticité, contractilité) et se propose de simuler les muscles fléchisseurs et extenseurs supposés actifs ainsi que les tendons passifs. Ces éléments passifs freineront le mouvement en réagissant aux différentes forces appliquées à l'entité virtuelle [CHP89]. Un modèle géométrique de muscles peut être basé sur des ovoïdes pour les muscles fusiformes et des surfaces rationnelles, *NURBS* pour les muscles complexes [SPCM97].

**Masse-ressort centré autour d'un axe** Les systèmes de masse-ressorts s'appliquent dans ce cadre et sont capables de déterminer et de répondre aux collisions [Gas89]. La structure est constituée de ressorts disposés en étoile autour d'un noyau rigide assimilé à l'os. Des corps plus ou moins déformables sont définis en fonction de la forme du noyau, ainsi que de la répartition et la rigidité des ressorts. Ce modèle de corps déformable apporte un gain considérable en temps de calcul, ainsi qu'une détection et un traitement efficaces des collisions.

**Surface implicite** Un squelette permet d'obtenir un contrôle efficace des déformations des surfaces implicites. une formulation implicite permet d'obtenir des surfaces de contact définies par un squelette [Gas93]. La surface  $S$  est décrite par des fonctions de potentiel  $f_i$  liées au squelette.

$$S = \{P \in \mathbb{R}^3 / f(P) = 1\}$$

avec  $f(P) = \sum_i f_i(P)$ . Les points à l'intérieur de l'objet ont un potentiel inférieur ou égal à 1. En un point de la surface de l'objet, la normale à la surface est donnée par le gradient de la fonction de potentiel. Diverses déformations peuvent être modélisées par la dérivée de cette fonction de potentiel. Pour un objet élastique, la dérivée est constante alors qu'elle augmente fortement pour un objet inélastique.

Lors d'une collision, la déformation est calculée en modifiant la fonction de potentiel. La propagation de la déformation s'effectuant de manière heuristique, rend difficile le contrôle de l'aspect du volume après la déformation. Enfin, la hiérarchie dynamique permet de réduire sensiblement le nombre de particules car elles sont ainsi subdivisées lorsque la différence de pression avec une de leurs voisines est trop importante. Lorsque une région est stable, il convient de regrouper les particules selon un critère de densité et de sphéricité.

Les surfaces implicites sont appliquées à la génération de muscles, à travers des primitives, les métaboules, rattachées aux différentes articulations du squelette [MTH<sup>+</sup>96]. Un des défauts des surfaces implicites est leur tendance à tendre vers des surfaces fortement lissées. Deux types de primitives de volume sont alors utilisées : mélangeantes et non-mélangeantes. En déformant ces primitives, on peut simuler le comportement des os et muscles. De plus, cinq paramètres permettent de générer automatiquement des modèles humains de différentes tailles et dimensions. La modélisation des muscles a été délaissée à cause de sa paramétrisation difficile et sa faible dépendance à un modèle physique.

**Modèles réalistes** Ces modèles étendent le principe des déformations de formes libres en y injectant des données biomécaniques.

**Éléments finis** Afin d'obtenir un comportement plus précis, les propriétés et la géométrie des tissus musculaires sont approchés à l'aide d'éléments finis [CZ92]. La forme des muscles au repos est reconstruite à partir des images de résonance magnétique nucléaire et synthétisés à l'aide d'une grille de voxels. Les valeurs des forces produites lors de la contraction peuvent être issues de modèles biomécaniques [Zaj89]. Les travaux se focalisent souvent une des articulations les plus complexes du corps humain, à savoir l'épaule et le bras [MTH<sup>+</sup>96].



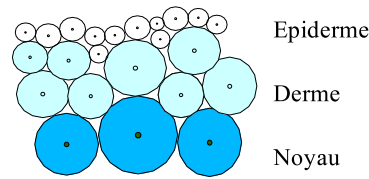


FIG. 1.2 – Modèle en couche de Jimenez

**Modèle de déformation musculaire** Les déformations cinétiques sont modélisées par des ressorts, dont la force est contrôlée en modifiant sa raideur ou son élongation. Un ressort multiphase peut être envisagé et permet de définir une fonction dite fonction d'effort [Hin94].

Pour les déformations dynamiques, une bijection entre les points de contrôle de la FFD et les noeuds d'un maillage masse-ressort (gel) permet alors de modifier la forme sous-jacente.

## Peau

L'enrobage, c'est à dire l'application de la peau sur le squelette est définie dans les sections suivantes.

L'extension de ce modèle s'effectue dans le cadre de la simulation de corps déformable. Principalement sous la forme de maillages tridimensionnels masse-ressorts, ces modèles sont limités par le temps de calcul nécessaire. Une certaine hiérarchie permet de limiter le nombre de particules du gel, et sera utile pour implémenter une subdivision/regroupement dynamique. Les masses sont affectées dynamiquement et la subdivision du maillage s'effectue quand une déformation est censée apparaître [MC96]. Par ailleurs, il est difficile de simuler des modèles de déformation autre qu'élastiques à savoir les déformations plastiques ou visco-élastiques.

Des modèles bien plus complexes ont été élaborés lorsque la précision et l'efficacité sont critiques. Ils sont appliqués en la chirurgie, simulations biomécaniques, ou même en simulation des cheveux.

## Système de particules hiérarchiques

**Modèle en couche statique** Le *bubble-meshing* reconstruit un volume à partir d'une surface [SG95]. Il s'agit de remplir progressivement la coque d'un objet d'un empilement de sphères. Les particules sont placées par subdivision hiérarchique de certaines topologies : sommets, arêtes, faces puis volumes. Un potentiel permet d'obtenir un maillage régulier et une force est ajoutée afin de maintenir les boules dans l'objet.

Dans un modèle structuré en couche, le noyau rigide définit l'allure et le comportement général de l'objet, le derme définit la déformabilité de l'objet de manière plus fine et l'épiderme assure la cohésion de l'ensemble en exerçant une tension superficielle et est utilisée lors des interactions de collision. Chaque couche est donc associée à un comportement spécifique, ce qui permet une meilleure définition du mouvement. Ce modèle hiérarchique permet de simplifier les calculs car seule la couche la plus proche pourra interagir la couche donnée. Au lieu de se baser sur les dimensions des particules, on part de la couche noyau pour ensuite la rendre plus épaisse au fur et à mesure qu'on s'approche du derme et de l'épiderme [Jai99]. Son modèle a permis de réduire de trois quarts, le nombre de particules nécessaire par rapport à un système à couche unique, cela en conservant une précision équivalente.

**Modèle en couche dynamique** Dans ce modèle, les collisions seront gérées par l'épiderme qui sera finement maillé alors que les couches plus profondes seront plus grossières [JIM93]. Enfin un mo-

dèle adaptatif permet de répondre encore plus fidèlement à une déformation, les particules du noyau seraient subdivisées dynamiquement en particules du derme, puis de l'épiderme .

**Surface implicite** Un modèle composite est formé d'un squelette vu précédemment et d'une peau sous la forme d'une surface implicite [Des97]. Les déformations de l'objet sont prises en compte à la fois par le squelette (fracture) et par la peau (déformation fine). Le squelette est formé par un ensemble de particules analogues au noyau de la structure de Jimenez, liées par des potentiels de Lennard-Jones. La peau est calculée dynamiquement à l'aide de la surface implicite définie par la seconde couche de particule formant le derme et l'épiderme. Les surfaces implicites permettent de modéliser un système déformable très facilement car les mélanges s'effectuent à l'aide d'opérations arithmétiques et logiques. Cependant elles restent difficile à représenter.

## 1.2.4 Animation par squelette

### Implémentation du squelette

Le squelette est un graphe hiérarchique d'os permettant la propagation de l'animation par la composition des transformations liées à chaque os.

- Squelette : ensemble d'os qui permet de déformer la peau.
- os : c'est un des composants du squelette, de la même manière qu'un os est un composant du squelette humain.
- os racine : os qui n'a pas de parent et à partir duquel sont propagées toutes les transformations. Le point 0 signale l'origine du modèle (figure 1.3). Ce point peut servir à déplacer le personnage dans l'espace scène, à travers la transformation associée à cet os.



FIG. 1.3 – Squelette et os racine



FIG. 1.4 – Configuration en pose

### Animation du squelette

**Définitions des matrices de transformations** Chaque os est associé à différentes matrices de transformations qui permettent d'animer le squelette et d'appliquer l'enrobage.

- Matrice de pose ou de référence  $M_P$

La configuration initiale ou de référence, appelée aussi pose est l'ensemble des matrices de transformation fixé à un instant donné. Cette pose a généralement servi à la phase d'enrobage préliminaire pour associer la peau au squelette. La pose ressemble le plus souvent à l'illustration 1.4 car elle correspond à la moyenne des positions d'une animation : il est rare de marcher les bras croisés ou à cloche pied... Ces positions moyennes permettent alors de calculer a priori les sommets de référence de la peau.

- Matrice d'animation  $M_A$

Cette matrice décrit la transformation subie par l'os en fonction du temps. Elle sera désignée par la matrice de transformation monde  $M_M$ , qui s'applique dans le repère monde, appelé aussi repère absolu ou repère du modèle et la matrice de transformation locale  $M_L$  qui décrit les transformations de l'os courant dans son repère local. Cette représentation est utile pour la modélisation de l'animation ou pour les calculs de cinématique inverse. Pour la synthèse du modèle, il sera nécessaire de transformer cette transformation locale en transformation monde à l'aide de produit de matrices.

### Passer d'une transformation locale à une transformation monde

$$M_{PMC} = M_{PMP} \cdot M_{PLC}$$

où  $M_{PMC}, M_{PLC}$  sont les matrices de pose exprimées dans le repère monde/local de l'os courant et  $M_{PMP}$ , la matrice de pose monde de l'os parent.

**Propager l’animation** Les matrices d’animation envisagées ici sont des matrices de transformations locales. Quand je bouge mon bras, mon avant bras suit, en terme de transformation par matrices, cela se traduit en multipliant successivement les matrices de transformations. Afin de représenter graphiquement le squelette et de procéder ultérieurement à l’enrobage, la matrice de transformation monde est calculée en multipliant la matrice d’animation locale par la série de matrices d’animations locales de chaque os parent traversé. Cela équivaut, par définition, à calculer la matrice de transformation monde pour l’os courant.

$$M_{AMC} = M_{AMP}.M_{ALC}$$

où  $M_{AMC}, M_{ALC}$  sont les matrices d’animation exprimées dans le repère monde/local de l’os courant et  $M_{AMP}$ , la matrice d’animation monde de l’os parent.

$M_{AMP}$  est le résultat de la série des matrices locales

$$M_{AMP} = \prod_{i=0}^n M_{ALP_i}$$

avec  $M_{ALP_i}$ , matrice d’animation locales depuis la racine jusqu’au parent de l’os courant.

## Améliorations

La propagation des matrices d’animation doit s’effectuer à chaque clé d’animation. Le pré-calcul de toutes les matrices d’animation permet de se dispenser de ces produits. Cette méthode peut s’avérer toutefois gourmande en mémoire, sachant qu’il faudra stocker  $\#clés.\#os$  matrices homogènes. Une pile stockant les matrices de transformation monde dans la mémoire centrale permet de se dispenser de la récupérer à travers la carte graphique, ce qui peut être coûteux.

L’animation est souvent décrite sous forme des clés formées par des couples (translation, quaternion) associés à un instant  $t$ . Il sera alors possible d’améliorer son évolution dans le temps (vitesse) et son évolution dans l’espace (interpolation de la position). Afin d’avoir une vitesse commune à toutes les plateformes, l’information du nombre d’image cible est souvent utilisé. Quant à l’évolution dans l’espace, les défauts de l’animation peuvent être masqués par du motion-blur mais il est préférable de rajouter des clés par interpolation linéaire ou de degré supérieur à l’aide de courbes de Bézier ou d’Hermite [Lan01].

### 1.2.5 Enrobage

#### Historique

La peau est créée à partir d’un modèle explicite décrit par les sommets du modèle. Leurs positions est modifiées directement suivant les mouvements du squelette [BNM82]. Les déformations de formes libres, *FFD* permettent de produire des déformations plus continues, la peau étant une surface de Bézier [Kom88]. Le squelette est alors enveloppé par quatre carreaux de Bézier (un pour la tête, un pour la partie supérieure du corps, un pour l’abdomen et le quatrième pour les jambes). Il est nécessaire d’introduire des simplifications. Pour l’animation des mains, le concept d’opérateur local de déformation de surface dépendant des jointures, *Joint-dependent Local Deformation (JLD)* sont introduits [MTLT88]. Enfin, les sommets du modèle de la peau et points de contrôle sont confondus et modifiés de manière linéaire [CHP89]. C’est cette dernière méthode qui est décrite ici.

#### Présentation

La série de matrices de transformations obtenue lors de la phase d’animation par squelette permet de calculer la position de chaque sommet de la peau. Ce calcul, c’est l’enrobage.

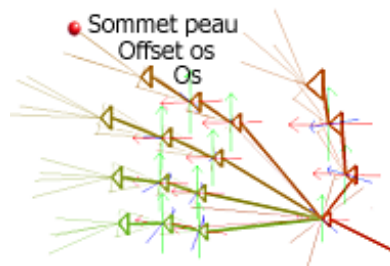


FIG. 1.5 – Os, offset et sommet de la peau

Cependant les matrices ne suffisent pas pour calculer la position des sommets. En plus des matrices, les autres informations nécessaires pour l'enrobage sont contenues dans ce que je désigne par contributions, contenant l'offset relatif à l'os appelé aussi offset local, la matrice de transformation et le poids associé.

- Offset local, *bone offset* : Vecteur translation défini par l'extrémité de os et le sommet de la peau.
- Poids : Poids associé à chaque os qui influence le sommet.
- Matrice de contribution : Matrice d'animation locale qui sert à transformer l'offset local.

L'offset local est souvent associé à l'offset monde examiné ultérieurement, dans les sections consacrées aux calculs des normales et à l'accélération de l'enrobage.

- Offset monde, *vertex offset* : C'est un vecteur dont l'origine n'est pas située à l'extrémité de l'os mais à l'origine du repère associé au modèle. Cette valeur peut servir à calculer les offsets locaux.
- Offset de la normale : Afin d'éviter un défaut d'éclairage, les normales doivent bénéficier, elles aussi, de l'enrobage. Cet offset est alors défini comme un offset local pour le calcul de la normale comme le offset local l'est pour le calcul du sommet de la peau.

### Enrobage rigide et enrobage lisse

L'enrobage rigide ou *rigid blending* n'associe qu'un unique os à chaque sommet. Cette méthode est utilisée pour des modèles non-organiques tels que des robots ou des insectes. Par contre, l'enrobage lisse permet à un sommet d'être influencé par un ou plusieurs os. Sa position est alors pondérée en fonction du poids de chaque bone, la somme des poids des os étant normalisée à 1.

$$p_p = \sum_{i=1}^n w_i o_i$$

où  $p_p$  est la position du sommet en pose,  $o_i$ , l'offset local,  $w_i$ , le poids et  $i$ , le rang de la contribution.

En plus de l'animation de modèles non organiques, l'enrobage rigide a été utilisé dans les premiers temps du fait de sa rapidité : le sommet n'est calculé qu'à partir d'une unique matrice. Le défaut de cette méthode est le fameux problème des jointures inhérents aux premiers jeux vidéos en 3D. Le modèle de l'illustration 1.6, fortement simplifié, met en évidence ce défaut.

**Mise à jour des coordonnées** Afin d'appliquer l'animation à l'enrobage, il suffit de multiplier les offsets locaux par les matrices d'animation calculées lors de la phase d'animation par squelette.



FIG. 1.6 – Enrobage rigide

$$p_A = \sum_{i=1}^n w_i (M_{AM_i} o_i)$$

où  $p_A$  est position du sommet pour l'animation,  $M_{AM}$ , la matrice d'animation monde de l'os de la contribution,  $o_i$ , l'offset local pour la  $i$ ème contribution,  $w$  : poids et  $i$ , le rang de la contribution

**Mise à jour des normales** Cette phase est nécessaire pour synchroniser l'éclairage avec les déformations de la peau. Pour les normales, il faut calculer au préalable les offsets de normales par rapport à la normale de pose. L'enrobage des normales, analogue à celui des sommets de la peau est ensuite appliqué. Travaillant dans l'espace des normales, l'enrobage se contente de la matrice de rotation, le résultat devant ensuite être normalisé.

**Calcul des décalages locaux des normales** Comment calculer les offsets des normales à partir d'une unique normale ? Il suffit de les calculer à partir de la normale exprimée dans le repère de pose, en jouant sur les influences des différentes transformations de chaque contribution. Ce calcul exprimé dans le repère local de chaque os s'écrit

$$on_i = R_{PM_i}^{-1} \cdot n_P$$

où  $on$  est l'offset de la normale en pose associée à l'os de la contribution,  $R_{PM}$ , la composante rotation en pose, de la matrice exprimée dans le repère monde et  $n_P$  est la normale, aussi exprimée dans la configuration de pose.

**Mise à jour des normales** La démarche est semblable à celle effectuée pour le calcul de la position en injectant l'offset de la normale que l'on vient de calculer.

$$n_A = \sum_{i=1}^{nbContrib} w_i (R_{AM_i} R_{PM_i}^{-1} n_P)$$



FIG. 1.7 – Enrobage en action

où  $n_A$  est la normale pour l'animation,  $R_{AM}$ ,  $R_{PM}$ , les composantes rotation de la matrice monde d'animation et de pose,  $n_P$  est la normale, et  $w$ , le poids

### Amélioration de l'enrobage

L'enrobage tel qu'il a été évoqué, se base sur un modèle explicite de la géométrie de la peau. La position des sommets servant de référence est calculée lorsque le personnage est configuré pour une certaine position. Par conséquent, des défauts peuvent apparaître dans d'autres configurations, notamment si la torsion entre deux os est trop importante. Lorsque l'angle entre deux os est assez important, la déformation ressemble à un tube de carton plié : la section située à la jointure est fortement réduite. Ce défaut est mis en évidence par la figure 1.8. Au niveau du bassin, la section bassin-jambe est fortement réduite et la jonction de la rotule est trop prononcée.

Diverses méthodes permettent d'améliorer l'aspect de la peau. La première idée est d'améliorer le modèle. L'augmentation du maillage aux jointures qui posent problèmes est une première solution ou l'ajout d'os. Cependant il est possible d'agir sans alourdir le modèle géométrique, en recalculant dynamiquement les poids afin d'éviter des cas limites. Enfin, un retour aux déformations de forme libre sera envisagé, à travers une contrainte de déformation d'ordre supérieur.

**Ajout d'os** En ajoutant des os de petite taille aux jointures, les angles de rotation entre les os sont réduits. Grâce à l'animation par squelette, il n'est pas nécessaire de calculer l'animation de ces nouveaux os, par contre, les poids devront être recalculés.

### Filtrage des poids

**Contrainte sur la taille des sections** Les défauts évoqués apparaissent à cause d'une trop forte réduction de section aux niveaux des jointures. L'idée est alors de corriger cette réduction inopinée en mémorisant une surface de section minimale, définie par des cônes à bases elliptiques entourant chaque os (figure 1.9).



FIG. 1.8 – Défauts d'enrobage



FIG. 1.9 – Sauvegarde de la surface des sections



**Lissage des poids** Les discontinuités trop importantes entre les poids de deux sommets proches peuvent être à l'origine d'une déformation trop importante de la peau. Il est donc préférable de lisser les poids avant la phase de rendu de la peau. Pour chaque os, les différences sont détectées par un seuil proportionnel à la distance entre les contributions. Si la différence est trop importante, les poids sont redistribués vers des contributions de plus faible poids, en veillant que le cumul des poids demeure normalisé à 1. Reste à fixer ce seuil, par exemple le seuil au niveau des doigts ne sera pas le même que celui du bassin. C'est là qu'interviennent les cônes vus précédemment : le seuil est directement déterminé par la section elliptique du cône. Une succession de passes de lissage permet d'obtenir des changements radicaux sur l'aspect du mouvement de la peau [Web00].

**Régénération des poids** Lorsque les poids sont mal définis, un lissage peut s'avérer insuffisant et il est alors nécessaire de les régénérer. Afin de simplifier cette régénération, le modèle en enrobage lisse est réduit à un modèle à enrobage rigide. La première étape est donc l'association du sommet à un unique os. Afin de déterminer l'os, un score, proportionnel à la distance radiale et axiale à chaque cylindre, est calculé pour chaque sommet. Une fois les sommets associés aux os, la seconde étape revient à effectuer le lissage des poids, expliqué dans le paragraphe précédent.

**Utilisation des déformations de forme libre** La méthode d'enrobage exposée dans cette section peut être regroupée dans une classe plus générale, la déformation de forme libre. Si on considère l'offset local comme une contrainte à une dimension, on parle alors de treillis contraint par une boîte. De nombreuses techniques, non évoquées ici, étendent cette notion de treillis à des contraintes de différentes formes et topologies, comme la contrainte à deux dimensions de [SK00] implémentée dans le logiciel d'animation Maya. Ces déformations de forme libre contraintes par surface permettent de localiser et d'isoler des détails de déformations que la méthode classique n'aurait pas pu implémenter.

## 1.3 Animation et rendu des rides et ridules

La simulation de la peau et des tissus organiques a de nombreuses applications dans les jeux vidéos mais aussi les cosmétiques et la chirurgie. La peau est un matériau qui est difficile de modéliser à cause de ses propriétés viscoélastiques particulières. Un autre pan de la recherche tente de reproduire une texture de peau réaliste. Or, la peau est semi-transparente : la lumière y pénètre pour être ensuite réfractée à travers différentes couches de l'épiderme. Le rendu de peau a été longtemps le domaine réservé des infographistes qui ont déployé de nombreux artifices pour simuler les imperfections de la peau. Désormais, la réfraction de la peau peut être générée grâce aux modèles de dispersion subsurfacique temps réel [Shi02]. Comme les deux aspects sont liés, les fonctions de textures bidirectionnelles constituent une première réponse, même si ces dernières restent difficiles à mettre en oeuvre. La première partie va définir les points d'anatomie pertinents pour l'animation et le rendu de la peau, décrits respectivement par la deuxième et troisième partie.

### 1.3.1 Anatomie de la peau

#### Modèle biomécanique

La peau est un enveloppe externe protectrice qui recouvre tout le corps humain. Elle compte pour 16% du poids du corps humain, a une superficie de 1,5 à 2m<sup>2</sup> pour un adulte et varie de 0,2 mm pour la paupière à 6,0 mm pour la voute plantaire [MTKL<sup>+</sup>02]. Ces couches confèrent à la peau des propriétés typiques d'un matériau non linéaire, inélastique et visco-plastique qui sont son extensibilité, sa résistance aux frottements et sa réponse à un effort latéral [WMTT95].

Cette classe de matériaux de faible épaisseur, plutôt que de se contracter lors d'une déformation, fait apparaître des plis pour absorber une surface additionnelle, les rides et les ridules. Ces dernières sont liées aux déformations des trois couches qui composent la peau : l'épiderme, le derme et l'hypoderme. Ces modifications ne s'effectuent que localement et légèrement pour la microstructure, formée de ridules apparaissant au niveau du derme et s'apparentant à un réseau de triangles bombés.

Les rides, de grandes lignes qui traversent la paume des mains et des pieds décrivent par contre la macrostructure de la peau. L'étude de ces rides est important pour obtenir un rendu facial réaliste. Les rides, caractérisées par leur emplacement et leur profondeur, sont d'abord des rides d'expression susceptibles de produire des rides de vieillesse. Ces rides sont situées sur le front, sur la partie située au dessus du nez et entre les deux yeux, sur les côtés de la bouche, sur le contour de la bouche et enfin, les pattes d'oie autour des yeux.

### Modèle d'éclairage

La peau humaine peut être modélisée à l'aide de deux couches quasi-homogènes. Ces deux couches ont le même indice de réfraction mais la différence de densité et la diversité des cellules produit des effets complexes d'absorption.

La couche externe, l'épiderme, est composée de tissus divers et est parsemée de pigments, la mélanine qui colorent la peau suivant leur densité. Le derme est composé de couches faiblement absorbantes ayant un fort coefficient de réfraction anisotropique. Il est irrigué par de nombreux vaisseaux capillaires qui réfractent la lumière de manière isotropique et renvoient donc la couleur typique du sang [vGJSS89]. L'épaisseur de la peau rentre aussi en jeu, car elle affecte la couleur et la réfraction de la peau. C'est particulièrement visible au niveau des oreilles et de la partie supérieur du crâne, le front et les tempes. Enfin, la peau possède de nombreuses imperfections comme les tâches de rousseur, les pores, les rides et les poils.

Généralement, la macrostructure sera gérée par l'animation, examinée dans la partie suivante alors que le rendu, vu dans la dernière partie, se concentrera sur la microstructure.

### 1.3.2 Animation des rides

Le modèle physique de la peau, hormis les problèmes d'enrobage et son extension au rendu musculaire, évoqués dans la section précédente, doit s'atteler à la génération des rides. Cela permet de simuler le vieillissement d'une personne et d'obtenir un rendu réaliste du visage. Si une texture est un moyen simple de représenter les rides de manière statique, il en est autrement pour l'animation.

Par ailleurs, il est nécessaire de localiser la génération et le rendu des rides car il est inutile et impossible de les générer sur tout le corps. Seuls les mains et le visage retiennent l'attention des chercheurs car ce sont souvent les parties les plus représentatives. Plus particulièrement, l'animation faciale permet d'améliorer la compréhension du message à véhiculer. Enfin, si pour les mains, l'animation n'est pas critique, les rides d'expression du visage ont pour contrainte supplémentaire d'être animées en temps réel.

Les premiers modèles de déformation de peau se sont ainsi focalisés sur l'animation faciale. Parke en a posé les fondations [Par74]. Durant les années 1980, des modèles géométriques ont été proposés [Par82, Wat87, MTPT88]. Les années 1990 ont vu l'avènement de modèles physiques à partir de maillages masse-ressort [LT95]. La modélisation par éléments finis, plus lente mais plus précise a été proposée [Lar86] et largement reprise pour la chirurgie assistée par ordinateur [KGC<sup>+</sup>96, Pie92]. Cette méthode est donc difficilement adaptable pour l'animation. En fait, peu de modèles physiques temps réel ont été proposés [WMTT94].

### Modèle géométrique

Viaud propose un modèle hybride basé sur des splines pour la modélisation des déformations. Autrement, un travail préparatoire de maillage est réalisé afin de générer au mieux les déformations de la peau. Les rides suivent des courbes de Bézier et le profil est paramétré de manière intuitive [BKN02].

Les rides apparaissent à des points localisés de façon arbitraire. Les sillons sont générés à l'aide de fonctions trigonométriques. Pour cela, les hauteurs sont calculées en fonction de ressorts contraints par les déformations faciales [WKMT96].

Les rides sont animés rapidement en s'inspirant de la méthode utilisée pour générer les plis de vêtements [VT99, HBVMT]. Volino se base sur l'analogie entre la peau et le vêtement pour proposer un modèle simplifié.

$$t = 2\lambda \left( \frac{1}{1 + (l/L)^2} - 1 \right) + 1$$

où  $t$  est la hauteur de la déformation,  $l$  et  $L$  sont les longueurs des bases courantes et au repos des plis.  $\lambda$  impose ou non une compression à l'état initial. La hauteur varie ainsi de 1 à 0 à travers cette fonction normalisée. Les plis sont générés après une phase d'animation physique de la peau ou du vêtement, il s'agit alors de prévoir une marge de tolérance pour la détection de collision.

Cependant ces modèles de déformation purement géométrique sont limités. Un modèle musculaire sous-jacent et au delà, un modèle des différentes couches de la peau doit alors être envisagé, en considérant la peau comme un maillage à deux voire à trois dimensions. Le rôle de la prochaine sous-section sera d'examiner ces types de modèles.

### Modèle physique et biomécanique

Le premier modèle a été proposé avec trois dimensions [TW90]. Si ce modèle a été simplifié d'abord simplifié à deux dimensions, la puissance des ordinateurs aidant, des maillages toujours plus complexes sont expérimentés.

**Maillage 2D** Afin de dépasser les limites d'un modèle géométrique, un modèle biomécanique peut être utilisé [WMTT94] en ajoutant une couche tissulaire entre la peau et le muscle [LWNT99, YPMT97]. Le muscle est une primitive déformable modélisée par une surface paramétrique [WMTT94] comme une surface B-spline [YPMT97]. Le muscle commande à travers un réseau masse-ressort, la déformation des couches supérieures permettant ainsi de créer les rides. Des techniques de traitement et de compréhension d'image localisent les primitives musculaires : le muscle frontal, le muscle pyramidal (sourcilier), et le muscle de la lèvre supérieure [LWNT99].

Les rides seront ensuite calculées suivant les déformations faciales par la méthode d'enrobage. Un maillage de ressorts à deux dimensions pour la peau est un bon départ [WMTT95]. Le caractère inélastique de la peau est simulé par un ressort à plusieurs phases. En allongeant la longueur du ressort, il est alors possible d'obtenir un vieillissement de la peau.

**Maillage 3D** Le maillage tridimensionnel multicouche permet d'obtenir une génération plus fidèle des rides [BKTK00, MTKL<sup>+</sup>02]. La modélisation de l'interface entre chaque couche permet de simuler les rides d'expression. Le vieillissement de la peau obtenu est plus réaliste, en se basant sur les hypothèses que les épaisseurs des différentes couches changent avec l'âge et que la peau se fatigue. Les rides de vieillesse sont ainsi produites suite à relaxation après déformation et un effet mémoire. Le modèle se limite cependant à des déformations longitudinales et son domaine d'application reste cantonné à la chirurgie et aux cosmétiques. Tel qu'il est présenté, de par sa complexité, son utilisation dans l'animation temps-réel, n'est pas envisageable.

### 1.3.3 Rendu des ridules

La microstructure de la peau présente de multiples défauts, depuis les ridules ou tâches de rousseur. Ces défauts ne peuvent évidemment pas être reproduits au niveau géométrique. C'est pourquoi il faut travailler au niveau des fragments à l'aide de textures procédurales et de textures d'embossement.

A une échelle plus petite, la peau se compose de plusieurs couches complexes qui contribue à faire de la peau, un matériau complexe. Si la peau a été longtemps représentée par des couches successives de textures, ces dernières ne pouvaient pas modéliser les effets inhérents à la peau, à savoir l'éclairage rasant et la dispersion subsurfacique. Or, les modèles de matériau transparent permettent de reproduire de tels phénomènes à l'aide de techniques d'illumination globale. Pour appliquer ces techniques dans un cadre temps réel, ces résultats doivent être transposés dans des cartes de textures qui nourrissent les nombreuses unités de textures et le pipeline programmable des cartes graphiques actuelles.

#### Modélisation des microstructures

Les défauts de la peau sont créés à l'aide de plusieurs couches de textures. La première texture est de couleur chair. Le bruit généré par des textures procédurales de fumée et d'éclaboussures simulent alors des défauts de grains différents, comme des tâches de rousseur et autres points noirs[Rog01].

Ce travail peut être complété par une texture photoréaliste afin de représenter la microstructure de la peau mais une texture d'embossement donne souvent de meilleurs résultats. C'est une carte de normales permet de modifier l'éclairage de la surface sans pour autant complexifier la géométrie. Reste à savoir comment générer cette texture d'embossement ? Elle est générée à l'aide de diagrammes de Voronoï hiérarchiques [IYT93] ou une triangulation de Delaunay récursive [YPMT97]. Une hauteur proportionnelle au barycentre du triangle permet de régler la convexité des triangles formés par ces ridules. Il est intéressant de ne modéliser non pas la microstructure mais se de concentrer sur la mesostructure [BKN02]. Hormis pour des zones particulières, la mesostructure forme un champ unidirectionnel de ridules en diamant qui croissent dans la direction du champ.

Plus simplement, un échantillon de peau numérisé constitue un départ [HGE01]. Des techniques de traitement d'image permettent d'améliorer l'échantillon, filtré et reproduit à l'aide d'une technique de *shape from shading*, en considérant le caractère stochastique de la texture. La microstructure est assimilée à un champ markovien, autrement dit, un processus stochastique local et stationnaire (chaque pixel et son voisinage définissant un comportement global) [WL].

#### Rendu par perturbation de la surface

Lorsque la surface d'un objet est irrégulière, un simple plaquage de texture d'ombre donne de mauvais résultats, car, les effets d'ombrages propres ne sont pas pris en compte. L'augmentation de la résolution du maillage n'est pas une fin en soit car cela alourdit le rendu.

**Embossement par perturbation des normales** La méthode de perturbation des normales *bump mapping* permet d'ajouter une certaine complexité au niveau de l'éclairage sans complexifier le modèle géométrique, en jouant sur une carte de normale [Bli78]. Les normales perturbées sont stockées dans une carte, sous forme de texture qui sera plaquée sur la face, qui reste lisse. Ainsi les aspérités de la surface ainsi simulées modifient l'éclairage par l'intermédiaire des normales. Concrètement, on récupère les données d'embossement depuis une texture (*bump map*) afin de perturber la normale d'origine, en ayant pris soin de récupérer les vecteurs tangentes et binormales dans l'espace scène.

Le *bump mapping* peut être amélioré en travaillant dans l'espace des textures, afin d'éviter les déformations dues au changement de système de coordonnées [HGE01]. Cela permet aussi d'éviter d'ap-

plier la texture d’embossement à chaque rendu. Cependant d’un point de vue rapproché, on arrive à distinguer des défauts aux bords apparents de l’objet et des erreurs d’ombrage propre.

**Extensions** Le *displacement mapping* modifie réellement la géométrie [CCC87]. Afin de pallier cette complexité, il est nécessaire d’implémenter une gestion de niveaux de détails [BM93]. Dernier avatar, le *parallax mapping* de Welsh est un intermédiaire entre le bump mapping et le displacement mapping [Wel04].

## 1.4 Rendu de la peau par approches phénoménologiques et surfaciques

### 1.4.1 Modèle phénoménologique

Les épaisseurs de peau varient en fonction des zones et la nature des tissus influent sur la dispersion subsurfacique, on ne peut donc pas appliquer de modèles d’éclairage sur la totalité d’un modèle géométrique. Ainsi, afin de simuler l’éclairage spécifique de la peau, il est nécessaire d’utiliser des masques d’éclairage afin de mettre l’accent sur certaines zones (éclairage rasant, éclairage des arêtes et transparence) et d’adoucir l’ombrage. Ces cartes permettent d’accélérer le rendu en précalculant les différents paramètres de ces modèles d’éclairage. Cependant, ces masques, étant plus ou moins spécifiques, posent des problèmes pour une animation faciale temps-réel. Les textures permettent aussi d’isoler des zones plus ou moins denses, en vaisseaux sanguins ou en concentration en mélanine, directement lié à l’épaisseur de la peau [Sta02].

**Description et simulation des phénomènes** Afin de rendre le modèle de la figure 1.10, près de 8 effets combinés et 6 cartes d’éclairage sont utilisés [Nvi02], afin de simuler le modèle d’éclairage de la peau. La dispersion subsurfacique, à l’aide d’un modèle simplifié d’éclairage rasant (*rim lighting*) associé à une carte de semi-transparence. L’implantation de ces effets profite de l’accélération matérielle, à travers de multiples shaders.

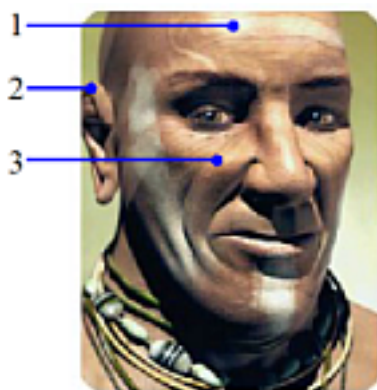


FIG. 1.10 – Implémentation avec masques d’éclairage

**1. Eclairage spéculaire** Le modèle de l’éclairage spéculaire de la peau est dû, en partie, au sébum de l’épiderme et peut être dérivé du modèle de Phong. Un facteur permet de moduler l’importance de l’intensité de la tâche spéculaire et est stocké dans une carte de reflets spéculaire (*glossiness map*)

localisée au niveau des joues, du nez et du front. Un modèle de Torrance-Sparrow peut s'avérer plus précis.

**2. Eclairage rasant** Cet effet appelé *rim lighting* est utilisé surtout pour les oreilles. Une carte de réfraction, déterminée à travers un coefficient de réfraction de Fresnel, permet de stocker les valeurs de diffusion arrière, par exemple, au niveau des oreilles.

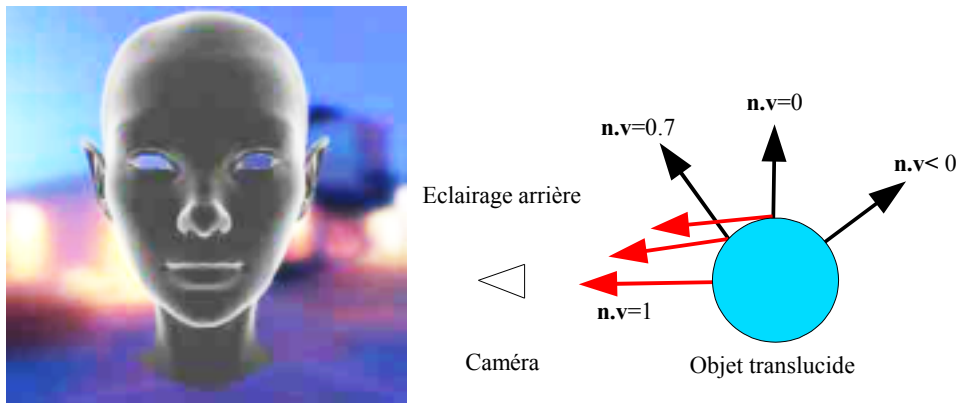


FIG. 1.11 – Eclairage rasant

Ce modèle est toujours dérivé du modèle de Phong mais un sinus remplace un cosinus, pour mettre en évidence un éclairage rasant.  $I_{arriere} = (1 - \max(0, \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}))^k$

**3. Dispersion subsurficque** La dispersion peut être simulée par plusieurs textures dont les contributions sont l'intensité diffusée permettant d'adoucir la dispersion et l'intensité de dispersion subsurficque. Quelques textures supplémentaires peuvent représenter les différents tissus du derme : les tâches rouges par une densité supérieure de vaisseaux capillaires.

Comment obtenir la carte de dispersion citée précédemment ? Elle peut être précalculée à partir des modèles mesoscopiques de matériau réaliste comme la BRDF, la BTDF, la BSSRDF voire décrit explicitement à travers une BTF. Ces fonctions, décrites dans les lignes suivantes, mettent en relation pour chaque couple d'angles incident et réfléchi, la quantité de lumière réfléchi.

## 1.4.2 Modèle mesoscopique surfacique

### Définition de la BRDF

Une modélisation complète du comportement d'une surface devrait prendre en compte, en plus de la réflexion, des propriétés annexes telles que la polarisation, la diffusion due à la microstructure (*scattering*), la fluorescence ou la phosphorescence qui varient toutes en fonction de la position et de l'orientation de la surface. Les variables à étudier sont alors l'angle, la longueur d'onde, la polarisation, la position (qui diffère à cause de la microstructure), le temps de propagation, et ceux-ci pour toutes les directions des faisceaux incident et réfléchi.

Pour simplifier le modèle, les phénomènes et les différentes variables cités seront ignorés pour seulement se concentrer que sur les deux angles incident et réfléchi. La fonction qui met en relation pour chaque couple d'angles, la quantité de lumière qui est réfléchi est appelée *Bidirectional Reflection Distribution Function* (BRDF). Autrement dit, elle représente pour une direction d'illumination donnée, la proportion d'énergie réfléchi dans chacune des directions d'observation, exprimée en angle solide

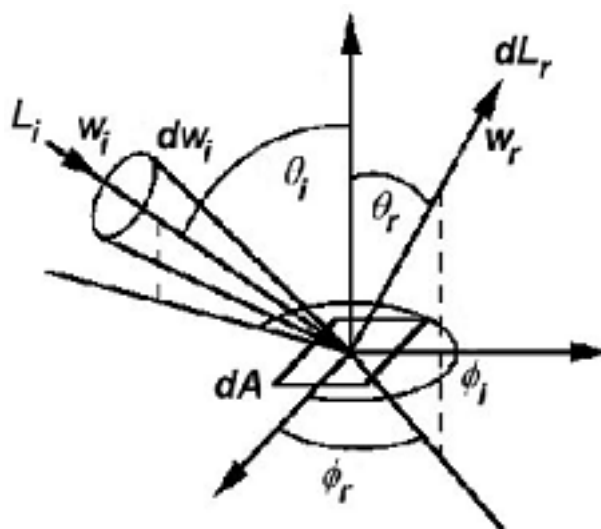


FIG. 1.12 – BRDF

inverse ( $sr^{-1}$ ). Chaque rayon est donc défini selon deux paires d'angles zénithaux  $\theta$  et azimutaux  $\phi$ . La BRDF peut être aussi définie selon un produit vectoriel de deux hémisphères, la première centrée autour de l'angle entrant et l'autre autour de l'angle sortant [Rus97].

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)}$$

où  $E_i$  est l'irradiance et  $L_r$  est la radiance réfléchie. En reprenant l'expression de l'irradiance  $E_i$ , sous la forme de somme de radiance incidente, la BRDF s'écrit sous la forme de comme un rapport de deux radiances où  $\cos \theta_i d\omega_i$  représente l'angle solide incident.

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$

La BRDF est surtout utilisée en lancé de rayon car elle permet de définir les radiances dans l'équation de radiosité de Kajiya.

$$L(x, \mathbf{w}) = E(x, \mathbf{w}) + \int_{\Omega} f_r(x, \mathbf{w}, \mathbf{w}') v(x, x') \cos \theta_x dL(x', \mathbf{w}')$$

### Modèle mésoscopique explicite : BTF

Si les modèles de BRDF/BSSRDF permettent d'obtenir un modèle subsurfacique réaliste, la micro-structure n'est pas prise en compte. Autrement dit, la BTF permet de lier les concepts de déformation géométrique des ridules et de dispersion subsurfacique. C'est pourquoi on se rapproche de plus en plus du concept de texture bidirectionnelle de fonctions, BTF, un tableau de BRDF et BSSRDF, pour représenter la peau en liant animation et éclairage, pour l'instant, à travers les techniques d'emboisement. Une factorisation permet toutefois de l'appliquer en temps interactif sur les cartes graphiques actuelles [MMSK03, MMK03, SBLD03].

## Application au rendu de peau

Le modèle empirique de Lafortune permet de représenter BRDF en temps réel [LFTG97, HGE01]. Les autres modèles étant rendus par des techniques d'illumination globale, ils ne peuvent donc pas être directement utilisés.

## 1.5 Rendu de la peau par approches subsurfaciques

### 1.5.1 Modèle mesoscopique subsurfacique : réflectance et transmittance

Après le modèle de Lambert (1760), Blinn a été un des premiers de modéliser la diffusion subsurfacique de la lumière pour représenter les anneaux de Saturne [Bli82]. Son modèle, qui ignore les coefficients de réfraction de Fresnel, se base sur des lois de probabilités afin de simplifier l'équation de radiosité de la lumière multidimensionnelle.

Tout comme la BRDF essaie de produire un matériau non transparent réaliste, un modèle subsurfacique a pour objectif de retranscrire de façon correcte, un matériau translucide à travers ses propriétés physiques. Ces modèles implémentent la dispersion et la réfraction et permettent ainsi de reproduire des effets tels que le mélange de couleurs qui donne un aspect adouci et l'éclairage arrière [HK93]. Toute une palette de matériaux semi-transparent peuvent être simulés, depuis des tissus biologiques tels que des feuilles, du lait et la peau jusqu'à des matériaux inorganiques tels que la neige, le sable, le marbre et des matériaux couverts de vernis ou de poussière.

#### Modèle de matériau diffusant

L'indice de réfraction seul, est insuffisant pour décrire le milieu semi transparent. Hanrahan suppose que le matériau translucide est constitué de particules distribuées aléatoirement sur lesquelles la lumière va rebondir. De manière macroscopique, il définit pour chaque matériau, son indice de réfraction, l'épaisseur de la couche translucide, les probabilités d'absorption et de dispersion ainsi que la fonction de phase.

**Indice de réfraction** Les matériaux considérés sont des diélectriques où  $n$  est de l'ordre de l'indice de réfraction de l'eau. Ce qui est justifié pour des matériaux constitués majoritairement d'eau (cellules vivantes et neige).

**Epaisseur de la couche** L'épaisseur  $d$  rentre en jeu afin de calculer les différentes radiances à travers le matériau.

**Probabilité d'absorption et de dispersion**  $\sigma_a, \sigma_s$  représentent respectivement la probabilité moyenne que la lumière soit absorbée ou dispersée. Physiquement, le modèle étant unidirectionnel, ils peuvent être considérés comme une section longitudinale dont l'unité est le  $\text{mm}^{-1}$ . La probabilité totale, appelée aussi coefficient d'extinction  $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$  est définie comme la somme des probabilités d'absorption et de dispersion. On retrouve l'albédo du modèle de Lambert, qui détermine les rapports entre absorption et dispersion,  $W = \sigma_s / \sigma_t$ . Pour un albédo proche de 1, la diffusion est plus grande que l'absorption. Pour un albédo nul, c'est l'absorption qui prend le pas.

**Fonction de phase (scattering phase function)** C'est la fonction au coeur de tout modèle de dispersion. La plupart des fonctions de phase<sup>1</sup> sont isotropiques. Elles font correspondre une fraction de

---

<sup>1</sup>Le nom est tiré de la notion des phases de la lune



lumière renvoyée selon la direction de la lumière incidente. Elles sont spécifiées selon l'angle  $\alpha$  formé entre ces deux directions et on pose  $a = \cos \alpha$ . Les modèles volumiques sont basés sur une distribution uniforme de particules dans le matériau. Inakage sépare quatre classes de fonctions de phase (absorption atmosphérique, dispersion de Rayleigh, dispersion de Mie et optique géométrique) en fonction du milieu en jeu (quasi-vide, poussière, brouillard, non transparence).

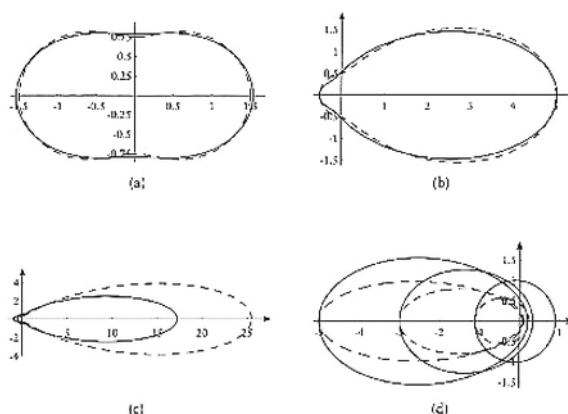


FIG. 1.13 – Fonctions de phases et approximations de Schlick

Les fonctions approchées sont en pointillés, les fonctions de Schlick sont en traits pleins.

(a) Rayleigh, (b) hazy Mie, (c) murky Mie et (d) Henyey Greenstein

Pour des particules d'eau, Nishita propose deux approximations de la fonction de Mie, respectivement *hazy* et *murky* [NSTN93]. Une autre approximation est la fonction de Henyey-Greenstein, modélisant la dispersion de la lumière à travers des galaxies. Cette fonction est paramétrée par la taille, de la forme, de l'orientation des particules en suspension, de leur propriété diélectrique et de la longueur d'onde de la lumière incidente.

$$p(g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \vartheta)^{3/2}}$$

La direction de dispersion est toujours symétrique à la normale de la surface, d'où l'angle  $\vartheta = \theta_i + \theta_j$ . Le coefficient  $g$  permet de définir l'excentricité de la fonction. Pour  $g=0$ , la dispersion est isotropique, pour  $g$  positif, la dispersion se fait vers la caméra et pour  $g$  négatif, vers la lumière. Pour la peau, on fixe simplement  $g=0,85$ . Enfin, l'approximation de Schlick est plus rapide à évaluer et permet d'obtenir les trois fonctions citées précédemment [BSS93].

### Modélisation de la réflectance et de la transmittance

Le modèle de Hanrahan et Krueger tient compte de la diffraction de la lumière, à travers le coefficient de Fresnel [HK93]. La démarche de Hanrahan et Krueger est similaire à celle de Cook-Torrance. Ils proposent une définition des radiosités et un modèle physique de dispersion, pour ensuite le simplifier.

**Prise en compte des contributions subsurfaciques** La radiance réfléchiée est la somme de la radiance réfléchiée par la surface  $L_{r,s}$  et de la radiance réfléchiée par les couches inférieures  $L_{r,v}$ . La radiance transmise est la somme de la radiance affaiblie,  $L_{r_i}$  ce qui reste de la lumière arrière qui traverse le matériau après absorption et à la radiance transmise due à la dispersion subsurfacique  $L_{t,v}$ .

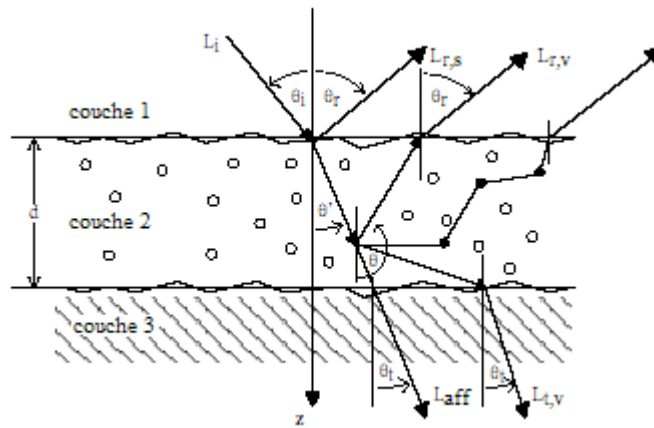


FIG. 1.14 – Modèle de Hanrahan et Krueger

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = L_{r,s}(\theta_r, \phi_r) + L_{r,v}(\theta_r, \phi_r)$$

$$L_t(\theta_t, \phi_t) = L_{r,i}(\theta_t, \phi_t) + L_{t,v}(\theta_t, \phi_t)$$

**BRDF et BTDF** En analogie à la BRDF, cette radiance transmise sert à définir une BTDF, fonction bidirectionnelle de distribution de la transmission.

$$f_t(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_t(\theta_t, \phi_t)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$

### Résolution analytique

Physiquement, la peinture est composée de particules colorées (les pigments), en suspension dans un milieu quasiment transparent et incolore (le véhicule et le liant comme l'eau et l'huile). Ce modèle macroscopique de peinture tient compte des effets de dispersion, d'absorption et de réflectance [KF31].

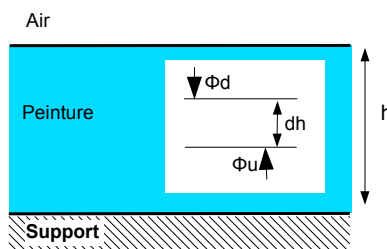


FIG. 1.15 – Modèle de Kubelka-Munk

Ce modèle est paramétré par un coefficient de dispersion  $\sigma_s$ , un coefficient d'absorption  $\sigma_a$ , une épaisseur uniforme  $h$  concernant la peinture et une réflectance du substrat (support),  $\rho_0$ . En combinant les flux descendant  $\Phi_d$  et montant  $\Phi_u$  avec les coefficients de dispersion et d'absorption pour une épaisseur infinitésimale  $dh$ , on obtient les équations différentielles, en posant  $a = 1 + (\sigma_a + \sigma_s)$

$$\begin{aligned}\frac{d\Phi_d}{\sigma_s dh} &= a\Phi_d - \Phi_u \\ \frac{-d\Phi_u}{\sigma_s dh} &= a\Phi_u - \Phi_d\end{aligned}$$

Le but de la résolution est de trouver  $\rho_h$ , la réflectance du matériau après avoir appliqué une couche d'épaisseur  $h$ . On retrouve cette réflectance en proposant une solution à ce système d'équations sous la forme d'une intégrale. La première solution simple de Kubelka et Munk, suppose que la couche de peinture est opaque et cache complètement le substrat. Plus tard, la solution de Kubelka où  $h$  n'est pas infini, s'écrit à l'aide de cotangentes hyperboliques. On peut évoquer le modèle de Judd et Wyzecki, similaire à la solution de Kubelka et Munk.

**Limites de ce modèle** Le modèle des particules est sommaire : la floculation des pigments est ignorée. Les interactions de la lumière lors d'une collision avec une particule ne sont donc pas prises en compte. Les propriétés du véhicule <sup>2</sup> ne sont pas prises en compte par les coefficients d'absorption et de dispersion. Le véhicule et l'air sont deux milieux différents mais les phénomènes de réflexion et de transmission ne sont pas retranscrits. Enfin, la couche de peinture est supposée uniforme et les interactions électriques et chimiques sont ignorées [Fis83].

### Résolution stochastique

**Calcul de la transmittance par échantillonnage stratifié** Cette méthode appelée *stratified sampling* consiste à considérer un chemin direct entrant-sortant. Le trajet est alors échantillonné afin de cumuler les contributions de transmissions du matériau [KK89]. La transmittance d'un point  $p$  s'écrit en fonction de l'opacité  $\tau(p) = \exp(-\Omega)$ . Cette opacité est la somme des contributions d'une fonction de densité (ou d'extinction) le long du chemin de la lumière, ce qui s'écrit  $\Omega = \int_0^L \rho(l) dl$ . La valeur de la transparence ou alpha se déduira directement de  $\Omega$ . Le pixel sera opaque si  $\Omega$  est infini. Pour représenter un matériau, il suffit alors de donner sa densité. Par exemple, pour une chevelure, on devra évaluer la densité de cheveux par voxel. Autrement, un bruit de Perlin peut être aussi utilisé. Cette méthode sera appliquée dans tous les modèles subsurfaciques.

**Equation de transport** L'équation de Hanrahan est analogue à l'équation de radiosité de Kajiya, dans laquelle le terme ambiant est remplacé par un terme de dispersion qui diminue la radiosité, suite à la dispersion subsurfacique et à l'absorption. Les deux termes sont respectivement pondérés par la probabilité d'extinction  $\sigma_t$  et le coefficient de dispersion  $\sigma_s$ . Cette radiosité se calcule au niveau de la particule de position  $\mathbf{x}$ , sur une aire  $s$ . Suivant les angles zénithaux de réfraction spécifiques  $\theta, \theta'$  illustrés dans la figure et l'angle azimutal  $\phi$ , après la simplification sur une dimension unique, on obtient

$$\cos \theta \frac{\partial L(\theta, \phi)}{\partial z} = -\sigma_t L(\theta, \phi) + \sigma_s \int_{\Omega} \rho(z, \theta, \phi, \theta', \phi') L(\theta', \phi') d\theta' d\phi'$$

**Résolution pour la première dispersion** Dans un premier temps, Hanrahan résout analytiquement cette équation en la développant à travers une série de Neumann. La dispersion primaire est la première solution, pour un unique rebond. Physiquement, elle se traduit par une collision avec la première particule

<sup>2</sup>Milieu de suspension

en suspension. La position de cette particule est donc le point d'intersection entre le rayon incident et réfracté.

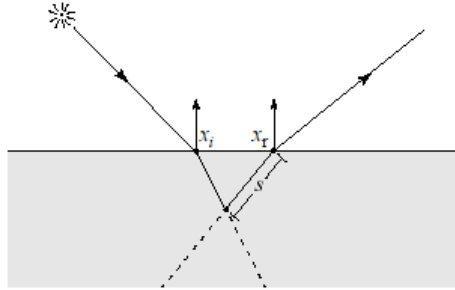


FIG. 1.16 – Evaluation de la composante de dispersion primaire

**Diffusion lambertienne** On peut considérer la diffusion se réfléchissant directement sans traverser la surface,  $L_{r,s}$  comme une diffusion lambertienne.

**Intensité affaiblie** La quantité de lumière absorbée par le matériau est directement liée de manière exponentielle, à la distance traversée.

$$L_{ri} = T_{12}T_{23} [\exp(-\tau_d)] L_i$$

où  $\tau_d = \sigma_t d$  la distance du premier rebond.

**Dispersion primaire** En 1888, Seelinger a été le premier à modéliser une réflexion diffuse. En ignorant les transmissions de Fresnel et en supposant une couche semi infinie  $\tau_d = \infty$ , on écrit  $L_{r,v} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} L_i$ . Ce terme permet de moduler l'affaiblissement et la dispersion : ils sont d'autant plus grands que  $w_i$  et  $w_r$  sont écartés. En introduisant cette relation pour le calcul de la radiance transmise ainsi qu'en tenant compte de l'intensité affaiblie, on résume

$$L_{r,v}^{(1)} = WT_{12}T_{23}p(g) [1 - \exp(-\tau_d(1/\cos \theta_i + 1/\cos \theta_r))] L_{r,v}$$

$T_{12}, T_{23}$  correspondent aux facteurs de transmission de Fresnel pour la traversée entrante (air vers milieu) puis sortante (milieu vers air)

### Rendu de la BRDF/BTDF par lancer de rayon

Le résolution par scanline devient trop complexe lorsqu'on veut simuler des rebonds multiples. Une méthode de lancer de rayon stochastique (Monte-Carlo) est alors utilisée. Le principe du lancé stochastique est d'estimer la BRDF/BTDF du matériau en lançant de nombreux rayons suivant une fonction de probabilité. Il est possible d'utiliser un échantillonnage stratifié mais cette méthode donne un résultat qui n'a pas convaincu les auteurs, c'est pourquoi ils proposent la méthode suivante.

Propriété	Epiderme	Derme
n	1,37-1,5	1,37-1,5
$\sigma_a$ ( $mm^{-1}$ )	3,8	0,3
$\sigma_s$ ( $mm^{-1}$ )	50	21,7
d (mm)	0,001-0,15	1-4
g	0,79	0,81

TAB. 1.1 – Données pour le modèle subsurfacique de peau

**Résolution par marche aléatoire** Pour estimer la radiance subsurfacique, un lancé de Monte-Carlo est appliqué au niveau subsurfacique [HK93]. Pour cela, on considère une particule, que j'appellerai abusivement *photon*, afin de le distinguer des particules du matériau. Ce photon est caractérisé par sa position  $\mathbf{p}$ , sa direction  $\mathbf{s}$  et son poids  $w$  et lancé à travers le matériau. Sa rencontre avec les particules est soumise à une probabilité paramétrée par  $d, \sigma_t$  décrivant la distribution des particules en suspension dans le matériau. Une fois une particule rencontrée, sa direction est mise à jour suivant la fonction de phase de Henyey-Greenstein. Une fois que le photon a réussi à sortir de ce matériau, son poids servira à estimer la BRDF subsurfacique.

Cette méthode a été implémentée en 1993 sur une station SGI. Pour des milieux tels que le lait ou la peau de fort albédo, il est probable que ce photon rebondira plus d'une centaine de fois avant de sortir du matériau. Le multi-rebond peut donc s'avérer coûteux. Même si les itérations de lancer de photon à travers le matériau subsurfacique sont largement minoritaires par rapport au lancer de rayon pour la scène, il reste évident en 2004 que cette méthode fort peu adaptée pour un rendu temps réel.

### Application au rendu de peau

Le modèle de BTDF de Hanrahan peut être appliqué pour le rendu de peau, alors composée de deux couches assimilées à l'épiderme et au derme [HK93]. L'épiderme fin contient les pigments de mélanine qui entraînent une forte absorption traduite par la faiblesse du coefficient de dispersion  $\sigma_a$ . Par contre le derme, plus épais, possède une dispersion plus prononcée, causée par des tissus internes et des vaisseaux sanguins à forte dispersion. Les valeurs de ces matériaux sont résumées dans le tableau 1.1.

## 1.5.2 Modèle mesoscopique subsurfacique : dispersion

### Définition de la BSSRDF

La résolution de l'équation de transport du modèle de Hanrahan nécessite un lancer de photon (*path sampling*). Plutôt que de s'intéresser aux causes microscopiques de la dispersion subsurfacique, Jensen préfère étudier la conséquence, le profil de la réflectance radiale. Sa méthode est dérivée d'études médicales qui recherchaient à étudier la propagation d'un laser à travers des tissus humains. Ce changement de point de vue rend sa méthode plus rapide.

En définissant un modèle macroscopique, la méthode de Jensen se dispense de l'étape de l'estimation coûteuse par rebonds multiples. Ainsi, un modèle de 1 million de triangle est rendu en 5 minutes contre 1250 minutes pour une évaluation totale par BRDF (diffusion et réfraction). Même si la BRDF et la BSSRDF ont comme but commun de définir avec précision la réflectance, la BRDF rend le matériau avec tous les détails possibles du matériau, il est résulte un aspect granuleux, alors que la BSSRDF donne plutôt un aspect lisse, esthétiquement plus agréable.

La BSSRDF, *bidirectional surface scattering reflectance distribution function*, a été définie par Nicodemus et al. [NRH<sup>+</sup>77]. Cette fonction généralise la BRDF à tout type de matériau : un matériau non

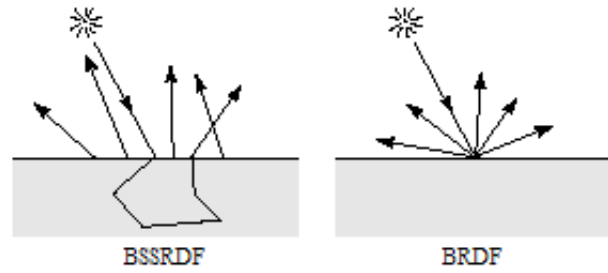


FIG. 1.17 – Généralisation de la BRDF par la BSSRDF

transparent est considéré comme un matériau semi transparent sans effet de transmission. De plus, la BSSRDF englobe le modèle de Hanrahan et Krueger.

La BSSRDF  $S$  relie la radiance sortante  $L_r$  définie pour le point de sortie  $x_r$  et l'angle solide  $\mathbf{w}_r$  au flux incident  $\Phi_i$  défini pour le point d'entrée  $x_i$  et l'angle solide  $\mathbf{w}_i$

$$S(x_i, \mathbf{w}_i, x_r, \mathbf{w}_r) = \frac{dL_r(x_r, \mathbf{w}_r)}{d\Phi_i(x_i, \mathbf{w}_i)}$$

La BRDF est alors considérée comme une approximation de la BSSRDF dans laquelle le point d'entrée est confondu avec le point de sortie ( $x_r = x_i$ ), synonyme d'aucune réfraction.

En considérant tous les rayons incidents sur la demi-sphère centrée en  $x_r$ , on retrouve l'équation de transport décrite dans le modèle de Hanrahan.

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \mathbf{w})}{\partial s} = -\sigma_t L(\mathbf{x}, \mathbf{w}) + \sigma_s \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{w}') L(\mathbf{x}, \mathbf{w}') d\mathbf{w}'$$

Afin de résoudre cette équation, Jensen va définir le matériau de façon macroscopique.

### Modèle de matériau

En plus des paramètres du modèle de Hanrahan et Krueger, Jensen rajoute une description macroscopique à l'aide des constantes de réflexion  $A$  et de diffusion  $D$ .

**Probabilités réduites** Jensen confond dispersion avant et diffusion, car il suppose que seule la diffusion arrière influe vraiment sur ses calculs. Ainsi il propose des probabilités de dispersion réduite en fonction du coefficient de la fonction de phase,  $g$  et en déduit coefficient d'extinction total s'écrit en fonction des coefficients d'extinction pondérés selon les directions incidentes et sortantes.

**Modèles de réflexion et transmission** Les phénomènes de réfraction sont prises en compte à travers le facteur de réflexion de Fresnel  $A = \frac{1+R_d}{1-R_d}$  où la réflectance moyenne diffuse de Fresnel  $R_d$  peut s'exprimer analytiquement selon le terme de réflectance  $R$  avec la méthode de Kortum [Kor69] ou le modèle empirique et numérique de Egan et Hilgeman [EH79]. On note enfin la transmission diffuse de Fresnel  $T_d = 1 - R_d$

**Constante de diffusion  $D$**  La constante  $D$  permet de répercuter l'absorption à travers ce matériau, en étant inversement proportionnelle à la probabilité d'extinction réduite.  $D = (3\sigma_t^*)^{-1}$

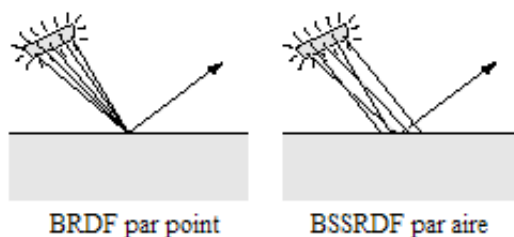


FIG. 1.18 – Résolution de la BSSRDF par lancé de rayon

### Rendu de la BSSRDF par un lancé de rayon

En cherchant à résoudre cette équation à travers un modèle macroscopique (la diffusion résultante), Jensen se heurte finalement à la même difficulté que Hanrahan et al., à savoir la complexité excessive de la solution analytique. C'est pourquoi il ne considère que la dispersion primaire.

**Séparation de la BSSRDF en composante de diffusion et de dispersion primaire** La BSSRDF est séparée en deux termes, la diffusion  $L_d$ , résultante des dispersions multiples et la dispersion primaire (*single scattering approximation*)  $L_r^{(1)}$ . Jensen considère en effet que cette première dispersion est majoritaire par rapport aux dispersions suivantes. Pour un point à la position  $x$ , une lumière incidente sous l'angle solide  $\mathbf{w}_i$  et une lumière dispersée (réfléchiée et réfractée) sous l'angle  $\mathbf{w}_r$ , la réflectance subsurfacique s'écrit en terme de réflectance.

$$L(x, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_r) = L_d + L_r^{(1)}(x, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_r)$$

Afin d'appliquer la BSSRDF sur tout type de matériau, il est nécessaire de spécifier la méthode d'intégration de la BSSRDF pour un lancer de rayon, de donner une approximation de ses deux composantes.

La BSSRDF s'évalue avec un lancer de rayon stochastique. Pour sa composante de diffusion, on utilise la méthode classique qui consiste à échantillonner la demi sphère centrée autour d'un point  $x_r$ .

Par contre, la composante de dispersion primaire est calculée sur une aire plutôt que pour un point particulier. Cela s'explique à cause de la réfraction : le point de sortie est différent des différents points d'entrées.

**Estimation de la dispersion primaire** La dispersion primaire a été introduite par le modèle de Hanrahan et Krueger. La radiance totale due à la dispersion s'évalue par échantillonnage stratifié.

La distance sur le rayon réfracté  $s_r^* = \log r / \sigma_t(x_r)$  est identique à celle considérée dans l'algorithme de Hanrahan et Krueger. Cette distance est pondérée par la probabilité d'extinction totale et un tirage aléatoire  $r$ , entre 0 et 1. Quant à la distance sur le rayon incident, elle est estimée à l'aide de la loi de Snell où on applique la distance réelle  $s_i$  et la distance observée  $s_i^*$ , suite à la réfraction. Une fois les distances évaluées, on peut donner une approximation de la dispersion primaire  $L_r^{(1)}$  qui lie la radiance incidente à la radiance sortante. Le coefficient de dispersion  $\rho_s^{(1)}$  est paramétré par les probabilités de dispersion, d'extinction, la transmission de Fresnel, la fonction de phase et les distances vues dans le sous-paragraphe précédent.

**Estimation de la diffusion par dipôle** Le concept de dipôle formé par deux sources lumineuses permet de donner une approximation volumique de la diffusion [EVNT78, FPB92]. Il s'agit de placer

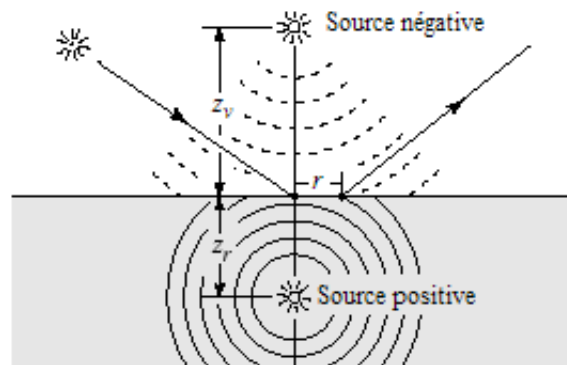


FIG. 1.19 – Approximation de la diffusion par dipôle

ces deux extrémités afin que la condition aux limites de l'équation de transport intégral-différentielle, soit satisfaite. Le dipôle est formé d'une source positive correspondant à la lumière dispersée dans le milieu transparent, et donc placé dans ce même milieu. La seconde, négative, est placée au dessus et aspire la lumière, par analogie à l'absorption du milieu.

L'évaluation de la réflectance, rapport entre la radiosité (ce qui sort) et l'irradiance (ce qui arrive), s'effectue d'abord en calculant la radiosité (exitance radiante totale). La radiosité (exitance) est alors calculée à l'aide du dipôle. Une fois l'exitance totale calculée, elle est convertie en radiance  $L_d$  à l'aide des facteurs de transmittance et de transmittance diffuse de Fresnel.

### Application au rendu de peau

La peau est un matériau qui possède une composante de dispersion élevée (son albedo  $W = 0,95$ ) et hautement anisotropique ( $g=0,85$ ). Cela implique que le nombre moyen de collision dans les particules en suspension est au moins de 100, ce qui limite les performances de la méthode de lancé de photon de Hanrahan. C'est pourquoi la BSSRDF de [JMLH01, JB02] est intéressante pour rendre la peau, compte tenu qu'elle est indépendante du nombre de collisions. De plus, la BRDF ne réussit pas à rendre les effets d'éclairage rasant alors que la BSSRDF renvoie un résultat probant. Les temps de rendu des phénomènes de dispersion subsurfacique se rapprochent du temps-réel à l'aide de cartes pré-calculées [HV] ou mieux, d'une simplification efficace de la BSSRDF [MKB<sup>+</sup>03b, MKB<sup>+</sup>03a].

## 1.6 Tableaux récapitulatifs

	Réalisme	Performance	Généralisation
Enrobage	+	+++	-
Déf. à forme libre	++	++	+
Surface implicite	+	++	+
Modèle en couche	+++	+	++

TAB. 1.2 – Animation de peau : comparatif des méthodes



Les modèles de déformations à forme libre sont une généralisation de l'enrobage. Toutefois, comme pour la modélisation par surface implicite, ils sont totalement déconnectés d'un modèle physique. Au contraire, les modèles en couche sont plus à même de reproduire des phénomènes biomécaniques. Cependant, un tel maillage, en plus d'être difficile à concevoir, reste très coûteux à animer.

		Réalisme	Performance	Généralisation
Modèle phénoménologique	Textures	+	++	-
Modèle subsurfacique	BTF	++	+	-
	BSSRDF	+++	-	+
Modèle microscopique	BTF	+++	-	+

TAB. 1.3 – Rendu de peau : comparatif des méthodes

Le modèle phénoménologique reste le plus utilisé. Pour simuler les ridules, différentes textures utilisées peuvent être générées par des modèles à plus petites échelles. Cependant, ces techniques ne simulent pas la dispersion subsurfacique liée à la nature de la peau. Seuls des modèles comme la BTF ou la BSSRDF permet de simuler ces phénomènes. Cette dernière est très réaliste mais est pour l'instant réservée à un cadre de rendu en temps interactif. Enfin la BTF permet de concilier le rendu des ridules avec la dispersion subsurfacique.

## 1.7 Conclusion

La peau a été modélisée avec plus ou moins de succès à toutes les échelles : structure cellulaire (réfraction subsurfacique), microstructure (ridules), mesostructure (réseau de ridules) et enfin macrostructure (rides). L'animation est d'autant plus critique qu'elle doit être non seulement réaliste mais aussi temps réel.

Quant à l'éclairage, à petite échelle, de nombreux travaux restent à effectuer pour représenter de manière fidèle, points noirs, pores, cicatrices et autres follicules pileux. Ainsi, le prototypage de fards ou de des crèmes anti-rides nécessite de redéfinir un modèle de microstructure que ce soit pour le rendu ou l'animation.

Pour la biomécanique ou la chirurgie assistée par ordinateur, des méthodes de résolutions plus précises sont utilisées, comme les éléments finis. Même si les modèles musculaires sont enrichis à l'aide de données biomécaniques, il reste de nombreux efforts à effectuer pour obtenir un représentation fidèle des mouvements du corps humain.



# Animation et rendu des cheveux

## 2.1 Introduction

La simulation de la chevelure se suit selon trois orientations, le couple classique du mouvement et de l'animation et la représentation fidèle d'une coiffure déterminée [MTH02]. Durant les années 1990, la fourrure et les cheveux courts ont été modélisés à l'aide des textures volumiques. Le défi qui se pose désormais est d'animer de manière réaliste des cheveux longs, coiffés ou non.

### 2.1.1 Anatomie du cheveu

En effet, près de 100.000 à 150.000 cheveux d'un diamètre variant de 0,05 à 0,09 mm poussent sur le cuir chevelu. Ce sont des cylindres longs, d'épaisseur et de courbure plus ou moins grandes. Le caractère spécifique du cheveu influe à la fois sur le mouvement et le rendu. Les conditions de l'environnement comme l'humidité ou l'ensoleillement peuvent modifier le comportement et l'éclairage d'un cheveu.

### 2.1.2 Problématiques

La figure 2.1 illustre bien les difficultés liées à la représentation de la chevelure : leur nombre important et la forme particulière du cheveu.

De nombreuses interactions électrostatiques apparaissent entre les cheveux et les contraintes imposées par la coiffure. Le mouvement doit ainsi tenir compte non seulement de la densité, la distribution et l'orientation de chaque cheveu mais aussi des forces d'attraction et de répulsion, des collisions et auto-collisions. Pour l'éclairage, les difficultés proviennent de l'aliassage, des ombrages internes et de la semi-transparence de la chevelure.

Compte tenu des différences de comportement, les approches pour les cheveux courts ne sont pas directement transposable pour représenter une longue chevelure. Les méthodes de simulation se divisent donc en trois groupes, les cheveux courts, longs et les coiffures. La simulation des cheveux courts a été réalisée très tôt. Par contre, les cheveux longs attirent un cortège de difficultés tant pour l'animation que pour le rendu. L'élaboration d'une coiffure à travers la recherche de méthode de modélisation constitue à lui seul, un autre problème.

### 2.1.3 Premiers modèles de chevelure

Depuis une trentaine d'années de nombreux chercheurs se sont échevelés à rechercher une représentation qui soit à la fois réaliste et performante. On distingue quatre voies qui sont le rendu masse de

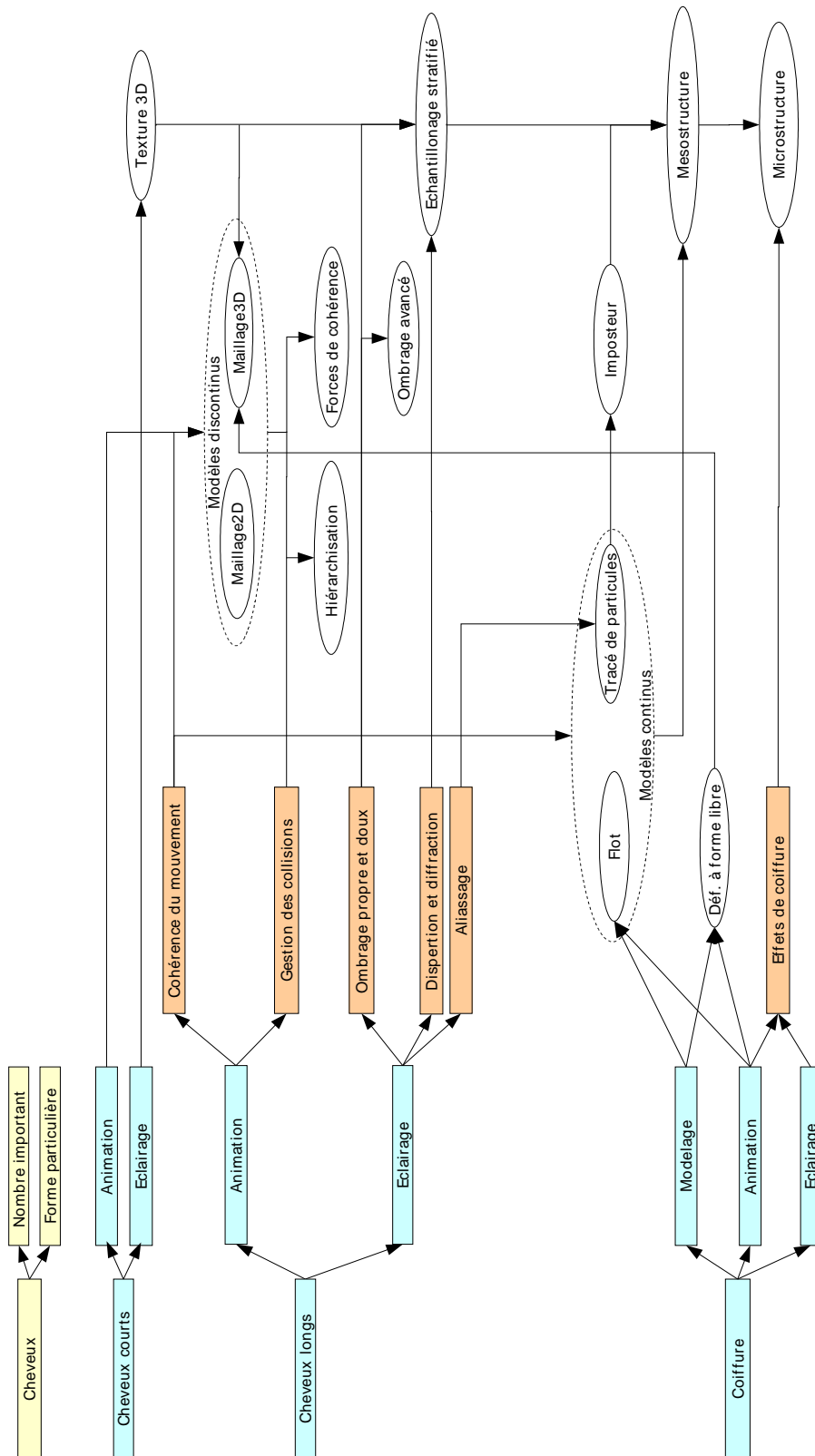


FIG. 2.1 – Vue générale de la simulation de cheveux

cheveux, textures volumique, des techniques se basant sur un bruit 3D et enfin le modèle explicite ou cheveu par cheveu [Rya97].

### Masse de cheveu

Ces techniques essaient de modéliser la chevelure comme un polyèdre texturé. Le premier modèle est un polyèdre fixe [CHP<sup>+</sup>79]. Ce modèle a été ensuite animé, constitué par une série d'imposteurs<sup>3</sup> se déplaçant suivant un squelette d'animation. Ces plans sont ensuite superposés en couche pour donner l'impression d'épaisseur [DiP89]. Deux textures permettent d'obtenir des effets plus complexes : l'une étant la représentation réaliste d'une chevelure, l'autre étant une carte de réflexion pré-calculée. Malheureusement, cela produit des reflets métalliques [YS87].

### Bruit volumétrique

Alexei Sourin en approfondissant la modélisation fonctionnelle, a proposé de l'appliquer à la chevelure [SPS96]. La surface est modélisée à l'aide de potentiels fixés par des primitives, les fonctions réelles sont mélangées non linéairement suivant la théorie des ensembles. Le cheveu est alors considéré comme un bruit 3D. Ces fonctions implicites permettent alors de définir la chevelure de manière entièrement procédurale. Toutefois, la principale limite vient justement de la modélisation du cheveu. Etant un bruit volumétrique, ce modèle n'est pas très réaliste et il reste difficile à animer.

## 2.2 Génération de la coiffure

### 2.2.1 Placement des cheveux sur le cuir chevelu

Le problème est de placer les cheveux de façon régulière et naturelle. En premier lieu, on peut se limiter à une distribution de segments, tous orientés selon la même directions, divisés en deux couches selon la hauteur (fourrure épaisse et duvet). Les poils sont disposés selon un disque de Poisson plaqué sur un tore afin d'obtenir de bons raccords de texture [KK89].

Le scalp peut être défini de manière plus réaliste à l'aide d'une surface de Catmull-Rom (a) [BCN03]. Le plaquage harmonique permet un placement régulier des mèches sur le cuir chevelu (figure 2.2 (b)) [EDD<sup>+</sup>95]. Pour cela, on inverse la fonction associant à chaque sommet, des coordonnées de texture, telle que la chevelure soit uniformément répartie. Enfin la hauteur des cheveux est définie selon une carte de hauteur, plaquée dans l'espace des paramètres  $u,v$  défini précédemment (c). Le résultat peut être observé en (d).

### 2.2.2 Modélisation de la coiffure

Les NURBS peuvent modéliser le volume de la coiffure [MVH02]. Ces surfaces sont paramétrées par la position du squelette de la mèche. Les courbes isoparamétriques, calculées sur la surface NURBS, servent de guide pour l'extrusion des sous-mèches le long de la chevelure. Ces dernières seront extrudées suivant un profil plus ou moins circulaire [NTPW04]. Autrement des primitives issues de la mécanique de fluide permet de modéliser la coiffure dans un modèle vu dans une section ultérieure [SMT00].

<sup>3</sup>Plan orthogonal à l'axe de vision qui simule une géométrie complexe à l'aide d'une texture.

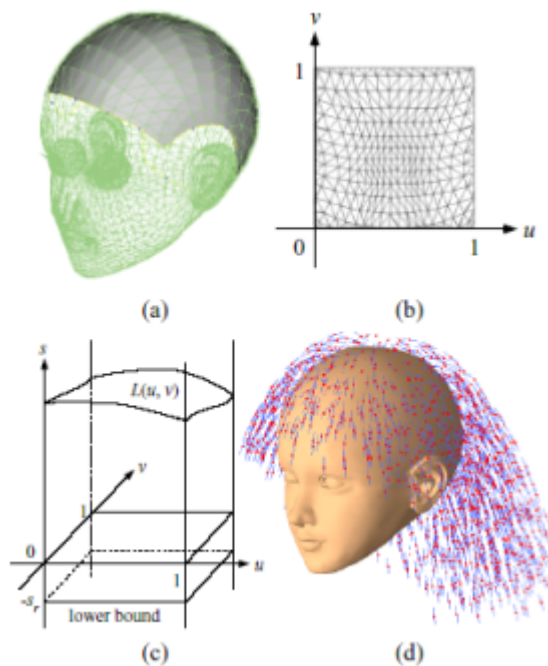


FIG. 2.2 – Placement des cheveux selon Bando et al.

## 2.3 Animation d'un cheveu

Etant limités en puissance de calculs, une mèche de cheveu a été considérée avant un cheveu unique [YS92, WS89]. Est-il raisonnable actuellement, même avec l'accélération matérielle offerte par le processeur graphique, de vouloir représenter une centaine de milliers de cheveux [Gre00]? Après examen des diverses méthodes historiques, on se rend compte que c'est le modèle incontournable pour une animation et éclairage réaliste (ombrage entre cheveux et ombrage propre à la chevelure). Ce modèle ainsi que les modèles de chevelure l'utilisant, seront détaillés dans la section suivante.

Cette section propose d'introduire les bases de l'animation cheveu par cheveu. Ce modèle masse-ressort est intuitif et adapté pour de longs cheveux et sera réutilisé dans les sections plus spécifiques à l'animation de chevelure.

### 2.3.1 Modèle du cantilever

Une série de prismes à base triangulaire permettent d'obtenir une largeur constante de cheveux [WS89]. Le cheveu peut être vu comme un cantilever, généralement une poutre fixée qu'à une seule de ses extrémités [iAUK92, RCT91, AK93]. Le cheveu est alors défini comme une corde formant le squelette d'animation du cheveu. La forme du squelette est le plus souvent décrite par une suite de segments mais peut être lissée à l'aide d'une courbe de Bézier ou de Catmull-Rom. Cette représentation implique des cheveux longilignes. Pour implémenter des modèles crépus, ondulés ou frisés, le cheveu nécessite plus de segments et chaque noeud possède alors deux matrices de rotation : la matrice de courbure générale et une sous-matrice pour les boucles [MN01].

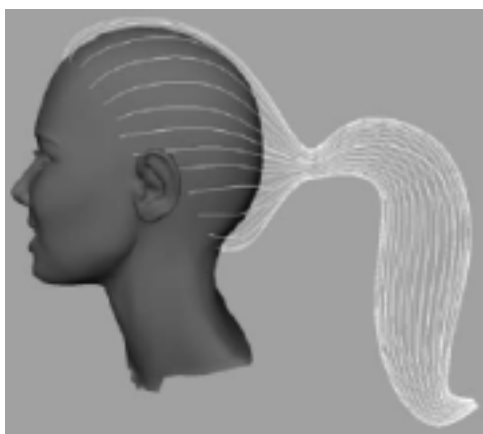


FIG. 2.3 – Extrusion des mèches à l'aide des isoparamétriques d'une NURBS

### 2.3.2 Animation

#### Gestion des positions

Le *beam bending* contraint le squelette du cheveu à suivre une trajectoire paramétrique définie, permettant de détecter les collisions sur la tête du personnage [iAUK92]. Le modèle masse-ressort a été rapidement préféré pour contrôler l'orientation et la position du cheveu de manière plus intuitive [RCT91]. En s'inspirant du modèle de cantilever [iAUK92], les principes du modèle masse-ressort sont transposés dans un modèle paramétré par des angles plutôt qu'avec des positions [AK93]. Chaque segment de cheveux est paramétré par un couple d'angle azimutal  $\theta$  et zénithal  $\phi$ . Ces derniers suivent la loi fondamentale de la dynamique appliquée aux quantités angulaires. De la même manière, le moment est décomposé en moment interne correspondant au moment du ressort (analogue à la loi de Hooke) et en moment externe (réaction, gravité et vent).

#### Gestion des collisions

Il est nécessaire de gérer les collisions et les autocollisions pour s'assurer un mouvement réaliste et une cohérence globale de la chevelure. A cause du nombre important de cheveux, il devient difficile de détecter les collisions points de contrôle du cheveu et les polygones. Les approches calculatoires proposées atteignent leurs limites dans ce cadre [PB88, MW88, LMTT91]. Toute méthode de subdivision spatiale (kd-tree/octree) est alors bienvenue même si elles sont difficiles à mettre en oeuvre pour une scène animée car il faut recalculer ces arborescences.

Les boîtes englobantes cylindriques suivent les mouvements du squelette et rapportent le problème à des collisions de sphères et de cylindres pour lesquelles le calcul des intersections est simple [AK93]. Cependant, cette méthode ne peut pas être appliquée à la détection des auto-collisions.

Inversement un cheveu peut être entouré d'un volume englobant [KN00, LK01]. Par ailleurs, la technique suivante est inspirée du z-buffer. La projection des cheveux est calculée sur un plan et une collision est détectée en fonction des différentes profondeurs des cheveux [SF92]. Enfin, un champ de force peut remplacer le test de collision [iAUK92].

Compte tenu de la différence des masses en présence, les cheveux ne rebondissent presque jamais sur le corps. Ainsi, au lieu de calculer une réaction, on peut se limiter à un contact avec frottement : lors de la collision, le point de contrôle restera collé au corps avec une vitesse tangentielle non nulle.

### Utilisation de l'accélération graphique

Le programmabilité du GPU permet d'accélérer l'animation des cheveux [Gre00] en s'inspirant de la primitive de *RenderMan* [Pix01]. Ceux-ci sont rendus par des courbes de Bézier avec un éclairage anisotropique et utilise un intégrateur d'Euler [Eli00]. Les coordonnées des points de contrôle sont calculées à partir d'attributs de sommet envoyés au *vertex program*, qui sont les points de contrôle et le paramètre d'une cubique de Bézier. L'accélération est toute relative car elle interdit d'implémenter des tests de collisions.

### Limiter la complexité à l'aide des niveaux de détails

La complexité de la chevelure peut être limitée par une représentation en niveaux de détails (LOD) et les tests de visibilité de la chevelure. En 1982, Crow propose une hiérarchie de niveau de détails afin de limiter la complexité de ses modèles [Cro82]. Le LOD doit tenir compte de la taille et de la courbure des cheveux et la distance de la caméra [NvdP98]. Lorsque la caméra s'éloigne, le cheveu devient ainsi moins épais et moins complexe permettant ainsi de conserver la structure géométrique globale de la chevelure.

#### 2.3.3 Limites

L'approche cheveu par cheveu est coûteuse, surtout dans le cadre de l'animation. Chaque cheveu étant indépendant, il reste difficile d'imprimer un mouvement global cohérent à l'ensemble de la chevelure. L'idée est alors de rajouter quelques contraintes explicites dans la sous-section suivante.

## 2.4 Animation de chevelure par modèles discontinus

Les cheveux tendent à se regrouper entre eux, à cause de forces électrostatiques d'attraction/répulsion, des impuretés des cheveux et de la coiffure. L'idée est alors de modéliser la chevelure sous formes de mèches, *wisp* regroupées de manière hiérarchique. L'hypothèse suivie ici est que la chevelure n'est pas un modèle continu, ce qui tranche avec les approches qui seront vues dans la section suivante [BKCN03]. Les fortes discontinuités de l'animation des mèches et des pointes observées de manière expérimentale, tendent à conforter ces hypothèses. Pour simuler un comportement global, les modèles ont étendu la gestion des collisions aux auto-collisions pour finir par implémenter des modèles de cohérence.

### 2.4.1 Modèles de maillages

#### Contraintes par ressorts

L'idée est de remplacer les cordes par des maillages : des ressorts [KH01], des enveloppes [PCP01] et des bandes de triangles [CJY02]. Cependant un maillage analogue à un tissu ou un modèle en couche limitent fortement les mouvements latéraux. Le mouvement de la chevelure est fortement anisotrope : les cheveux doivent être libres de se déplacer latéralement. Un paramétrage fin du maillage peut améliorer cette anisotropie mais cela reste difficile [KH01].

#### Modèle de force adaptatif

Le modèle de cohésion peut se baser sur une autre contrainte que le ressort, comme les forces d'attraction/répulsion. Toutefois, lorsque on désire conserver un maillage, il est préférable de calculer un



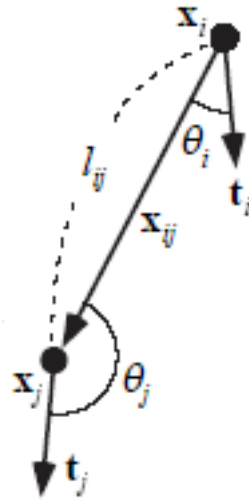


FIG. 2.4 – Modèle de force d'attraction/répulsion.

module de Young<sup>4</sup> en fonction des orientations des mèches [BCN03]. Ce coefficient est calculé en fonction de l'influence de la particule, un polynôme liant la densité de cheveux à la distance au centre de la particule et d'un coefficient de cohésion colinéaire, maximal lorsque les cheveux sont alignés avec le vecteur  $\mathbf{x}_{ij}$  et nul, quand les cheveux sont orthogonaux.

Ainsi, la force de connexion entre deux particules est  $c = al$  où  $l$  est la distance les séparant et  $a$  est un coefficient dépendant de l'alignement des cheveux désignés par les particules. Si on considère l'angle  $\theta_i$  entre la direction des cheveux associés à la particule  $i$  et de  $\mathbf{x}_{ij}$ , on peut alors écrire :  $a = |\cos \theta_i - \cos \theta_j|/2$  si  $\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j < 0$  et  $a = 0$  sinon (figure 2.4).

### Limites

Forcer les cheveux d'une même mèche à suivre un unique mouvement renvoie comportement qui n'est pas très naturel. Les mèches tendent en effet à se diviser ou se regrouper de manière dynamique. Le modèle suivant tente de répondre à ces problèmes.

### 2.4.2 Modèle hiérarchique et adaptatif de mèches

Le modèle de mèches hiérarchique et adaptatif (AWT) permet d'imprimer de façon hiérarchique, un mouvement à la fois local et global à la chevelure [BKCN03]. Ce modèle permet d'améliorer les temps de calcul en localisant les regroupements en mèches. L'animation n'est pas forcément corrélée avec la complexité géométrique. Par exemple, des cheveux bouclés auront un comportement global cohérent mais des cheveux longs pourront se regrouper et dégroupier très facilement. C'est pourquoi ce modèle applique la multi-résolution à la fois pour l'animation et la géométrie.

Pour la géométrie multi-résolution, le modèle AWT reprend le principe de multi-résolution et des cylindres généralisés (CG) [KN02]. Ces derniers permettent de raffiner progressivement les mèches et de simplifier les tests de collisions. Les super-CG se subdivisent ainsi aux sub-CG (cf figure 2.5). Compte tenu de la coiffure, les sections des sub-CG peuvent être plus ou moins circulaires .

<sup>4</sup>Raideur du ressort.

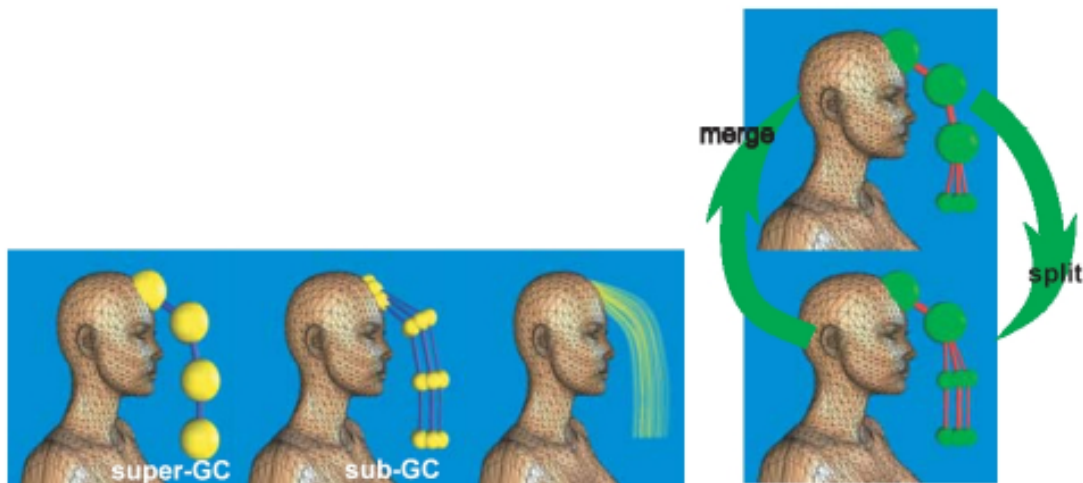


FIG. 2.5 – Modèle AWT : géométrie et animation multi-résolution

Quant à l'animation, le modèle AWT est basé sur l'hypothèse que le regroupement en mèches évolue de façon progressive, de la racine des cheveux où les cheveux sont fortement groupés, aux extrémités où les cheveux sont plus libres. Cette structure modélise ainsi une mèche comme un arbre acyclique : elle se modifie dynamiquement selon le mouvement : des sous-mèches peuvent se détacher ou fusionner entre elles. Les segments peuvent être représentés par des ressorts plus ou moins rigides, selon la nature des cheveux. La séparation et le regroupement s'effectuent lorsque la chevelure subit localement une forte accélération. Enfin, la propagation est contrainte pour éviter que des cycles ne se forment.

### Traitement des collisions

Pour les collisions entre mèches, les cylindres généralisés permettent d'accélérer la détection.

Les auto-collisions sont en partie générées par la structure même de l'AWT car les sous-branches de l'arbre ne peuvent pas donner des intersections. Ce modèle de collision est anisotrope [PC02]. Il permet que deux mèches parallèles s'interpénètrent mais l'interdit pour deux directions différentes. Des forces sont requises : une force de frottement visqueuse et une force de répulsion inversement proportionnelle à la distance des deux mèches, déclenchée sur un angle limite.

### Limites

Cette classe de méthode reste difficile à paramétrer : quand et comment faut-il regrouper/dégroupier les mèches de cheveux ? Enfin, pour les interactions terminales entre cheveux, l'hypothèse du modèle discontinu de cheveu n'est plus forcément vraie car les terminaisons suivent le même mouvement.

## 2.5 Animation de chevelure par modèles continus

### 2.5.1 Modèle basé sur la dynamique des fluides

Ces modèles tentent d'exprimer la coiffure de manière continue en appliquant des notions de dynamique des fluides. Cela permet de se débarrasser des discontinuités qui peuvent apparaître lors de

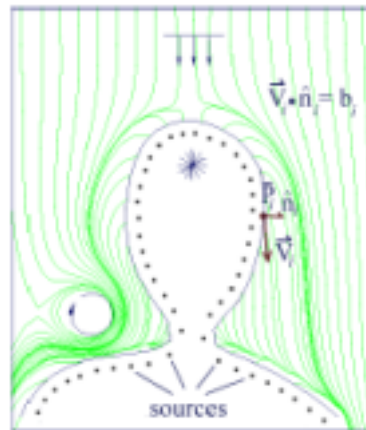


FIG. 2.6 – Modélisation de coiffure à l’aide de primitives

l’animation du modèle explicite en considérant les cheveux comme les courants d’un fluide considérés à un instant  $t$  [SMT00].

### Analogies chevelure et fluide

Les cheveux suivent les courants qui seraient formés par l’écoulement d’un fluide virtuel du haut de la tête aux épaules. L’écoulement libre<sup>5</sup> permet de modéliser un cheveu comme un jet d’eau, jaillissant du cuir cheveu mais tendant ensuite à ployer la gravité. Les collisions et auto-collisions sont naturellement traitées par la nature même du fluide car un fluide ne pénètre jamais dans un obstacle et deux courants ne peuvent s’intersecter.

Les diverses perturbations induites par le profil de la tête et proposées par l’utilisateur pour la coiffure sont prises en compte, à travers les tourbillons et les turbulences. Enfin, le point de stagnation d’un fluide<sup>6</sup> permet de modéliser la séparation des mèches.

### Modèle de coiffure

Trois primitives, le courant, la source ponctuelle et le tourbillon permettent de modéliser la chevelure de façon plus efficace et intuitive [SMT00] qu’avec la méthode explicite paramétrique vue précédemment. La vitesse à un point  $\mathbf{p}_i$  sera alors la somme des contributions de ces trois primitives. Le courant permet de modéliser la gravité en fixant un courant global. Le tourbillon permet de recourber certaines parties pour créer des boucles. Les sources permettent de faire jaillir le cheveu du cuir chevelu et de constituer un obstacle pour les collisions. La réaction à la frontière du cuir chevelu sera fixée par le produit scalaire  $\mathbf{b}_i = \mathbf{v}(\mathbf{p}_i) \cdot \mathbf{n}_i$  où  $\mathbf{n}$  est la normale.

Afin d’améliorer la coiffure, il est intéressant d’ajouter du bruit sur la direction des cheveux. On peut agir au niveau des cheveux : la position du point de contrôle sera perturbée selon une probabilité proportionnelle à sa distance au cuir chevelu. Le champ est aussi perturbé de façon volumétrique selon un vecteur bruité formé par du bruit de Perlin, des fractales ou des harmoniques.

<sup>5</sup>Le fluide fuit à vitesse constante.

<sup>6</sup>Lorsqu’un fluide rentre en collision de façon frontale sur une surface, deux courants de directions opposées se forment et il existe un point de stagnation où la vitesse est nulle et la température du fluide la plus élevée.

## Limites

Ce modèle est relativement complexe à calculer et est limité à une scène statique, les temps de calcul restant rédhibitoires. De plus s'étant affranchi des discontinuités, il devient difficile de les représenter. Ce problème est analogue à la subdivision de surface où ayant obtenu des surfaces parfaitement lisses, il est difficile de modéliser les discontinuités.

Autrement, la modélisation par flot ne peut pas représenter le regroupement des cheveux en mèches. Cet effet doit être alors simulé arbitrairement à travers divers paramètres. L'approche suivante, moins calculatoire, basée sur des particules, tente d'améliorer le temps de rendu.

### 2.5.2 Modèle de maillage reconstruit dynamiquement

Dans le cadre d'une animation temps réel, les particules relaxées, (*loosely connected particles*, LCP) [BCN03] s'inspirent des *smoothed particles* présentées ci dessous.

#### Smoothed particles

Les *smoothed particles* représentent des points d'échantillonnage qui permettent de donner une approximation de quantités physiques et de leurs dérivées locales dans un espace déterminé [Mon92]. Elles peuvent être appliquées à l'animation pour simuler des fluides cosmologiques, l'animation de corps inélastiques rigides, déformables ou visqueux [DG96]. Pour la simulation des cheveux, ces particules ne servent plus à modéliser un cheveu de façon classique à travers le squelette d'animation, mais plutôt stocker une densité de cheveu. Cela permet de conserver à la fois les propriétés dynamiques du cheveu et de considérer en même temps, celles de la chevelure, pour un coût de calcul moins important.

#### Modélisation de la chevelure

Chaque particule représente une répartition de cheveu : sa masse correspond à la masse de cheveux et la densité, au nombre de cheveux considérés dans le volume associé à la particule. La densité globale, donc la répartition de la chevelure, est alors une somme lissée des densités de chaque particule. Pour le calcul des réactions aux auto-collisions, les auteurs recalculent la densité entre les particules les plus proches.

Comme les particules ne désignent pas directement la position des points clés des cheveux, il est nécessaire d'effectuer quelques calculs pour reconstruire les mèches. Les particules sont séparées en deux groupes, celles qui sont proches du cuir chevelu et celles qui en sont éloignées, pour pouvoir leur imprimer deux comportements spécifiques. Il s'agit d'abord de regrouper les particules censées former les mèches en effectuant par une recherche au plus proche voisin. La liaison ainsi créée entre deux particules permet de créer un maillage masse-ressort.

#### Gestion des interactions cheveux-cheveux

Toutes les forces du système s'inscrivent dans la théorie de l'hydrodynamique des *smoothed particles* (SPH). Les forces d'attractions/répulsions s'écrivent fonction des masses, des densités de cheveux et d'une pression, différence entre la densité courante et une densité de base. Les forces externes comme la gravité, les frottements de l'air, l'inertie, les collisions avec le corps sont des applications directes de cette hydrodynamique.

## Limites

Il reste difficile de paramétrer ce modèle pour des coiffures complexes car la courbure n'est pas calculée de façon physiquement exacte et la position de chaque cheveu n'est pas explicitée. Comme ce sont des densités qui sont calculées et non pas les positions, il est obligatoire d'utiliser des imposteurs. Or, ils peuvent produire certains artefacts désagréables à l'oeil. Enfin, l'implantation des niveaux de détails est difficile mais reste envisageable. Finalement, le modèle choisi rend difficile le groupage dynamique vu pour les AWT.

## 2.6 Rendu d'un cheveu

### 2.6.1 Géométrie

Deux méthodes s'imposent afin de produire la géométrie du cheveu, l'enrobage et les imposteurs. La première des méthodes construit le squelette du cheveu animé par une série de segments. Des cylindres peuvent alors suivre la déformation du squelette selon la méthode de l'enrobage vu dans la section de l'animation de la peau. Le rendu des facettes s'effectue plus efficacement selon la technique des imposteurs, *bill boarding*. Pour améliorer le réalisme, les imposteurs sont orientés en fonction de la direction des cheveux et doté d'un coefficient de transparence, directement proportionnel à l'angle formé [BCN03].

Une fois la géométrie obtenue, le modèle d'éclairage de Kajiya et Kay reste le modèle anisotropique de référence [KK89]. Il simule en plus un éclairage arrière : lorsque le cheveu se trouve derrière une objet éclairé, il diffuse cette lumière. Pour le film *Stuart Little*, ce modèle a été étendu pour une fourrure non peignée et mouillée [Bru99].

### 2.6.2 Modèle d'éclairage anisotropique d'un cheveu

#### Présentation

Dans un modèle anisotropique, la lumière est influencée, en plus de l'angle zénithal  $\theta$ , par l'angle azimutal  $\phi$ . L'anisotropie provient de la structure du matériau, le grain, défini par un certain alignement, pour lequel la lumière est réfléchi pour un angle optimal. Le satin, le cheveu, l'aluminium brossé (sur les vieux boutons de chaîne stéréo), CD sont des matériaux anisotropiques.

Le modèle de Kajiya et Kay est un modèle simple d'éclairage anisotropique, plus adapté au rendu de cheveu que le modèle de Phong [KK89]. Si le cheveu est assimilé à un cylindre, le modèle de Phong risque d'induire un mauvais éclairage, dû aux différences trop importantes ou trop faibles entre les normales de chaque facette représentant le cheveu. Kajiya et Kay adaptent alors ce modèle en préférant le vecteur tangente, porté par l'axe du cheveu. En effet, si on considère que cette tangente est orthogonale à la normale, le cheveu reflète un maximum de lumière lorsque la lumière est orthogonale au cheveu. L'analogie avec le modèle de Phong consiste à remplacer le cosinus par un sinus.

#### Composante de diffusion

En utilisant la définition de la diffusion lambertienne, on écrit simplement :

$$\rho_d = k_d \mathbf{l} \cdot \mathbf{l}' = k_d \sin(\mathbf{t}, \mathbf{l})$$

La composante de diffusion est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la tangente et la lumière. Pour un éclairage perpendiculaire, la chevelure est sombre mais elle est éclairée pour un éclairage rasant.

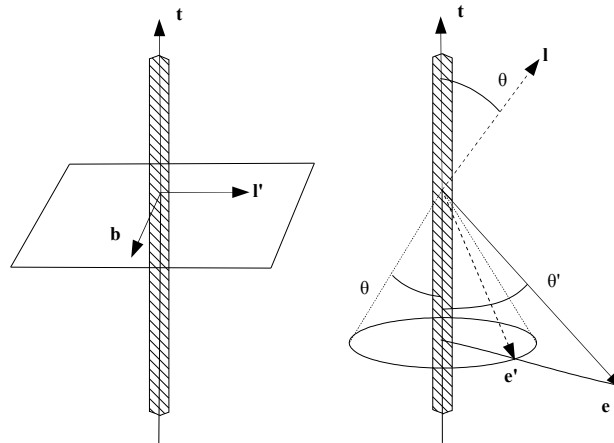


FIG. 2.7 – Modèle de Kajiya-Kay

### Composante spéculaire

La composante spéculaire est indépendante de l'angle azimutal. On écrira

$$\rho_s = k_s \cos^n(\mathbf{e}, \mathbf{e}') = k_s [\mathbf{t} \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{e} + \sin(\mathbf{t}, \mathbf{l}) \sin(\mathbf{t}, \mathbf{e})]^n$$

### Implantation et limitation

Finalement, le modèle peut se réécrire en  $I_s = \min(1, \frac{1}{2}((\mathbf{t} \cdot \mathbf{l}) + (\mathbf{t} \cdot \mathbf{e})))$  où  $\mathbf{t}, \mathbf{l}$ , et  $\mathbf{e}$  représentent respectivement le vecteur tangente au cheveu, la direction de la lumière et la direction de la caméra.

Une des limitations de ce modèle est qu'il ignore l'influence de la longueur du cheveu. Cependant, ce problème n'a pas lieu d'être si on représente des cheveux par des tronçons d'une taille raisonnablement faible.

## 2.7 Rendu des cheveux courts

Le but du rendu avec textures volumétriques est de limiter la complexité géométrique du modèle tout en produisant la complexité et la richesse de détails de l'éclairage. Cette technique se limite toutefois à des cheveux courts et à des fourrures.

L'idée est donc de modéliser un maillage tridimensionnel et d'y appliquer une texture volumique de chevelure. Les déformations du maillage vont ainsi se répercuter sur la texture volumique. Blinn a été un des premiers à avoir l'idée des textures volumétriques pour représenter les anneaux de Saturne [Bli82]. En 1988, Miller a conçu un modèle de bâtons orientés dans différentes directions, avec des réflexions anisotropiques variant selon les cheveux. Un an plus tard, Perlin et Hoffert proposent l'hypertexture [Per89]. La même année Kajiya et Kay produisent leur première texture volumique afin de produire un ours tout de peluche velu [KK89].

L'approche de Kajiya et Kay consiste à modéliser la fourrure sous forme de texture tridimensionnelle, appelée texture volumétrique ou encore *texel*. Comme une texture bidimensionnelle classique, cette texture sera interpolée et déformée selon le volume sur lequel elle est plaquée. En plus d'une carte couleur, est associée une carte d'éclairage afin de calculer l'éclairage de la chevelure en temps-réel.

## 2.7.1 Du modèle de matériau à la texture volumique

### Modèle de matériau semi-transparent

Ce modèle possède des définitions analogues au modèle semi-transparent de Hanrahan et Krueger, à la différence que les phénomènes de réfraction sont ignorés. Cette dispersion primaire est calculée fonction de l'albédo, de la fonction de phase, de la densité volumique  $\rho$  et de l'atténuation est liée à l'exponentielle de la distance parcourue dans le matériau. Ceci se résume dans l'équation suivante.

$$L = \int_d \exp(-\tau_d) \cdot \rho(x, y, z) \cdot \left[ \sum_i^n L_i(x, y, z) p(g) \right] \cdot dt$$

### Texture volumique

Afin de transcrire le modèle d'éclairage défini précédemment, cette texture de coordonnées  $x, y, z$  est alors composée d'un triplet  $\rho, B, \psi$ .  $\rho(x, y, z)$  représente une densité volumique. Ce scalaire décrit la probabilité de collision  $u$  rayon avec une particule du matériau.  $B[n(x, y, z), t(x, y, z), b(x, y, z)]$  correspond à l'orientation de la particule, assimilée à un miroir rattaché au texel. Dans le cas d'un cheveu, le cheveu est assimilé à un cylindre, tous les miroirs ne dépendent que de la direction tangente au cheveu et  $B$  se résume à  $B[t(x, y, z)]$ .  $\psi(x, y, z, \theta, \phi, \psi)$  est une BRDF qui détermine comment la lumière se réfléchit et englobe la notion de fonction de phase.

## 2.7.2 Application de la texture volumétrique

### Génération de la texture

Avec de tels paramètres par texel, il est difficile d'envisager une génération automatique de textures volumiques. Comment évaluer plus simplement la densité  $\rho$ ? Un lancé de rayon permet d'appliquer l'algorithme d'échantillonnage stratifié (*stratified sampling*). Lorsqu'un moteur de rendu par lancé de rayon n'est pas disponible, les instructions de rendu direct vers une texture peuvent être utiles. La texture volumique est alors obtenue en procédant couche par couche, formée chacune par le motif de chevelure, rendu en projection orthogonale, vu de dessus.

### Spécificité du plaquage de texture volumétrique

L'animation s'effectue en déformant un maillage tridimensionnel de la texture. L'interpolation se chargera ensuite de la déformation de toute la texture. Lorsque que le plaquage de texture volumique n'est pas disponible, les couches de texture sont rendues avec un plaquage semi-transparent.

### Rendu des extrémités

Le problème des terminaisons est récurrent : dans cette région, la chevelure est tellement fine qu'elle en devient presque transparente. Le résultat du lancer de rayon doit être renormalisé afin de marquer les extrémités des cheveux. En rendu scanline, il est nécessaire de rajouter un triangle de terminaison à la fin du cheveu.

## 2.7.3 Limites

Supposons qu'un cheveu soit rendu dans le texel. Si on s'en tient aux équations du modèle, l'épaisseur du cheveu est si faible (1 unité de texel) que la réflectance, liée à l'épaisseur de matériau traversée est

quasiment nulle. Ce qui donne un matériau invisible. Autrement dit, il est plus facile de représenter une chevelure que des cheveux [KK89]. Cela implique des difficultés pour l'animation et l'ombrage. Un modèle de collision n'est pas vraiment utile dans le cas d'une chevelure de longueur limitée, de toute manière, il est difficilement applicable au sein du maillage 3D.

Enfin, le plaquage de texture ne donne pas de résultat acceptable si le maillage 3D est trop déformé. En pratique, cela signifie que les cheveux doivent avoir une longueur comprise en  $l$  et  $\frac{3}{4}l$ ,  $l$  étant la longueur du texel, pour éviter une déformation trop marquée de la texture volumique [MN01]. La texture volumique est donc limitée à des cheveux relativement courts. La section suivante exposera des méthodes dédiées aux cheveux longs.

## 2.8 Rendu des cheveux longs

Dans cette section ne seront exposés que les problèmes spécifiques au rendu des cheveux .

### 2.8.1 Rendu de chevelure

Si l'éclairage d'un cheveu suit le modèle de Kajiya et Kay, pour une chevelure, il reste difficile à modéliser en raison de la nature complexe de sa géométrie. Par ailleurs, le cheveu est semi-transparent : les interactions directes et indirectes ainsi que la diffusion subsurfacique apparaissent dans une chevelure. Enfin, des effets de diffraction peuvent apparaître à cause de l'épaisseur des cheveux.

**Lutter contre l'aliasage par un mélange de couleurs** La fumée, un vêtement et de la fourrure ont été modélisés à l'aide de milliers de polygones [CHP<sup>+</sup>79]. Compte tenu du nombre et de la taille des cheveux, pour une image 1000x1000, un cheveu aura la taille d'un tiers de pixel, ce qui est à l'origine de l'aliasage. La fourrure ressemble alors à une forêt d'épines. Le *pixel blending* travaille dans l'espace image [LTT91] et s'inspire d'un système particulière pour rendre de l'herbe [RB85]. Chaque particule d'une taille inférieure au pixel n'est pas directement représentée mais contribue à la couleur du fragment. La couverture sub-fragment de chaque cheveu utilise les fonctions d'alpha blending. Le cumul sur le canal alpha évite de recalculer les composantes de couleur.

**Tests de visibilité de la chevelure** Il est utile d'éviter de rendre les cheveux non visibles. Le test de visibilité du cheveu est une extension au test classique des faces cachées pour un objet, effectué grâce à la normale au point de contrôle. La difficulté provient de cheveux longs qui seraient tantôt visibles et tantôt invisibles. Il faut ainsi prévoir une marge de tolérance selon l'angle de visibilité ainsi qu'une occultation progressive de ce type de cheveu [Neu01].

### 2.8.2 Ombrage de la chevelure

L'éclairage global de la chevelure consiste à ombrer certaines parties de la chevelure qui sont occultées par d'autres cheveux de cette même chevelure (ombrage propre). Sachant que la géométrie de la chevelure évolue à chaque instant, on se rend compte qu'il est difficile d'appliquer cet ombrage en temps réel .

#### Cartes d'ombre

La méthode de Lengyel permet d'obtenir une ombre de grande qualité mais statique [Len00, LP01]. L'éclairage est pré-calculé, rendu dans une texture pour être ensuite plaqué dans une unique passe de multi-textures. Pour obtenir des ombres en temps réel, une carte d'ombre calculée sur le matériel



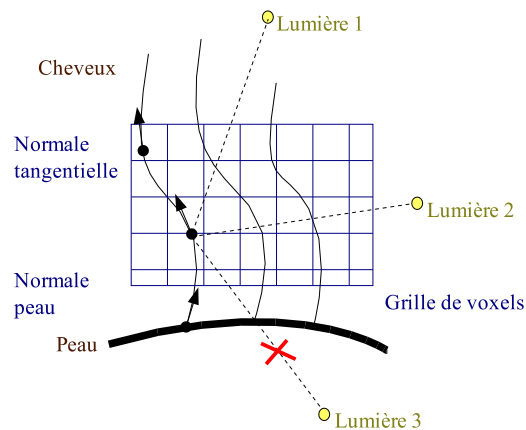


FIG. 2.8 – Calcul de l’ombrage de la chevelure

[LTT91]. De la même manière, le *billboard splatting* proposé pour le rendu de nuages assure un ombrage propre à la chevelure [DKY<sup>+</sup>00].

**Insuffisance de la carte d’ombre** Les cartes de profondeur traditionnelles de l’espace scène sont insuffisantes car des phénomènes d’aliasage apparaissent à cause de sa résolution limitée. Les cartes d’ombres sont limitées par deux discrétisations, celle de la profondeur et celle du plan de projection. Ce défaut est particulièrement criant pour une géométrie aussi complexes que la chevelure. De plus, l’ombrage de la chevelure est particulier, car il est induit par plusieurs couches de cheveux semi-transparentes. Comme le caractère binaire de la carte d’ombre interdit tout effet de transparence, il est nécessaire de combiner plusieurs textures d’ombres ou bien d’utiliser une extension des cartes d’ombres : *deep shadow map*, application temps réel de l’algorithme d’échantillonnage stratifié.

### Ombrage de la chevelure par cartes d’ombres avancées

**Limiter l’aliasage** L’aliasage du plan de projection peut être limité par un échantillonnage stochastique. Plus prosaïquement, le rendu *jitter* est effectué à l’aide de plusieurs passes avec un décalage ou en utilisant une marche aléatoire. Par ailleurs, Reeves propose le filtre PCB (percentage close filtering). Lorsque le fragment est re-projeté dans l’espace scène, il recouvre une région centrée autour du pixel, une fois cette région convoluée, on obtient non plus un niveau unique (blanc/noir) mais des nuances, ce qui permet de simuler des pénombres.

**Deep shadow map** Lokovic a eu l’idée d’étendre la profondeur du z-buffer, d’où le nom de deep shadow map [LV00]. Une fonction de transmittance est associée à chaque pixel du z-buffer. De cette manière, il a réussi à implémenter ombrer correctement des nuages ou une chevelure. On cumule les contributions suivant la profondeur traversée à l’aide des points de contrôle rencontrés dans le voxel de l’octree construit pour l’occasion.

Les cartes d’ombres sont calculées de manière statique et elles nécessitent un gros travail de post traitement [LV00]. Lorsque la chevelure est animée en temps réel, on se rend alors compte des limites de cette technique. Une solution plus rapide est de calculer et de stocker les données d’ombrage de chevelure pour chaque point de contrôle du cheveu, plutôt que de recalculer la carte à chaque fois [NvdP98] (figure 2.8).

**Opacity shadow map** Les cartes d’ombres opaques (*opacity shadow map*, OSM) permettent de simuler en temps réel les ombres propres [KN01]. L’idée est d’adapter la méthode précédente [LV00] sur les cartes graphiques actuelles. Les OSM utilisent un ensemble de cartes d’opacité parallèles et orthogonales à l’axe de la lumière. Chaque pixel est associé à une valeur d’opacité. Le nombre de cartes étant limité, la profondeur est échantillonnée selon le nombre de cartes, le long du chemin de la lumière.

## 2.9 Tableaux récapitulatifs

On se rend compte que les modèles sont très spécialisés, que ce soit au niveau de l’animation que du rendu.

		Réalisme	Performance	Généralisation
Modèles discontinus	Maillage 3D	+	++	-
	Corde	+++	+	-
	Modèle hiérarchique	++	++	-
Modèles continus	Flot	++	-	-
	Tracé de particules	+	+	-
Modélisation de la coiffure	Flot	++	-	-
	Déformation à forme libre	+	-	-

TAB. 2.1 – Animation de cheveux : comparatif des méthodes

Pour l’animation, le modèle de maillage 2D (cordes) reste tributaire du modèle des forces de cohésion. Le modèle hiérarchique essaie d’améliorer cette cohésion mais reste très difficile à paramétrer. La méthode des flots et la déformation à forme libre permet de créer des coiffures statiques réalistes mais difficiles à animer. Au contraire, le tracé de particules est limité à des cheveux longs non coiffés mais en permet l’animation. Comme pour le maillage 3D, le modèle par tracé de particule interdit de traiter les cheveux dans leur individualité, seulement par groupes indivisibles. Ceci limite le réalisme de l’animation et du rendu.

	Réalisme	Performance	Généralisation
Texture volumique	+	+++	-
Modèle mésoscopique	+	++	-
Modèle microscopique	+++	-	+

TAB. 2.2 – Rendu de cheveux : comparatif des méthodes

Le modèle mesoscopique reste le modèle passe partout. Il est lui-même utilisé pour produire les textures volumiques. Toutefois il sera nécessaire de modéliser la microstructure pour simuler le modèle d’éclairage de cheveux mouillés ou bouclés ou les effets spécifiques connu en coiffure (brillance, mèches, volume, tenue ...).

## 2.10 Conclusion

Pour l’animation des cheveux courts, le problème est résolu à l’aide des textures volumiques. L’animation des cheveux longs a fait d’énormes progrès grâce à des modèles continus et discontinus. La

première classe est préférée mais il reste difficile de proposer des forces de cohérence anisotropes pour obtenir un mouvement réaliste.

Au niveau des modèles d'éclairage, le modèle de Kajiya et Kay reste une référence pour un cheveu. S'il a bénéficié de quelques variantes pour simuler les cheveux mouillés, ce dernier ne suffit pas pour les applications cosmétiques. La chevelure constituant un milieu semi-transparent, il est nécessaire d'appliquer des méthodes issues de l'illumination globale.

L'étude cosmétologique de la chevelure ainsi que la coiffure virtuelle introduisent de nouveaux besoins de réalisme. Ainsi, les cheveux ne sont pas encore modélisés sous des environnements différents (humidité, après le passage d'un peigne ou mise en plis). Il faudrait de construire un modèle de micro-structure basé sur la structure du cheveu.

La modélisation de la coiffure, partiellement développée ici, est un thème intéressant à traiter, tant au niveau de la coiffure virtuelle que de l'animation. Il reste ainsi à proposer une méthode de modélisation et de génération de coiffures complexes.



## 3

# Animation et rendu de vêtements

## 3.1 Introduction

Dans le domaine de l'image de synthèse, la création des personnages nécessite une simulation fidèle des vêtements qu'ils portent, ainsi que des outils de modélisation rapides et intuitifs.

La création d'un modèle réaliste d'animation est difficile mais pas impossible. Lorsqu'on pose un drap sur une table, il n'y aura presque jamais deux configurations identiques. Cette multiplicité est causée par de complexes interactions tant au niveau microscopique que macroscopique. La résolution du système de l'animation reste plus critique que le rendu des différents modèles de matériaux, compte tenu de la complexité du maillage. Cependant, pour des vêtements tissés, il est devenu tout aussi ardu de modéliser l'éclairage d'un tel matériau. En considérant ces difficultés, la simulation des vêtements emprunte deux chemins : rendre la physique du vêtement à partir d'un modèle de tissu masse-ressort, examiné en première partie et rendre les effets d'illumination du vêtement suivant le modèle d'éclairage des fibres, en seconde partie de cette section.

Les problèmes liés à la création des vêtements, comme l'assemblage des pièces et à l'automatisation de l'habillage des personnages virtuels ne sont pas traités ici. C'est pourquoi le terme tissu est généralement préféré à celui de vêtements.

## 3.2 Animation du tissu par maillage masse-ressort

### 3.2.1 Premiers modèles

Avant de vouloir animer ou éclairer un tissu, il est bienvenu de proposer un modèle. Cette sous-section introduit les premiers modèles ainsi que des extensions autour du modèle éprouvé de maillage masse ressort.

#### Modèle géométrique

Dans le cadre de personnages virtuels, les premiers vêtements sont construits à partir des panneaux polygonaux rigides qui sont ensuite assemblés et attachés aux acteurs [CYMTT92, TPBF87].

En 1986, Weil a été un des premiers à essayer de modéliser un tissu en le modifiant la grille de points de contrôle d'une surface paramétrique [Wei86]. Lorsqu'un tissu est fixé sur un caténaire, la courbe formée s'apparente à un cosinus hyperbolique. Les plis sont ensuite générés par subdivision. Une seconde passe permet de relaxer le tissu afin de modifier la position des points de contrôles de manière réaliste.

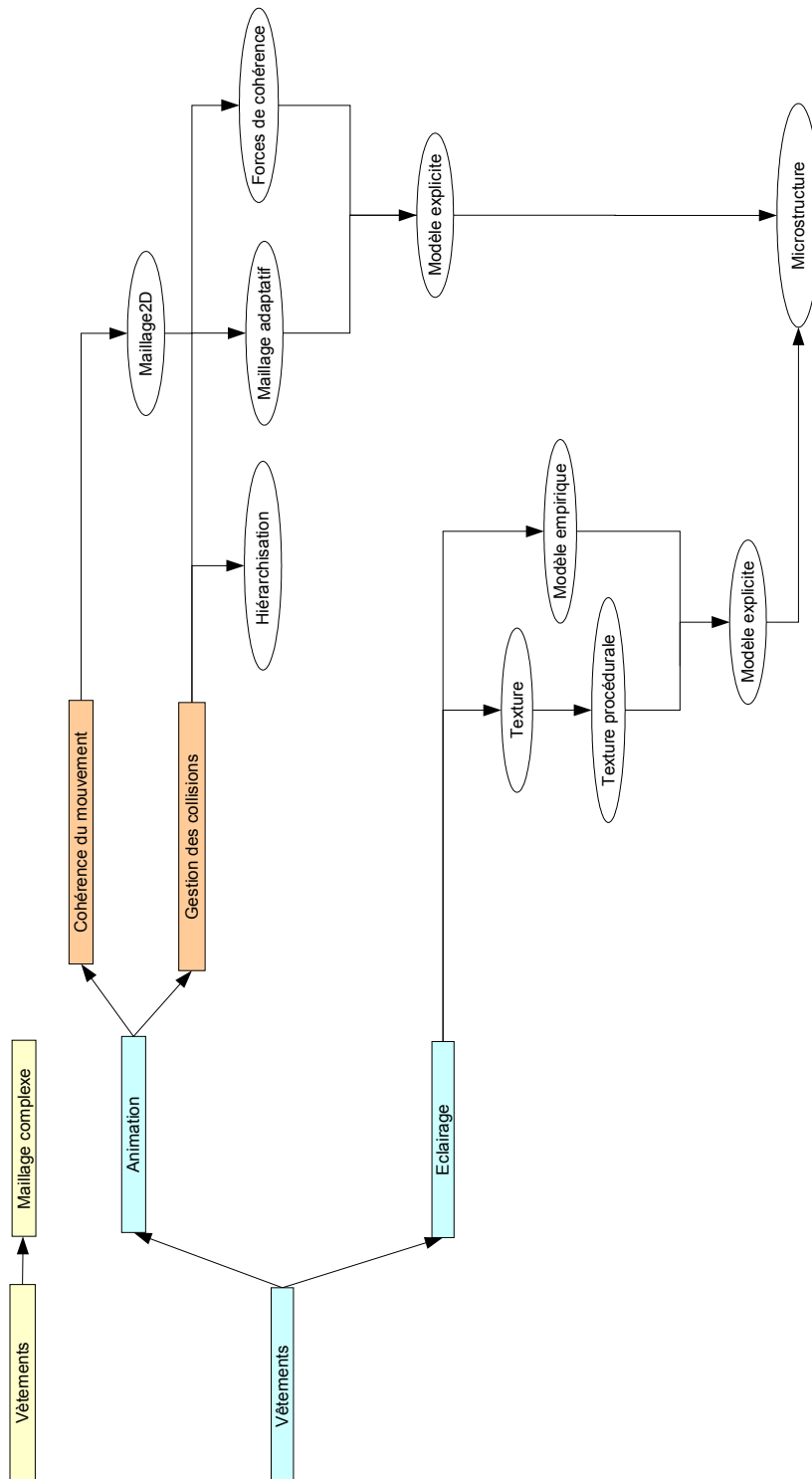


FIG. 3.1 – Vue générale de la simulation des vêtements

$$y = c + \cosh\left(\frac{x-b}{a}\right)$$

D'autres méthodes géométriques se sont concentrées sur les manches, modélisées sous forme de cylindres [HM90, ANN90]. Un pli se forme lorsque qu'une limite de courbure est atteinte. Les plis sont formés par des subdivisions des anneaux issus de la manche [ANN90].

Si les méthodes géométriques produisent de bons résultats pour une image statique, toutes ces méthodes nécessitent un énorme travail de post-production afin d'améliorer l'animation car ces modèles sont déconnectés des propriétés physiques du tissu. Les prochains modèles étendent donc le principe de la grille de contrôle en y ajoutant des données mécaniques du tissu [NG96].

### Modèle explicite

Est-il envisageable de produire un modèle fil à fil sans faire exploser la complexité géométrique ? Meißner et Eberhardt ont modélisés un tricot à l'aide d'un liage<sup>7</sup> [ME98]. Ce modèle a été adapté pour l'animation [Nou99]. Partant du principe que le comportement d'un tricot est entièrement défini par ses fils, après avoir calculé la trajectoire de chacun à travers le pull-over, il serait possible d'imprimer un mouvement global au tricot à travers le mouvement localisé des fils.

**Modélisation des mailles et des fils** La modélisation s'inspire du processus industriel de tissage du tricot. Les mailles, des splines cubiques de Catmull-Rom, sont enchevêtrées suivant une trajectoire définie par le tissage afin de modéliser le bombage des mailles et le tricotage *à l'endroit et à l'envers*. . Afin de simuler les déformations causées par le tricotage, les boucles sont déposées dans des maillages pour être déformées par déformation à forme libre. La trajectoire de la maille ainsi définie permet de modéliser le fil, considéré comme un assemblage de fibres. Ce dernier est créé en extrudant de manière hélicoïdale, la section du fil le long de la trajectoire précédemment calculée.

**Limites** Ce modèle impose de calculer les contraintes physiques liées aux contacts entre les fibres du tissu et des mailles. De tels calculs grèvent les performances : environ 1 heure est nécessaire pour calculer l'animation d'un tissu de 10 mailles sur 10, sur une station HP9735. Si un modèle a été animé avec succès, il est cependant difficile de l'étendre à une pièce entière, sachant qu'un tricot peut contenir plusieurs dizaines de milliers de mailles.

### 3.2.2 Maillages masse-ressort

Les modèles physiques à travers un maillage masse-ressort, modélisent le tissu au niveau de me-sostructure. Ils permettent de prendre en compte différentes natures de tissus. Etant plus économique en calcul et la densité du maillage étant paramétrable, ces modèles sont plus efficaces que le modèle précédent.

#### Maillage de base

**Topologies principales** Le maillage de particules liés par des systèmes masse-ressort étant relativement ancien [BHW94], il a connu de nombreuses extensions. Ainsi, remplacer un maillage rectangulaire par un maillage triangulaire permet de définir des pièces autres que rectangulaire [VCMT95]. Dans le même ordre d'idée, la structure en étoile, inspirée du modèle de Feynman [Fey86], permet de modéliser

<sup>7</sup>Plan d'assemblage des formes et des positions des mailles.

un tissu sans limitation de forme. Toutefois, c'est généralement la structure de Provot qui est utilisée, exposée dans les paragraphes suivants.

**Maillage masse ressort de Provot** Ce modèle tente de reproduire le comportement inélastique du vêtement, en tenant compte des particularités inhérentes aux tissus [Pro95, Pro97a].

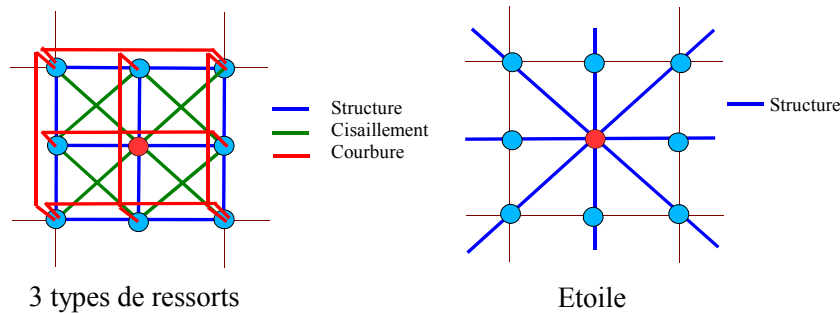


FIG. 3.2 – Agencement des ressorts pour un tissu

Ce modèle hybride cumule l'une approche élastique, sous la forme d'un système de masse-ressorts avec une approche rigide où le taux de déformation du système est paramétrable. Le tissu défini par Provot est ainsi composé de trois types de ressort : cisaillement (*shear*), courbure (*bend*) et structure dont les modules de Young sont reliés aux propriétés mécanique du tissu.

Les ressorts de structures, les seuls présents dans le modèle d'origine, sont insuffisants. L'ajout des ressorts de cisaillement permettent de maintenir la forme rectangulaire au tissu. Pour éviter que le tissu ne s'affaisse en une masse informe et simuler les plis du tissu, il est nécessaire d'introduire une certaine rigidité au tissu [Lan00]. Pour maintenir cette rigidité, l'angle de pliure pourrait être limité. Cependant, cela risque d'introduire une trop grande instabilité, c'est pourquoi les ressorts de courbure sont préférés.

### Maillage adaptatif

Il est clair que plus le nombre de points de contrôle sera important, plus l'animation sera fine. Pour trouver un compromis entre la qualité et la rapidité, il est utile d'étudier un maillage adaptatif.

**Maillage adaptatif statique** Un modèle hiérarchique permet d'accélérer le calcul du maillage [YZ01]. Le système est d'abord résolu à l'aide d'un maillage grossier. Chaque triangle du maillage est ensuite subdivisé jusqu'à obtenir un maillage satisfaisant. Cette méthode reste cependant limitée à un cadre statique.

Un des problèmes généraux de la subdivision est d'éviter que les surfaces subdivisées ne s'éloignent trop des polygones de contrôle au fur à mesure des passes de subdivisions. Dans le cadre de la simulation des tissus, le tissu risque de diverger de sa forme d'origine et de rentrer en collision avec lui-même ou l'objet sur lequel il est posé. Il est alors nécessaire de revenir en arrière ou d'arrêter la subdivision lorsqu'elle risque de produire des artefacts[TC92]. Autrement, les positions sont corrigées en les associant à des pseudo-vitesses qui seront ensuite traitées par une correction itérative [BFA02].

**Maillage adaptatif dynamique** L'idée est de générer un maillage grossier qui sera ensuite raffiné lorsqu'un angle critique de courbure sera atteint [HPH96]. Ainsi, les erreurs les plus importantes sont obtenues aux endroits où la surface fait des plis et nécessitant donc des subdivisions.



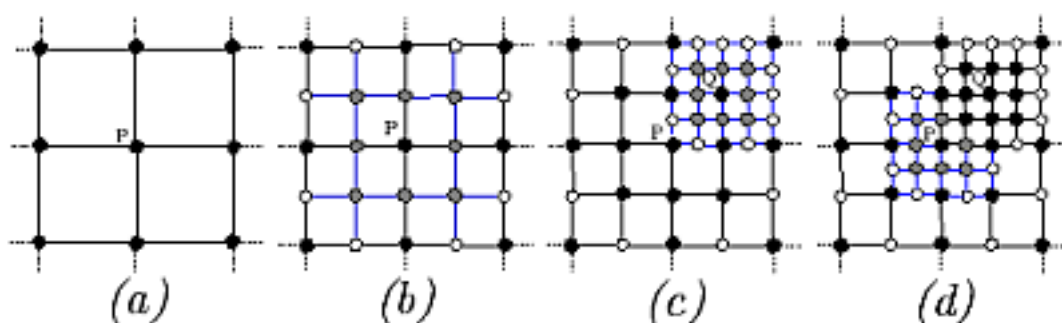


FIG. 3.3 – Subdivision de Villard et Borouchaki

L'implantation de ce modèle repose sur une structure hiérarchique. Chaque fois qu'une discontinuité est rencontrée, de nouvelles masses reliées par des ressorts sont générées dans le niveau supérieur. Malheureusement les changements de topologie font diverger le maillage rectangulaire d'origine, le résultat n'est pas très satisfaisant et les temps de calculs sont très grands.

**Maillage adaptatif dynamique temps réel** Deux problèmes se posent pour éviter les écueils de la méthode précédente : comment préserver la topologie locale et quel système masse-ressort est adapté à cette subdivision ? Ce maillage adaptatif dans un cadre dynamique et temps réel tente une réponse [VB02].

La surface est initialement formée par 4 carreaux rectangulaires. Le schéma de subdivision est déclenché suivant le modèle précédent d'Hutchison. La subdivision est développée afin de rester compatible avec le système mécanique. Deux types de noeuds sont proposés, les actifs et les virtuels. Les premiers (en gris/noir sur la figure 3.3) sont entourés par 4 noeuds actifs et participent à la simulation physique. Les seconds (en blancs) sont entourés par 3 noeuds, contribuent à conserver la topologie après subdivision et redistribuent les forces à leurs voisins. Le maillage ainsi créé par les sous-schémas de subdivisions ( (b), (c) et (d) ) est adaptatif mais non régulier.

Lors de la subdivision, si une force est appliquée, elle sera répartie équitablement sur les noeuds actifs du maillage puis supprimée au noeud virtuel. Il s'agit aussi de répartir les masses. Le maillage étant irrégulier, il faut se baser sur l'aire des triangles centrés autour du noeud.

Les ressorts de courbure de Provot sont remplacés par des cantilevers, introduits plus loin, car ces derniers sont plus adaptés à cette subdivision.

### 3.3 Amélioration du modèle masse-ressort

Cette sous-section propose quelques pistes afin d'améliorer le modèle masse-ressort. D'une part, un comportement réaliste peut être approché en soumettant ce modèle à des mesures expérimentales ou encore en simulant la limite de déchirement du tissu. D'autre part, des variantes apportées sur ce modèle, que ce soit au niveau des calculs, de l'emplacement des masses ou encore des forces en jeu, permettent d'obtenir un meilleur comportement.

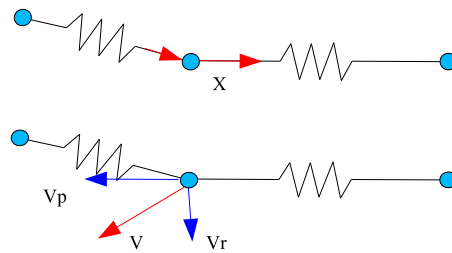


FIG. 3.4 – Correction de l'élongation en position et en vitesse

### 3.3.1 Rendre un comportement réaliste

#### Mesures des propriétés de tissu par le modèle de Kawabata

Kawabata propose une méthode de mesure des propriétés mécaniques d'un tissu [Kaw80]. Le *Kawabata Evaluation System* (KES) mesure la quantité de force nécessaires pour les trois types de déformations : cisaillement, courbure (*wrap*) et structure (*weft*). Ses mesures ont été reprises par de nombreux travaux pour paramétrer les maillages masse-ressort.

#### Modèle créé par émergence suite à un algorithme génétique

Le comportement d'un tissu particulier peut être découvert en appliquant des algorithmes génétiques [LPC95]. L'idée est de définir et d'optimiser une fonction de coût qui mesure, pour chaque ensemble de paramètres, la différence entre le comportement effectif de la surface et celui qu'elle aurait eu en utilisant cet ensemble de paramètres.

#### Limitation de l'élongation du tissu

L'effet d'une trop forte élongation, appelé *hyperélasticité* [Pro95] apparaît lorsque le tissu est fortement étiré : rien n'empêche au tissu de s'allonger d'une longueur infinie. Cela est dû d'une part au fait que chaque ressort est indépendant, d'autre part, à cause du modèle idéal de Hooke qui propose un ressort linéaire sans limitation de longueur. Dans la réalité, les fibres acceptent un étirement maximum de 105 à 110% avant de se déchirer.

L'heuristique consiste donc à limiter l'élongation des ressorts de structure à un maximum de 110% [Pro95]. Toutefois, les ressorts de plis ne sont pas limités car le tissu est plus prompt à se plier que s'étirer. Cette règle rend le système plus réaliste mais aussi plus instable. Trois méthodes sont alors proposées.

**Utiliser un ressort à raideur non linéaire** Essayer d'augmenter la raideur du ressort n'est pas une voie à suivre car en plus d'obtenir un comportement peu réaliste, cela rend le système instable. Toutefois, un ressort à raideur non linéaire permet de limiter l'hyperélasticité, comme un ressort biphasique qui devient plus rigide au delà des 110% [BFA02]. Par ailleurs, afin d'obtenir des comportements anisotropiques, le module de Young peut suivre une hystérésis [EWS96].

**Méthode de Provot : post-correction de la position** L'élasticité est corrigée après coup de manière locale et itérative [Pro95]. L'extension de chaque ressort est corrigée si elle dépasse un certain seuil. Il s'agit alors de redéployer les points de contrôle le long de l'axe d'élongation, si la distance qui les sépare est trop grande.

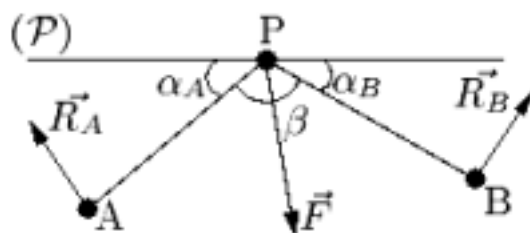


FIG. 3.5 – Modèle de force de courbure appliqué au tissu

La propagation de la correction est nécessaire afin d'assurer que le voisinage respecte aussi l'heuristique. En effet, *tirer* les points de contrôle risque d'introduire de nouvelles sur-élongations dans le voisinage. Comme aucune preuve de convergence ne peut être apportée, il est nécessaire d'itérer ce processus. Si on prend compte les points d'ancrage et les particules limitées dans leur trajectoire à cause des collisions, l'algorithme risque fortement de diverger. La résolution d'un tel système s'effectue à l'aide des méthodes de Jacobi ou Gauss-Seidel, avec une préférence pour le premier étant parallélisable [BFA02]. Le comportement est donc plus réaliste mais cette méthode reste assez lente.

### 3.3.2 Variantes sur le modèle masse-ressort

#### Travail sur la vitesse plutôt que la position

Plutôt que de tenter de modifier directement la position, il est utile de se focaliser sur la vitesse [Pro97a, BFA02] car les calculs seront plus stables numériquement. Pour le traitement de l'hyperélasticité, la vitesse est séparée en deux composantes, la vitesse  $V_p$ , le long de l'axe d'élongation et la composante vitesse restante  $V_r$ . Si le ressort est trop ou pas assez long, la vitesse  $V_p$  est annulée ce qui freinera la particule, à défaut de corriger sa position.

#### Redistribution équitable des masses

Il s'agit de répartir équitablement les forces et les masses sur le maillage masse-ressort lors du calcul des réactions lors d'une collision que l'on verra par la suite. Si en première approximation, ces valeurs sont associées aux sommets de contrôles, il peut être intéressant de les répartir sur les arêtes et les faces pour ensuite les redistribuer sur les sommets du maillage. Ainsi la norme de la réaction est calculée en fonction des aires des surfaces mises en contact [BW98]. Au lieu de considérer les vitesses et accélérations aux sommets du maillage masse-ressort, ces valeurs sont interpolées en considérant les barycentres des arêtes et triangles du maillage [BFA02].

**Remplacer les ressorts par des cantilevers** Tout comme pour les cheveux, il a été envisagé de remplacer les ressorts par des cantilevers. Le modèle proposé par Provot ne conserve pas les moments et est fortement lié à la résolution du maillage. L'apport de ce modèle est de conserver les moments, sans toutefois avoir à les calculer explicitement. Si Provot relie les noeuds A,P et B par des ressorts, Villard et Borouchaki proposent alors un modèle alternatif de force de courbure basé sur un modèle de cantilever (figure 3.5).

La norme de la force de courbure est donnée par  $\mathbf{F} = \frac{K_E \alpha}{l^2}$  où  $K_E$  est une constante de courbure,  $\alpha$  est la déviation verticale et  $l$ , la longueur de l'arête. Si on applique ce modèle sur les noeuds A, P et B,

on obtient la force  $\mathbf{F} = -(\mathbf{R}_A + \mathbf{R}_B)$  où  $\mathbf{R}_A$  est la réaction du noeud A. On a alors

$$\mathbf{R}_A = K_E \frac{\alpha_A + \alpha_B}{l_A \cdot (l_A + l_B)} (\mathbf{u}_A \wedge \mathbf{n})$$

avec  $\mathbf{u}_A = \frac{\mathbf{PA}}{\|\mathbf{PA}\|}$ , vecteur porté par  $\mathbf{PA}$  normalisé et  $\mathbf{n} = \mathbf{u}_A \wedge \mathbf{u}_B$  la normale formée par les vecteurs  $\mathbf{PA}, \mathbf{PB}$ .

### 3.3.3 Détection des collisions et autocollisions

La section précédente a exposé le modèle physique du tissu. Ce dernier, couplé à un moteur physique constitue la base de l'animation du tissu. Ce problème est loin d'être trivial, compte tenu du nombre de collisions à résoudre. C'est pourquoi des méthodes d'accélération de détection de collisions et de simplifications ont été proposées pour le calcul des forces. On distinguera les collisions contre le personnage/objets de la scène et les collisions au sein du tissu, autocollisions. Dans cette section ne seront exposés que les problèmes spécifiques au rendu des vêtements. Cette partie propose d'exposer les méthodes des détections de collision puis de calcul de la réaction à une collision.

#### Détection des collisions

Lorsque les vêtements sont animés en prenant en compte les forces élastiques internes et les forces externes (gravité, vent), la réponse aux collisions et aux auto-collisions est bienvenue [CYMTT92]. Une méthode basée sur un champ de potentiel ne donne pas des simulations réalistes lorsqu'il s'agit d'objets ou de vêtements possédant une géométrie complexe [TPBF87, LMTT91].

Il faut s'en tenir à une détection basée sur la position des objets en jeu. Cela peut être très coûteux et pour accélérer les collisions, il est alors nécessaire de subdiviser l'espace<sup>8</sup>. Les membres du corps du personnage approchés par des cylindres fermés et des sphères permettant de simplifier la détection de collisions. Ces principes peuvent être étendu au tissu en subdivisant ce dernier, en utilisant par exemple une hiérarchie de boîtes englobantes [BFA02].

Par ailleurs, compte tenu de la discrétisation du temps, des erreurs de détections de collisions peuvent apparaître. Afin de corriger ce défaut, la correction est propagée localement sur tout le tissu [BFA02, VCMT95, Pro97b].

#### Détection des autocollisions

Ce test de collision permet d'éviter au tissu de se traverser lui-même lors de déformation trop importante. Les auto-collisions étant mal modélisées, le vêtement semble alors glisser sur lui-même. La méthode naïve est d'assigner une sphère englobante autour de chaque sommet. Ces tests sont souvent évités à cause du nombre de calculs à effectuer ( $O(n^2)$ ) [BW98].

**Modèles de détections analytiques et probabilistes** L'autocollision est traitée de manière analytique [MW88], à l'aide d'une équation polynomiale de degré 5, qui peut être simplifiée à un degré 3 [Pro97b].

La complexité de cette résolution conduit à post-traiter les auto-collisions à l'aide de modèles probabilistes : la probabilité d'interpénétration est faible pour les zones peu courbées [VMT97, Pro97a]. La courbure d'une zone sera déterminée par l'ensemble des normales de chaque facette de la zone. Le système est alors résolu en utilisant des méthodes de dynamique inverse.

---

<sup>8</sup>Subdivision par octree et boîtes englobantes.

**Modèles de détections utilisant la subdivisions de l'espace** Un algorithme rapide basé sur la hiérarchisation de boîtes englobantes ou des octrees permet détecter plus rapidement les auto-collisions. La proximité des triangles, ainsi qu'un critère de courbure de la surface permet d'éliminer un grand nombre de régions [VCMT95]. L'évaluation ainsi produite travaille sur un nombre potentiel de collisions proportionnel au nombre d'éléments qui participent aux collisions, et non pas au nombre total d'éléments qui composent la surface du tissu.

### Calcul de réaction à une collision

Lorsque la collision est détectée, la force de réaction est appliquée selon la normale à la collision, selon des modèles de collisions et de frottements. Généralement, sa norme doit être bornée afin d'éviter de trop fortes instabilités.

Toutefois, un modèle de forces de répulsion permet de se dispenser de ces calculs coûteux des réactions [BFA02]. Une telle force ne sera appliquée que lorsque les éléments censés rentrer en collision seront assez proches. Deux catégories de forces de répulsion seront appliquées : une répulsion inélastique et élastique. Cette heuristique applique une répulsion inélastique lorsque le tissu se rapproche d'une surface et élastique lorsqu'il s'en éloigne. Cela permet d'éviter des effets désagréables comme un rebond inopiné lors d'une collision et un glissement des pièces de tissus.

### 3.3.4 Résolution du système

Une fois calculée la réaction, il faut résoudre le système formé par le vêtement et les solides auxquels il est confronté. Si le formalisme d'Euler est très répandu à cause de sa simplicité, d'autres méthodes empruntées à la mécanique ont été appliquées à la simulation de vêtements.

#### Formalisme d'Euler

Cette force, combinée aux autres forces en jeu, internes comme externes sera ensuite intégrée à travers le théorème de Netwon, c'est le formalisme d'Euler. La problématique de cette dernière phase se situe au niveau de l'utilisation pertinente des différents intégrateurs disponibles, de l'intégration par trapèze à l'algorithme de Runge-Kutta ou encore l'intégration de Verlet.

#### Formalisme de Lagrange

Le formalisme de Lagrange consiste à exprimer le système sous forme d'énergies, généralement, l'énergie mécanique étant la somme des énergies cinétiques et potentielles associées à chaque noeud du maillage masse-ressort  $E_m = E_c + E_p$ . L'énergie cinétique s'écrit  $E_c = \frac{k}{2} \mathbf{C}^T(x) \mathbf{C}(x)$  avec la condition vectorielle finale  $\mathbf{C}(x) = \mathbf{0}$ . Le théorème de l'énergie cinétique relie alors l'énergie aux travaux des forces et des moments.  $\int_x E_c = W_F + W_C$ . On écrit alors

$$\mathbf{F} = -\frac{\partial E_c}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{\partial \mathbf{C}(x)}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{C}(x)$$

Il est aisé de porter ces énergies dans le modèle de Provot examiné précédemment : les trois types de ressorts sont alors remplacés par trois énergies, la structure, la courbe et le cisaillement. Les forces sont dérivées de cette expression.

### Résolution par éléments finis

Eischen a été un des premiers à vouloir essayer de représenter une pièce de tissu de manière continue, à l'aide d'un modèle basé sur les éléments finis. Dans un cadre discret, les panneaux polygonaux discrétisés utilisent la méthode des différences finies. Ces modèles sont certes très précis mais mal adaptés à un rendu dynamique car le nombre de calculs devient vite prohibitif. Enfin, si la méthode par éléments finis permet d'effectuer une résolution globale du modèle, en considérant le tissu comme continu, il devient difficile de simuler les discontinuités du tissu.

### Résolution par relaxation

Plutôt que d'essayer d'intégrer les lois de la dynamique, ce problème est transposable en un problème de relaxation, en minimisant l'énergie du système [BHW94, Fey86]. Par analogie, on pourrait assimiler cette technique à un calcul de radiosité, par conséquence, cette méthode est plus adaptée au rendu d'images fixes.

**Modèle de Feynman** Feynman propose une grille bidimensionnelle où chaque point de contrôle possède son énergie, décomposée en somme d'énergie élastique  $E_s$ , de courbure  $E_b$ , proportionnelle aux angles de courbure pris par le tissu et gravitationnelle  $E_g$  [Fey86].

$$E(p_{i,j}) = E_s + E_b + E_g$$

Les calculs se font sur les huit plus proches voisins de la particule conformément au modèle en étoile de Feynman exposé dans la section précédente. La solution consiste à résoudre le système pour une énergie minimale, équivalent à un gradient nul. Une méthode de descente de gradient, accélérée par une subdivision spatiale permet de résoudre le système afin d'atteindre un minimum d'énergie.

**Modèle de Breen** Les trois types de ressorts énoncées dans le modèle de Provot complètent le modèle de Feynman [ADBW96]. Le comportement du tissu est amélioré en injectant les mesures de Kawabata pour les énergies de pli et de structure. Ainsi des forces d'attraction, de répulsion sont introduites dans ce modèle.

Les particules sont disposées en treillis. Pour chacune, on définira l'énergie totale comme la somme des énergies vues précédemment en y ajoutant l'énergie d'attraction,  $E_a$ , causée par la tension du treillis et l'énergie de répulsion,  $E_r$  qui permet de séparer les particules à une distance minimale.

$$E(p_{i,j}) = E_s + E_b + E_g + E_a + E_r$$

Les énergies d'attraction et répulsion sont assimilées à des potentiels proportionnels au carré de la distance séparant les particules.

## 3.4 Rendu de tissu

La principale difficulté du modèle d'éclairage est l'interaction non seulement des fibres avec la lumière (microstructure), mais aussi du tissage des fibres (mesostructure). Le modèle d'éclairage dépend donc de la nature du tissu mis en jeu.

Les tissus seront distingués en tissus fins comme la soie ou le satin, en tissus imprimés et enfin en tissus côtelés<sup>9</sup>. Ils seront associés à un modèle particulier qui tentera de reproduire des propriétés telles que les ombrages propres, la spécularité, les occlusions ou encore la diffusion subsurfacique.

---

<sup>9</sup>Effet à côtes dans un tissu qui peut être en longueur, en largeur ou en diagonale. *Corduroy* en anglais

### 3.4.1 Tissu uni

Minnaert a voulu caractériser la réflectance de la Lune avec cette formule. En plus de Sélène, ce modèle est adapté aux tissus comme la soie, le velours ou le satin [Min41].

$$\rho = \frac{1}{\pi} k_d (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{k-1}$$

où  $\theta_i$  et  $\theta_r$  sont respectivement les angles incidents et réfléchis et  $k$ , l'assombrissement de la pénombre formée par la Terre sur la Lune. L'exposant  $k$  est supérieur à 0, si  $k=1$ , la surface est lambertienne et des pics de spécularité apparaissent à  $k>1$ .

Un tel éclairage peut se réécrire  $I_t = (\mathbf{n.l}).f(\mathbf{n.l}, \mathbf{n.e})^{k-1}.I_0$  où  $f$  représente une fonction qui associe la texture associée à chaque pixel, des produits scalaires  $\mathbf{n.l}$  et  $\mathbf{n.e}$ .

Si on s'intéresse à des phénomènes liés à la mesostructure, le modèle de Ashikhmin, basé sur une microstructure en micro-facettes, est applicable à du velours ou du satin [APS00].

### 3.4.2 Tissu imprimé

Concernant les textures imprimés, la solution la plus triviale est d'appliquer une texture créée d'après une capture d'un échantillon de tissu. Cependant, toutes les propriétés d'éclairage du tissu sont fortement simplifiées.

Cette idée peut être étendue à travers différents niveaux de textures (LOD). La génération des textures met l'accent sur les spécificités d'un tissu imprimé, à savoir une trame définie des deux côtés et le contraste pour des fibres de différentes couleurs [AMTF03]. La propagation de la lumière ne doit pas être oubliée, à travers la BRDF de la mesostructure. Celle de Yasuda dont les paramètres sont issus de mesures photométriques, simule l'éclairage anisotrope du textile tissé [YYTI92].

### 3.4.3 Tissu côtelé

C'est la classe de tissu la plus difficile à modéliser à cause des interactions causées non seulement par les fibres mais surtout par leur tissage particulier. La création d'un modèle fidèle de la mesostructure prend ici toute son importance.

#### Modèle explicite uniforme

Des rendus très réalistes de laine ont été ainsi produits et certains modèles sont utilisables en temps réel [DLHS01, DS02]. Pour d'autres tissus tels que le coton ou le velours côtelé, un modèle explicite uniforme (BRDF) pour chaque point du tissu n'est pas réaliste.

#### Texture de modèle explicite

**Approches simplifiées** La simulation de la mesostructure en modifiant plus ou moins directement la géométrie du tissu à l'aide de cartes d'embossesments, *bump mapping* [HGE01]. L'inconvénient de ces techniques reste une approximation relativement grossière.

Les hypertextures de Perlin et de Neyret sont applicables au rendu de tricots [GTS95]. Cependant, lors de l'animation, comme cette texture est supportée par un modèle déformable, des problèmes de recouvrement de texture apparaissent, les déformations du maillage ne correspondant pas aux déformations des mailles du tricot. Si ce problème est général au contexte de l'application de texture, il est amplifié par la nature même des textures volumiques.



FIG. 3.6 – Tricot rendu en temps interactif par BTF

**Notion de texture de modèle explicite** Si la BRDF d'un brin de laine est modélisable, encore faut-il prendre en compte toutes les variations de ce matériau causé par le tissage. La solution est apportée par les fonctions bidirectionnelles de texture (*bidirectional texture function, BTF*) proposée en 1997 [DvGNK99]. Ici, elle fait correspondre une valeur de réflectance en fonction de l'angle d'arrivée (lumière) et de sortie (oeil), et cela pour chaque point de l'échantillon.

C'est donc une fonction à six dimensions, qui peut être considérée comme une texture, un tableau bidirectionnel, de BRDF. La principale difficulté de cette méthode est donc la lourdeur des textures ainsi créées (plus de 1Go). Une compression de données par ondelettes permet d'appliquer les BTF sur du matériel conventionnel en temps interactif [SSK03].

### 3.5 Tableaux récapitulatifs

	Réalisme	Performance	Généralisation
Géométrique	+	+++	-
Maillage 2D	++	+	+
Maillage 2D adaptatif	++	++	-
Modèle explicite	+++	-	+

TAB. 3.1 – Animation de tissu : comparatif des méthodes

Pour l'animation, le modèle géométrique est déconnecté de tout modèle physique. Le maillage 2D peut prendre plusieurs formes mais reste tributaire du modèle des forces de cohésion. Le modèle adaptatif tente de soulager la résolution du système mécanique mais reste difficile à paramétrer. Enfin, le modèle explicite, qui permettrait en théorie de simuler tout type de tissu, demande trop de ressources calculatoires.



		Réalisme	Performance	Généralisation
Modèle macroscopique	Texture	+	+++	-
	Texture de tissage	++	+	-
	Texture d'embossement	-	++	-
	Texture volumique	-	++	-
Modèle mesoscopique	BRDF	+	+	-
	BTF	++	-	+

TAB. 3.2 – Rendu de tissu : comparatif des méthodes

Le modèle mesoscopique de BRDF reste valide pour les tissus unis. Par contre pour les tissus tissés, le modèle passe partout reste la texture. Sa variante évoluée, tentant de reproduire le tissage reste difficile à construire. Le cas des tissus côtelés reste problématique. Des approches comme la texture d'embossement ou la texture volumique restent limitées. Dans ce cas, la BRDF doit être différenciée sur un échantillon de surface, en utilisant des BTF. Cette dernière constituant une description explicite du matériau à 6 dimensions reste difficile à appliquer dans un contexte temps réel.

### 3.6 Conclusion

La complexité de l'animation d'un vêtement provient de son maillage complexe, induit par le tissage des fils. Ces derniers, constitués de fibres, sont à l'origine des nombreuses interactions qui rentrent en jeu pour l'animation et le rendu. La simulation des vêtements qu'elle soit au niveau de l'animation ou du rendu semble être bien étudiée, les modèles proposés, qui se cantonnent à la mesostructure du vêtement ont été éprouvés. Toutefois, le grand défi reste de les faire fonctionner en temps réel.

Les heuristiques, tirées de données mécaniques du tissu permettent d'imprimer un mouvement cohérent au maillage bidimensionnel. Ce maillage est adaptatif afin de localiser la complexité. Enfin, toute animation doit être accompagnée d'un traitement efficace des collisions et un calcul des réactions, problème, en partie, résolu.

Concernant le rendu, pour des tissus unis, les modèles empiriques peuvent suffire. Pour des tissus côtelés, il est nécessaire de construire des textures procédurales pour simuler les effets du tissage des fibres. Comme pour la peau, la BTF permet d'allier texture et BRDF afin de rendre fidèlement ces tissus. Cette fonction est pour l'instant appliquée sur des modèles rigides. Il s'agit alors de proposer des interpolations en fonction des déformations du tissu.



# Conclusion et perspectives

## Conclusion

Le rendu et l'animation d'un humain virtuel est loin d'être triviale. Au vu de l'ampleur des travaux, il est difficile d'embrasser un sujet aussi vaste. Ce document a tenté de présenter les différents modèles de peau, cheveux et vêtements. Certains de ces thèmes ont été travaillés depuis près d'une vingtaine d'années par un nombre restreint de spécialistes. Toutefois, l'animation et le rendu de la peau, des cheveux ou des vêtements n'a été que partiellement résolue.

A l'exception des cheveux, le maillage masse-ressort reste le dénominateur commun de l'animation. Toute la difficulté est alors de proposer des modèles de forces de cohérence afin d'imprimer un mouvement réaliste et cohérent. Les recherches actuelles tentent toujours d'améliorer ces modèles discontinus. D'autres prennent des voies différentes proposant des modèles continus, même si ces derniers sont plus probants pour les cheveux que pour les vêtements.

Quant au rendu, si le modèle de Kajiya et Kay reste la référence pour les cheveux, la tendance est aux fonctions de textures bidirectionnelles pour la peau et les vêtements. Les méthodes d'illumination locale sont remplacées progressivement par des méthodes d'illumination globale à l'aide de la programmabilité des cartes graphiques. Par ailleurs, les descriptions explicites des matériaux permettent en effet de conjuguer les notions de texture et d'éclairage réaliste. Les recherches s'orientent donc logiquement vers la microstructure avec toute la complexité que cela implique.

## Perspectives

La puissance de la carte graphique permet désormais d'implanter des techniques d'illumination globale et d'accélérer la résolution des systèmes d'animation physique. Certaines descriptions explicites de matériaux sont rendus en temps interactif.

En plus du cadre des jeux vidéo et de l'industrie cinématographique, la chirurgie, la biomécanique, le commerce électronique ou la cosmétologie font émerger de nouveaux besoins de réalisme. En vue de produire des prototypes, d'améliorer les processus de fabrication, la précision, favorisée par rapport à l'efficacité, rendent souvent les modèles actuels difficiles à appliquer dans l'animation en temps réel. Tous ces modèles tant pour l'animation que pour le rendu, doivent donc être redéfinis à une échelle plus fine, au niveau de la microstructure. afin d'envisager des applications en temps interactif voire temps réel.

La synthèse d'image peut s'enrichir et enrichir ces domaines à travers l'établissement de modèles de microstructures qui en plus d'être précis, gagnent à être définis de manière efficace. Ces modèles doivent être toutefois construits à différentes échelles, de l'atome à la cellule. Les divergences autant pour l'animation que pour le rendu montrent que le fossé entre ces microstructures et leurs représentations à travers leur mesostructures n'a pas été encore totalement comblé.



# Bibliographie

- [ADBW96] Masaki Aono, Paolo Denti, David E. Breen, and Michael J. Wozny. Fitting a woven cloth model to a curved surface : Dart insertion. *IEEE Computer Graphics and Applications* 16 (5), pages 60–70, Sept 1996.
- [AK93] Ken-Ichi Anjyo and Tsuneya Kurihara. Hair animation with collision detection. *Models and Techniques in Computer Animation Springer-Verlag, ch. , Proc. Computer Animation '93, Springer, Tokyo*, pages 128–138, 1993.
- [AMTF03] Neeharika Adabala, Nadia Magnenat-Thalmann, and Guangzheng Fei. Visualization of woven cloth. *Symposium on Rendering, Eurographics 2003*, pages 178–185, June 2003. MIRALab-CUI, University of Geneva, Geneva, Switzerland - Animation School, Beijing Broadcasting Institute, P.R. China.
- [ANN90] T. Agui, Y. Nagao, and M. Nakajima. An expression method of cylindrical cloth objects. *Trans. Soc. of Electronics, Information and Communications, Vol. J73-D-II, No. 7*, pages 1095–1097, 1990.
- [APS00] M. Ashikhmin, S. Premoze, and P. Shirley. A microfacet based brdf generator. *In Proceedings of SIGGRAPH 2000, ACM Press / ACM SIGGRAPH, New York, ACM, 2, 4*, pages 65–74, 2000.
- [BCN03] Yosuke Bando, Bing-Yu Chen, and Tomoyuki Nishita. Animating hair with loosely connected particles. *Volume 22 (2003), Number 3, Eurographics 2003*, 2003.
- [BFA02] Robert Bridson, Ronald Fedkiw, and John Anderson. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, San Antonio, Texas, session : Soft things*, pages 594 – 603, 2002.
- [BHBK92] G. Baciú, F. J. Henigman, R. H. Bartels, and H. K. Kesavan. A formal approach to modeling and animation of physically-based systems. *in The Third Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, 5-6 September 1992.
- [BHW94] D.E. Breen, D.H. House, and M.L. Wozny. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. *Siggraph '94, Orlando, USA*, pages 365–372, July 1994.
- [BKCN03] Florence Bertails, Tae-Yong Kim, Marie-Paule Cani, and Ulrich Neumann. Adaptive wisp tree - a multiresolution control structure for simulating dynamic clustering in hair motion. *Symposium on Computer Animation'03*, July 2003.
- [BKN02] Y. Bando, T. Kuratate, and T. Nishita. A simple method for modeling wrinkles on human skin. *10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'02)*, page 166, October 2002.
- [BKTK00] Laurence Boissieux, Gergo Kiss, Nadia Magnenat Thalmann, and Prem Kalrat. Simulation of skin aging and wrinkles with cosmetics insight. *Computer Animation and Simulation*

- '00 - *Proceedings of the Eurographics Workshop in Interlaken, Switzerland*, pages 15–27, August 21–22 2000.
- [Bli78] J.F. Blinn. Simulation of wrinkled surfaces. *Proceedings of Siggraph 78 in Computer Graphics, Vol. 12, No.3,*, pages 286–292, 1978.
- [Bli82] J. Blinn. Light reflection functions for simulations of clouds and dusty surfaces. *ACM SIGGRAPH New York, NY*, pages 21–29, 1982.
- [BM93] B. Becker and N.L. Max. Smooth transitions between bump rendering algorithms. *Proceedings of Siggraph 93 in Computer Graphics*, pages 183–190, 1993.
- [BNM82] N.-I. Badler, Norman, and M.-A. Morris. Modelling flexible articulated objects. *Computer Graphics, Proceedings of the Online Conference*, pages 305–314, 1982.
- [Bru99] Armin Bruderlin. A method to generate wet and broken-up animal fur. *Journal of Visualization and Computer Animation 11(5) : 2000, Pacific Graphics '99*, pages 249–259, October 1999.
- [BSS93] P. Blasi, B. Le Saec, and C. Schlick. A rendering algorithm for discrete volume density object. *Computer Graphics Forum, 12(3) :*, pages 201–210, 1993.
- [BW98] D. Baraff and A. Witkin. Large steps in cloth simulation. *In Proc. of SIGGRAPH 1998, ACM Press / ACM SIGGRAPH, Comput. Graphics Proc.*, 32 :1–12, 1998.
- [CCC87] R.L. Cook, L. Carpenter, and E. Catmull. The reyes image rendering architecture. *Proceedings of Siggraph 87 in Computer Graphics, Vol. 21, No.4*, pages 95–102, 1987.
- [CHP<sup>+</sup>79] C. Csuri, R. Hackathorn, R. Parent, W. Carlson, and M. Howard. Towards an interactive high visual complexity animation system. *Computer Graphics, 13(2) :*, pages 289–299, August 1979.
- [CHP89] J.E. Chadwick, D.R. Haumann, and R.E. Parent. Layered construction for deformable animated characters. *Proc. SIGGRAPH '89, Computer Graphics, Vol. 23, No3*, pages 234–243, 1989.
- [CJY02] Johnny T. Chang, Jin Jingyi, and Yu Yizhou. A practical model for hair mutual interactions. *ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pages 73–80, July 2002.
- [Cro82] F. Crow. A more flexible image generation environment. *ACM SIGGRAPH 1982*, pages 9–18, 1982.
- [CYMTT92] Michel Carignan, Ying Yang, Nadia Magnenat-Thalmann, and Daniel Thalmann. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques also in ACM SIGGRAPH Computer Graphics Volume 26 , Issue 2 (July 1992)*, pages 99–104, July 1992.
- [CZ92] David Tzu-Wei Chen and David Zeltzer. Pump it up : Computer animation of a biomechanically based model of muscle using the finite element method. *Computer Graphics (SIGGRAPH92 Proceedings), volume 26,*, pages 89–98, July 1992.
- [Des97] M. Desbrun. *Modélisation et animation de matériaux hautement déformables en synthèse d'images*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire iMAGIS/GRAVIR-IMAG, December 1997.
- [DG96] M. Desbrun and M.-P. Gascuel. Smoothed particles : a new paradigm for animating highly deformable bodies. *Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation 96*, pages 61–76, 1996.

- 
- [DiP89] S. DiPaolo. Implementation and use of a 3d parameterized facial modeling and animation system. *Siggraph '89 Tutorials, Volume 22. ACM, New York, NY*, 1989.
- [DKY<sup>+</sup>00] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pages 19–28, 2000.
- [DLHS01] K. Daubert, H.P.A. Lensch, Wolfgang Heidrich, and H.-P. Seidel. Efficient cloth modeling and rendering. *Rendering Techniques '01 - Proceedings of the 12th*, 2001.
- [DS02] K. Daubert and H.-P. Seidel. Hardware-based volumetric knit-wear. *Computer Graphics Forum 21(3) - Proceedings of EUROGRAPHICS, 63(2) :*, pages 314–325, 2002.
- [DvGNK99] K.J. Dana, B. van Ginneken, S.K. Nayar, and J.J. Koenderink. Reflectance and texture of real world surfaces. *ACM Transactions on Graphics, Volume 18, No. 1*, pages 1–34, January 1999.
- [EDD<sup>+</sup>95] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery, and W. Stuetzle. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 95*, 1995.
- [EH79] W. G. Egan and T. W. Hilgeman. Optical properties of inhomogeneous materials. *Academic Press, New York*, 1979.
- [Eli00] Hugo Elias. Tgltlsbfssp : Models, 2000.
- [EVNT78] G. Eason, A. Veitch, R. Nisbet, and F. Turnbull. The theory of the backscattering of light by blood. *J. Physics (11)*, pages 1463–1479, 1978.
- [EWS96] B. Eberhardt, A. Weber, and W. Strasser. A fast, flexible particlue system model for cloth draping. *IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 16., no. 5*, pages 52–59, September 1996.
- [Fey86] C. Feynman. Modelling the appearance of cloth. Master’s thesis, Dept. of EECS, Massachusetts Inst. Of Technology, Cambridge, Mass., 1986.
- [Fis83] Kenneth Paul Fishkin. Applying color science to computer graphics. Master’s thesis, University of California, Berkeley, December 1983.
- [FPB92] T. J. Farrell, M. S. Patterson, and B. Wilson. A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo. *Med. Phys. (19)*, pages 879–888, 1992.
- [Gas89] M.-P. Gascuel. Osea : un nouveau modèle de matière pour traiter les collisions entre objets déformables. *PIXIM 89, Paris*, pages 309–324, October 1989.
- [Gas93] M.-P. Gascuel. An implicit formulation for precise contact modeling between flexible solids. *Proceedings of Siggraph 93, Computer Graphics*, pages 313–320, August 1993.
- [Gre00] Simon Green. Vertex program hair demo, 2000.
- [GTS95] E. Gröller, R.T. Tau, and W. Strasser. Modeling and visualization of knitwear. *IEEE Transactions on Computer Graphics and Visualization, Vol. 1, No.4*, 1995.
- [HBVMT] Sunil Hadap, Endre Bangerter, Pascal Volino, and Nadia Magnenat-Thalmann. Animating wrinkles on clothes. *IEEE Visualization*.
- [HGE01] A. Haro, B. Guenter, and I. Essa. Real-time, photo-realistic, physically based rendering of fine scale human skin structure. *Proceedings 12th Eurographics Workshop on Rendering, London, England, June 2001*.
- [Hin94] Victor Ng Thow Hing. *A Biomechanical Musculotendon Model For Animating Articulated Objects*. PhD thesis, University of Toronto, 1994.

- [HK93] Pat Hanrahan and Wolfgang Krueger. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH93)*, pages 165–174, August 1993. Department of Computer Science, Princeton University, Department of Scientific Visualization, German National Research Center for Computer Science.
- [HM90] K. Hinds and J. McCartney. Interactive garment design. *The Visual Computer, No. 6*, pages 53–61, 1990.
- [HPH96] Dave Hutchinson, Martin Preston, and Terry Hewitt. Adaptive refinement for mass/spring simulations. *Computer Animation and Simulation 96. Proceedings of the Eurographics Workshop in Poitiers*, pages 31–45, August 1996.
- [HV] X. Hao and A. Varshney. Real-time rendering of translucent meshes. *ACM Transactions on Graphics 23(2)*.
- [iAUK92] Ken ichi Anjyo, Yoshiaki Usami, and Tsuneya Kurihara. A simple method for extracting the natural beauty of hair. *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), vol 26 ed. Edwin E. Catmull*, pages 111–120, July 1992.
- [IYT93] T. Ishii, T. Yasuda, and J. Toriwaki. A generation model for human skin texture. *Proceedings of CG International., Springer-Verlag*, pages 139–150, 1993.
- [Jai99] Fabrice Jaillet. *Contribution à la reconstruction et l'animation d'objets déformables définis à partir de données structurées en sections*. PhD thesis, LIGIS (Laboratoire d'Informatique Graphique Image et Modélisation) - UFR d'Informatique - Université Claude Bernard Lyon 1, 1999.
- [JB02] Henrik Wann Jensen and Juan Buhler. Rapid hierarchical rendering technique for translucent materials. *Siggraph 2002*, 2002. Stanford University, PDI/DreamWorks.
- [JIM93] Stéphane JIMENEZ. *Modélisation et simulation physique d'objets volumiques déformables complexes*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993.
- [JMLH01] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan. A practical model for subsurface light transport. In *Proceedings of Siggraph 2001*, pages 511–518, 2001.
- [Kaw80] S. Kawabata. The standardization and analysis of hand evaluation. *The Textile Machinery Society of Japan*, 1980.
- [KF31] P. Kubelka and F.Munk. Ein beitrage zur optik der farbanstriche. *Zurich Tech Physik, 12 :543*, 1931.
- [KGC<sup>+</sup>96] Rolf M. Koch, Markus H. Gross, Friedrich R. Carls, Daniel F. von Büren, George Fankhauser, and Yoav I. H. Parish. Simulation facial surgery using finite element models. *Proc. SIGGRAPH, Computer Graphics*, pages 421–428, 1996.
- [KH01] C.-K. Koh and Z. Huang. A simple physics model animate human hair modeled in 2d strips in real time. *Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation 2001*, pages 127–138, 2001.
- [KK89] James T. Kajiya and Timothy L. Kay. Rendering fur with three dimensional textures. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 271 – 280, July 1989.
- [KN00] T.-Y. Kim and U. Neumann. A thin shell volume for modeling human hair. *Proceedings of Computer Animation 2000*, pages 121–128, 2000.
- [KN01] T.-Y. Kim and U. Neumann. Opacity shadow maps. *Rendering Techniques 2001, Springer*, pages 177–182, July 2001.



- 
- [KN02] T.-Y. Kim and U. Neumann. Interactive multiresolution hair modeling and editing. *ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIGGRAPH 2002)*, 21(3) :, pages 620–629, 2002.
- [Kom88] Koji Komatsu. Human skin model capable of natural shape variation,. *The Visual Computer, Vol.3, No5*, pages 265–271, 1988.
- [Kor69] G. Kortum. Reflectance spectroscopy. *Springer-Verlag, Berlin*, 1969.
- [Lan00] Jeff Lander. Devil in the blue-faceted dress : Real-time cloth animation,gamasutra, March 27 2000.
- [Lan01] David Lanier. L’animation temps réel dans les jeux vidéo, 2001. <http://dlanier.free.fr>.
- [Lar86] W. F. Larrabee. A finite element method of skin deformation : I. biomechanics of skin and soft tissues. *Laryngoscop*, 96, pages 399–405, 1986.
- [Len00] J. Lengyel. Real-time fur. *Eurographics Rendering Workshop 2000*, July 2000.
- [LFTG97] Eric P.F. Lafortune, S. Foo, K.E. Torrance, and D.P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 1997)*, pages 117–126, 1997.
- [LK01] D.-W. Lee and H.-S. Ko. Natural hairstyle modeling and animation. *Graphical Models*, 63(2), pages 67–85, 2001.
- [LMTT91] B. Lafleur, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. Cloth animation with self-collision detection. *IFIP Conference on Modeling in Computer Graphics, Springer, WG5.10 Tokyo*, pages 179–187, 1991.
- [LP01] J. Lengyel and E. Praun. Real-time fur over arbitrary surfaces. *Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, 2001.
- [LPC95] Jean Louchet, Xavier Provot, and David Crochemore. Evolutionary identification of cloth animation models. *6th Eurographics Workshop on Animation and Simulation,Maastricht*, September 1995.
- [LT95] Y. Lee and D. Terzopoulos. Realistic modeling for animation. *Proc. SIGGRAPH*, pages 55–62, 1995.
- [LTT91] A. LeBlanc, R. Turner, and D. Thalmann. Rendering hair using pixel blending and shadow buffers. *The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 2*, pages 92–97, 1991.
- [LV00] Tom Lokovic and Eric Veach. Deep shadow maps. *SIGGRAPH Proceedings, Vol. 34*, pages 385–392, July 2000.
- [LWNT99] W. Lee, Y. Wu, and N.Magnenat-Thalmann. Cloning and aging in a vr family. *Proc. IEEE VR’99 (Virtual Reality), Houston, Texas*, March 13-17 1999.
- [MC96] P. Meseure and C. Chaillou. Modélisation mécanique pour la simulation d’actes chirurgicaux. *4ème séminaire du groupe de travail ‘Animation et Simulation’ GDR-PRC AMI, Strasbourg*, January 1996.
- [ME98] M. Meißner and B. Eberhard. The art of knitted fabrics, realistic and physically based modelling of knitted patterns. in *Proceedings of the 1998 Eurographics conference, Computer Graphics Forum*, 1998.
- [Min41] M. Minnaert. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal, Vol. 93*, 1941.
- [MKB<sup>+</sup>03a] Tom Mertens, Jan Kautz, Philippe Bekaert, Frank Van Reeth, and Hans-Peter Seidel. Interactive rendering of translucent deformable objects. *Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, Leuven, Belgium, June 25-27*, pages 130–140, 2003.

- [MKB<sup>+</sup>03b] Tom Mertens, Jan Kautz, Philippe Bekaert, Hans-Peter Seidel, and Frank Van Reeth. Efficient rendering of local subsurface scattering. *11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'03)*, pages 51–58, 2003.
- [MMK03] J. Meseth, G. Müller, and R. Klein. Preserving realism in real-time rendering of bidirectional texture functions. *proceedings of OpenSG Symposium 2003 - Eurographics Association, Switzerland*, pages 89–96, April 2003.
- [MMSK03] J. Meseth, G. Müller, M. Sattler, and R. Klein. Btf rendering for virtual environments. *Proceedings of Virtual Concepts 2003*, pages 356–363, November 2003.
- [MN01] Sebastian Magda and Jakob Nebeker. The fast furrier transform : Real-time fur, cs497mjg – real-time rendering with prof. garland. Master's thesis, Department of Computer Science at the University of Illinois at Urbana-Champaign, December 11 2001.
- [Mon92] J.J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30 :, pages 543–574, 1992.
- [MTH<sup>+</sup>96] W. Maurel, D. Thalmann, P. Hoffmeyer, P. Beylot, P. Gingins, P. Kalra, and N. Magnenat-Thalmann. A biomechanical musculoskeletal model of human upper limb for dynamic simulation. *Computer Animation and Simulation 96. Proceedings of the Eurographics Workshop in Poitiers*,, pages 121–136, August 1996.
- [MTH02] N. Magnenat-Thalmann and S. Hadap. State of the art in hair simulation. *International Workshop on Human Modeling and Animation, Seoul, Korea, Korea Computer Graphics Society*, pages 3–9, June 2002.
- [MTKL<sup>+</sup>02] Nadia Magnenat-Thalmann, Prem Kalra, Jean Luc Lévêque, Roland Bazin, Dominique Batisse, and Bernard Querleux. A computational skin model : fold and wrinkle formation. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 6(4), pages 317–323, 2002.
- [MTLT88] N. Magnenat-Thalmann, R. Laperrière, and D. Thalmann. Joint dependent local deformations for hand animation and object grasping. *Proc. Graphics Interface '88*, 1988.
- [MTPT88] N. Magnenat-Thalmann, E. Primeau, and D. Thalmann. Abstract muscle action procedures for human face animation. *The Visual Computer, Vol. 3, No. 5*, pages 290–297, 1988.
- [MVH02] Ramon Montoya-Vosmediano and Mark Hammel. Stylized flowing hair controlled with nurbs surfaces. *SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings*, page 254., 2002.
- [MW88] M. Moore and J. Wilhelms. Collision detection and response for computer animation. In *SIGGRAPH 1988, ACM Press / ACM SIGGRAPH, Comput. Graphics Proc., Vol. 22, No. 4*, pages 289–298, 1988.
- [Neu01] Ivan Neulander. Grooming and rendering cats and dogs. *SIGGRAPH '01 Technical Sketch*, August 2001.
- [NG96] H.N. Ng and R.L. Grimsdale. Computer graphics techniques for modelling cloth. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16, (5), pages 28–41, 1996.
- [Nou99] Jean-Michel Nourrit. *Modélisation, animation et visualisation de textiles à base de mailles*. PhD thesis, Université de Reims, Champagne Ardenne, 1999.
- [NRH<sup>+</sup>77] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. Geometric considerations and nomenclature for reflectance. *Monograph 161, National Bureau of Standards (US)*, October 1977.
- [NSTN93] Tomoyuki Nishita, Takao Sirai, Katsumi Tadamura, and Eihachiro Nakamae. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 175–182. ACM Press, 1993.

- 
- [NTPW04] Paul Noble, Wen Tang, Alex Parkinson, and Ciaran Wills. Modelling and animating cartoon hair. *Journal of WSCG Vol.12*, pages 1–3, 2004.
- [NvdP98] Ivan Neulander and Michiel van de Panne. Rendering generalized cylinders with paintstrokes. *In Graphics Interface 98*, June 1998.
- [Nvi02] Nvidia. Real-time human skin with cg, nvidia sdk, July 2002.
- [Par74] FI. Parke. *A Parametric Model for Human Faces*. PhD thesis, University of Utah, 1974.
- [Par82] FI. Parke. Parametric model for facial animation. *IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 2, No. 9*, pages 61–68, 1982.
- [PB88] J.C. Platt and A.H. Barr. Constraint methods for flexible models. *Computer Graphics, Vol. 22, No. 4*, pages 279–288., 1988.
- [PC02] E. Plante and M.-P. Cani. Capturing the complexity of hair motion. *GMOD, 64(1)*, january 2002.
- [PCP01] E. Plante, M.-P. Cani, and P. Poulin. A layered wisp model for simulating interactions inside long hair. *Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation 2001*, pages 139–148, 2001.
- [Per89] K. Perlin. Hypertexture. *Computer Graphics, 23(3)*, pages 253–262, August 1989.
- [Pie92] S. Pieper. *CAPS : Computed-Aided Plastic Surgery*. PhD thesis, MIT, Media Arts and Sciences, Cambridge, MA, 1992.
- [Pix01] Pixar. Ricurve de renderman, 2001.
- [Pro95] Xavier Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. *Graphics Interface*, pages 147–155, 1995.
- [Pro97a] Xavier Provot. Animation réaliste de vêtements. *Cinquième séminaire du Groupe de travail 'Animation et Simulation' du GDR-PRC AMI (Algorithme, Modélisation, Infographie)*, Reims, pages 75–89, March 1997.
- [Pro97b] Xavier Provot. Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garment. *Graphics Interface*, pages 77–89, 1997.
- [RB85] William T. Reeves and Ricki Blau. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. *In SIGGRAPH 85*, July 1985.
- [RCT91] R. E. Rosenblum, W. E. Carlson, and III. E. Tripp. Simulating the structure and dynamics of human hair : Modelling, rendering and animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation , Vol. 2, No. 4*, pages 141–148, 1991.
- [Rog01] Michel Roger. Texture skin procedural, 3dsmax joan of arc tutorial, 2001.
- [Rus97] Szymon Rusinkiewicz. A survey of brdf representation for computer graphics. Technical report, Stanford Computer Graphics Laboratory, Winter 1997.
- [Rya97] Amy Ryan. Modeling and animating hair, 1997. [www-viz.tamu.edu/courses/viza615/97spring/eighmi/research/index.html](http://www-viz.tamu.edu/courses/viza615/97spring/eighmi/research/index.html).
- [SBLD03] Frank Suykens, Karl Berge, Ares Lagae, and Philip Dutré. Interactive rendering with bidirectional texture functions. *Computer Graphics Forum Volume 22, Issue 3 (September 2003)*, pages –, September 2003.
- [SF92] M. Shinya and M.C. Forgue. Interference detection through rasterization. *The Journal of Visualization and Computer Animation , Vol. 2, No. 4*, pages 132–134, 1992.

- [SG95] K. Shimada and D.C. Gossard. Bubble mesh : automated triangular meshing of non-manifold geometry by sphere packing. *Third Symposium on Solid Modelling and Applications, Salt Lake City, Utah*, pages 409–419, May 1995.
- [Shi02] Syunichi Shirai. G2 lighting and shading system, worley laboratories, 2002.
- [SK00] Karan Singh and Evangelos Kokkevis. Skinning characters using surface-oriented free-form deformations. *Graphics Interface*, pages 35–42, 2000.
- [SMT00] S.Hadap and N. Magnenat-Thalmann. Interactive hair styler based on fluid flow. *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation'2000, Interlaken, Switzerland, Springer-Verlag*, pages 87–99, August 2000.
- [SPCM97] Ferdi Scheepers, Richard E. Parent, Wayne E. Carlson, and Stephen F. May. Anatomy-based modeling of the human musculature. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series) :163–172, 1997.
- [SPS96] A.I. Sourin, A.A. Pasko, and V.V Savchenko. Using real functions with application to hair modelling. *Computers and Graphics* , vol.20, No.1, Pergamon,, page 1, 1996.
- [SSK03] Mirko Sattler, Ralf Sarlette, and Reinhard Klein. Efficient and realistic visualization of cloth. *Eurographics 2003, Symposium on Rendering*, June 2003.
- [Sta02] Steven Stahlberg. Human skin shading, 2002. [http ://www.optidigit.com/stevens/](http://www.optidigit.com/stevens/).
- [TC92] J. A. Thingvold and E. Cohen. Physical modeling with b-spline surfaces for interactive design and animation. *In Proc. of SIGGRAPH 1992, ACM Press / ACM SIGGRAPH, Comput. Graphics Proc.*, pages 129–137, 1992.
- [TPBF87] Demetri Terzopoulos, John Platt, Alan Barr, and Kurt Fleisher. Elastically deformable models. *Proc. SIGGRAPH87, Computer Graphics, volume 21 (4)*, pages 205– 214, July 1987.
- [TW90] D. Terzopoulos and K. Waters. Physically-based facial modeling and animation. *Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 1*, pages 73–80, 1990.
- [VB02] Julien Villard and Houman Borouchaki. Adaptative meshing for cloth animation. *11th International Meshing Roundtable,Ithaca, New York, USA*, 2002.
- [VCMT95] Pascal Volino, Martin Courchesne, and Nadia Magnenat-Thalmann. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. *SIGGRAPH 1995*, pages 137–144, 1995.
- [vGJSS89] M. F. C. van Gemert, S. L. Jacques, H. J. C. M. Sterenberg, and W. M. Star. Skin optics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 36, 12, pages 1146–1154, December 1989.
- [VMT97] Pascal Volino and Nadia Magnenat-Thalmann. Developing simulation techniques for an interactive clothing system. *In Proc. of the 1997 International Conf. on Virtual Systems and Multimedia,IEEE*, pages 109–118, 1997.
- [VT99] P. Volino and N. M. Thalmann. Fast geometrical wrinkles on animated surfaces. *WSCG 99*, 1999.
- [Wat87] K. Waters. A muscle model for animating three dimensional facial expression. *Proc SIGGRAPH'87, Computer Graphics, Vol.21, No. 4*, pages 123–128, 1987.
- [Web00] Jason Weber. Run-time skin deformation intel architecture labs, 2000. [jhttp ://www.imonk.com/jason/bones/weberj.doc](http://www.imonk.com/jason/bones/weberj.doc).
- [Wei86] J. Weil. The synthesis of cloth objects. *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings), Vol. 20, No. 4*, pages 49–54, August 1986.

- 
- [Wel04] Terry Welsh. Parallax mapping with offset limiting : A perpixel approximation of uneven surfaces. Technical report, Infiscape Corporation, 2004.
- [WKMT96] Yin Wu, Prem Kalra, and Nadia Magnenat-Thalmann. Simulation of static and dynamic wrinkles of skin. *Computer Animation*, June 03-04 1996.
- [WL] L. Wei and M. Levoy. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2000)*.
- [WMTT94] Yin Wu, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. A plastic-visco-elastic model for wrinkles in facial animation and skin ageing. *Proc. 2nd Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Pacific Graphics '94*, pages 201–213, 1994.
- [WMTT95] Yin Wu, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. A dynamic wrinkle model in facial animation and skin ageing. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 6(4) :195–205, 1995.
- [WS89] Y. Watanabe and Y. Suenaga. Drawing human hair using wisp model. *Proc. Computer Graphics International '89*, pages 691–700, 1989.
- [YPMT97] Y.Wu, P.Kalra, and N. Magnenat-Thalmann. Physically-based wrinkle simulation and skin rendering. *EGCAS97*, 1997.
- [YS87] T. Yamana and Y. Suenaga. A method of hair representation using anisotropic reflection. *IECEJ Technical Report, PRU87-3 :(In Japanese)*, pages 15–20, May 1987.
- [YS92] T. Yamana and Y. Suenaga. A trigonal prism-based method for hair image generation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12(1) :, pages 47–53, January 1992.
- [YYTI92] T. Yasuda, S. Yokoi, J. Toriwaki, and K. Inagaki. A shading model for cloth objects. *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 12, No. 6, pages 15–24, 1992.
- [YZ01] M.M. Yuen and D. Zhang. Cloth simulation using multilevel meshes. *Computer and Graphics*, vol 25., pages 383–389, December 2001.
- [Zaj89] F.E. Zajac. Muscle and tendon : properties, models scaling and application to biomechanics and motor control. *CRC Critic. Rev. in Biomedical Engineering*, 17 :359–411, 1989.



## Résumé

La représentation d'un être humain virtuel soulève un grand nombre de problèmes de modélisation, d'animation, de rendu. L'objectif de ce mémoire est de faire le point sur les différents modèles de rendu temps réel applicables à l'humain virtuel.

Que ce soit pour la peau, les vêtements ou les cheveux, la complexité géométrique de leur microstructure conduit à créer des modèles de leur mesostructure. Cette approche génère un écart de comportement tant au niveau de l'animation que du rendu. Ce document expose les modèles qui tentent de répondre à ce dilemme.

**Mots-clés:** Synthèse d'images, Rendu réaliste, Rendu temps réel, Humain virtuel, Peau, Cheveux, Vêtements

## Abstract

The representation of a virtual human raises a lot of problems of modelling, animation and rendering. This master's thesis attempts to bring a state of art of the virtual human real-time models.

The geometrical complexity of the microstructures of skin, clothes or hair, leads to build rough models based upon their mesostructures. However, this approach extends the animation and rendering behaviour gap between micro and mesostructure. This document depicts the ones that intend to resolve this dilemma.

**Keywords:** Computer Graphics, Realistic rendering , Real time rendering, Virtual Human, Skin, Hair, Clothes

